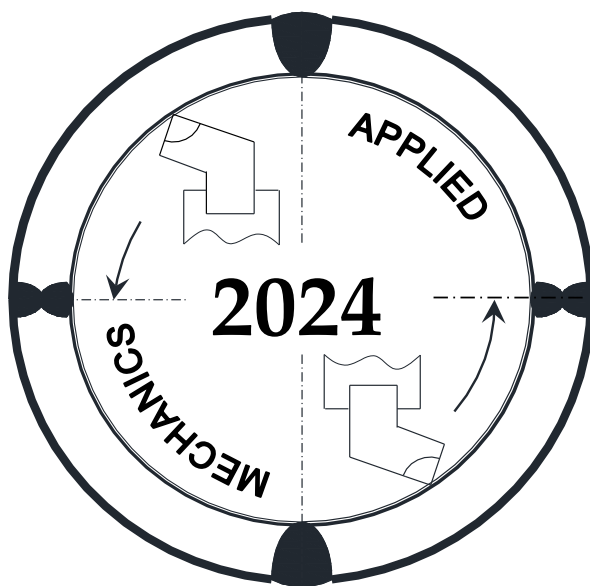


Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
Національний університет «Львівська політехніка»
Національний університет «Запорізька політехніка»
Донбаська державна машинобудівна академія
Вінницький національний технічний університет
Кошицький технічний університет
Військово-технічна академія ім. Я. Домбровського (м. Варшава)
Маріборський університет
Товариство зварників України

І МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ



“ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА”

*присвячена 80-ти річчю з дня народження
професора Ч.В. Пульки*

6 - 7 червня, Тернопіль, 2024

ББК 72
УДК 001+621
П66

Голова програмного комітету	Павло МАРУЩАК	/Україна/
Заступник голови програмного комітету	Володимир ДЗЮРА	/Україна/
Голова організаційного комітету	Ігор ОКІПНИЙ	/Україна/
Науковий секретар	Сергій МАРИНЕНКО	/Україна/

Члени програмного комітету

Андрейків О.Є.	Книш В.В.	Петраков Ю.В.
Барановський В.М.	Ковальов В.Д.	Підгурський М.І.
Биковський О. Г.	Кусий Я.М.	Пилипець М.І.
Брезінова Ж.	Косарчук В.В.	Повстяной О.Ю.
Будзан Б.П.	Кречковська Г.В.	Пискунов С.О.
Васильченко Я.В.	Келемен М.	Рябцев І.О.
Вухерер Т.	Марчук В.І.	Славов С.
Вінаш Я.	Макаренко Н.О.	Студент М.М.
Грицай І.Є.	Максимов С.Ю.	Ступницький В.В.
Грушко О.В.	Максимович О.В.	Стухляк П.Д.
Гуцайлюк В.Б.	Майданчук Т.Б.	Чаусов М.Г.
Гурей В.І.	Мено А.	Тарасовська С.О.
Дімітров Д.	Михайлишин Р.І.	Чирков О.Ю.
Духон Ф.	Никифорчин Г.М.	Ясній В.П.
Залога В.О.	Охріменко О.А.	Ясній О.П.
Звірко О.І.	Пашенко В.М.	Васильків В.В.
Кальченко В.В.	Пермяков О.А.	

П66 Прикладна механіка. Праці I Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль 6-7 червня 2024 р.) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. – 356 с.

ISBN 978-617-7875-80-1

У збірнику висвітлені доповіді I Міжнародної науково-технічної конференції "Прикладна механіка" (Тернопіль, 6-7 червня 2024 р.). Розглянуто наступні питання: сучасні технології машинобудування; нові методи зварювання, наплавлення, напилення; механіка руйнування матеріалів і конструкцій; надійність і довговічність механізмів і машин; покриття, нові технології нанесення; мехатроніка, робототехніка, дрони; прикладне матеріалознавство.

Відповідальний редактор Павло МАРУЩАК

Всі права захищені. Жодна з доповідей цього видання не може бути повністю чи частково відтворена або розмножена електронним, механічним, фото- чи будь-яким іншим способом без попереднього письмового погодження з програмним комітетом конференції. Всі доповіді відтворено з дозволу їх авторів.

Видавець не несе відповідальності за будь-який збиток, заподіяний особам чи власності внаслідок некоректності наданої в збірнику інформації або при використанні будь-яких методів, виробів чи ідей, які описано в поданих авторами доповідях.

ISBN 978-617-7875-80-1

©Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024

ЗМІСТ

Секція: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

Роман Бица, к.т.н.; Володимир Семеген; Олег Крук ВЛАСТИВОСТІ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ ЯК ЗАСОБУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	12
Василь Васильків, д.т.н., проф.; Олександр Корнев; Назарій Маковинський ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ І ШНЕКОВИХ ЗАГОТОВОК.....	15
Максим Гадайчук КОМБІНОВАНИЙ КОПАЧ КОРЕНЕПЛОДІВ ЦИКОРІЮ.....	17
Надія Гашин, к.т.н., доц.; Галина Семенишин НАГРІВАННЯ КІЛЬЦЕВОГО ДИСКА З ТЕРМІЧНИМ ЕКРАНУВАННЯМ ТОРЦІВ.....	21
Юрій Гладь, к.т.н., доц.; Надія Крива ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ.....	23
Ігор Грицай д.т.н., проф.; Андрій Сліпчук к.т.н., доц.; Андрій Кук к.т.н., доц. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ ВРІЗАННЯ В МЕТОДІ POWER SKIVING.....	26
Лариса Данильченко, к.т.н., доц.; Дмитро Радик, к.т.н., доц. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ.....	29
Андрій Дячун, к.т.н., доц.; Олег Деріш, В. Грасовник ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ ГОФРОВАНИХ ЗАГОТОВОК.....	33
Богдан Завертанний, Ph.D.; Геннадій Пасов, к.т.н., доц.; Віра Мурашковська ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РОБОТИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	35
Юрій Капаціла, к.т.н., доц.; Віталій Сенчишин; Олександр Шовкун РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЦАНГИ ДЛЯ ПОДАЧІ ПРУТКОВОГО МАТЕРІАЛУ.....	38
Антоніна Кологойда, к.т.н., доц.; Геннадій Пасов, к.т.н., доц.; Віра Мурашковська ПРОЕКТУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ КОРОБКИ ШВИДКОСТЕЙ З ВИКОРИСТАННЯ САПР.....	40
Роман Комар, к.т.н., доц.; Петро Комар ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ФРЕЗАМИ ІЗ ЗМІННИМИ ПЛАСТИНАМИ.....	44
Дмитро Коновалов, Володимир Крупа, к.т.н., доц. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІХ РІЗЕЙ ЗА КЛАСИФІКАЦІЙНИМИ ОЗНАКАМИ.....	46
Віталій Корендій, к.т.н., доц.; Олег Парашин; Володимир Гелетій, к.т.н., доц. РЕАЛІЗАЦІЯ ЛІНІЙНИХ, ЕЛІПТИЧНИХ І КОЛОВИХ КОЛИВАНЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН ЗА ДОПОМОГОЮ ВІБРОЗБУДНИКІВ ПЛАНЕТАРНОГО ТИПУ.....	49
Максим Новіцький; Андрій Сліпчук, к.т.н., доц. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДЕМПІФЕРІВ КОЛИВАНЬ В	

КОНСТРУКЦІЇ ВІБРОСТІЙКОГО МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ.....	52
Геннадій Пасов, к.т.н., доц.; Антоніна Кологойда, к.т.н., доц.; Богдан Завертанний, Ph.D.	
Анімація роботи гідроциліндрів та пневмокамер для створення прямолінійного поступального руху.....	56
Михайло Пилипець, д.т.н., проф.; Андрій Грабовський	
ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З НАВИВНИХ ЗАГОТОВОК..	60
Максим Прядкін	
ЗАСТОСУВАННЯ ПЛЮЩИЛЬНИХ АПАРАТІВ ДИНАМІЧНОЇ ДІЇ ДЛЯ ЗАГОТІВЛІ КОРМІВ ІЗ ТРАВ.....	62
Андрій Сверстюк, д.т.н., проф.; Дмитрій Радчук; Андрій Хемій; Віктор Гунька	
ОПТИМІЗАЦІЯ НАУКОВОГО ПОШУКУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ З ПРОТЕЗУВАННЯ.....	66
Лариса Сенік	
ОСНОВНІ ЗАСАДИ ВИКОРИСТАННЯ 3D-ДРУКУ В СУЧАСНОМУ АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ.....	70
Богдан Товт, к.т.н.	
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ.....	72
Іван Бельмас, д.т.н., проф.; Ганна Танцура, к.т.н., доц.; Олена Білоус, к.т.н., доц.; Дмитро Часов, к.т.н., доц.; Ангеліна Швачка; Олександр Гумаров	
МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ В ГУМОВИХ ВАНТОВИХ СИСТЕМАХ З ДЕФЕКТАМИ З'ЄДНАННЯ.....	74
Денис Биків, Андрій Кос, Олег Підлужний, Іван Підгурський, к.т.н., доцент, Микола Підгурський, д.т.н., професор	
МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ПЕРФОРОВАНИХ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК З РЕГУЛЯРНОЮ ТА НЕРЕГУЛЯРНОЮ СТРУКТУРОЮ ОТВОРІВ	76
Секція: НОВІ МЕТОДИ ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ, НАПИЛЕННЯ	
Анатолій Бабінець, к.т.н., с.досл.; Ігор Рябцев, д.т.н., проф.; Іван Лентюгов, к.т.н., с.досл.	
ЕФЕКТ СТРУКТУРНОЇ СПАДКОВОСТІ У СТАЛЯХ ТА СПЛАВАХ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ.....	80
Дмитро Васильєв; Сергій Максимов; Галина Фадеева; Алла Радзівська	
ВПЛИВ ГАЗО-ШЛАКОВИХ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА СТАБІЛЬНІСТЬ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ДУГИ ПРИ МОКРОМУ ПІДВОДНОМУ ЗВАРЮВАННІ.....	84
Володимир Гаврилюк; Чеслав Пулька, д.т.н., проф.	
ІНДУКЦІЙНЕ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДЦЕНТРОВОГО ОБЕРТАННЯ.....	88
Володимир Гаєвський, к.т.н., доц.; Олег Гаєвський, к.т.н., доц.; Антон Кушнір	
ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПІВ БЕРЕЖЛИВОГО ВИРОБНИЦТВА ДО ПЛАНУВАННЯ ДІЛЬНИЦІ СКЛАДАННЯ ТА ЗВАРЮВАННЯ.....	90
Олександр Диха, д.т.н., проф.; Анатолій Вичавка; Максим Диха, к.т.н.; Володимир Дитинюк, Ph.D.	

РЕМОНТ КЛАПАНІВ ГРМ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА НАПИЛЕННЯМ ЗНОСОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ.....	92
Олександр Костін, к.т.н., доц.	
ВПЛИВ ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ КАТЕГОРІЇ Е36.....	95
Олег Кузін, д.т.н., доц.; В'ячеслав Копилов, д.т.н., проф.; Микола Кузін, д.т.н., проф.	
ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ПОВЕРХОНЬ ПОДІЛУ СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ТЕРМІТНОГО ЗВАРЮВАННЯ РЕЙОК.....	98
Одарка Прохоренко, к.т.н., доц.; Іван Лагодзінський	
ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ У ПРОСТОРОВИХ ВИРОБАХ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ З КРЕМНІЄВОЇ БРОНЗИ ПІД ЧАС АДИТИВНОГО WAAM ПРОЦЕСУ.....	101
Роман Мастенко; Владислав Коваленко, к.т.н, доц.; Наталія Стреленко к.т.н., доц.; Олексій Сливінський, к.т.н., доц.	
ПРОБЛЕМАТИКА КОРЕКТНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ІСНУВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДУГОВОГО РОЗРЯДУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ.....	105
Святослав Мотруніч, к.т.н., с.д.; Джі Джунвєнь; Анатолій Завдовєєв, к.т.н., с.д.; Маріанна Димань, к.т.н., с.д.; Іван Волосатов; Віталій Книш, д.т.н., проф.	
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ, ОТРИМАНИХ З 3D ДРУКОМ ДУГОВИМИ АДДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГІЯМИ З НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 625.....	107
Сергій Мінаков, к.т.н., доц.; Євгенія Чвертко, к.т.н., доц.; Наталія Стреленко, к.т.н., доц.; Денис Степанов, к.т.н., доц.; Антон Мінаков, к.т.н.; Іван Вдовиченко; Дмитро Вдовиченко; Анатолій Кучик	
3D НАПЛАВЛЕННЯ НА ВЕРСТАТАХ ІЗ ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ.....	111
Олег Король; Ігор Окіпний, к.т.н., доц.; Богдан Береженко; Олег Гурик, к.т.н., доц.; Любов Цимбалюк, к.ф.-м.н., доц.	
ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ.....	113
Павло Онищенко, Сергій Козулін, к.т.н., с.н.с.; Сергій Мариненко к.т.н., доц.; Сергій Резнік, Андрій Ганчук	
ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ СТАЛІ 09Г2 ДВОМА ЕЛЕКТРОДНИМИ ДРОТАМИ ДІАМЕТРОМ 2,0 ММ.....	116
Валерій Перемітько, д.т.н., проф.; Ігор Коломоєць, Ph.D.; Антон Євдокимов, Іван Кривда	
ПІДВИЩЕННЯ ОПІРНОСТІ ЗНОСУ МЕТАЛУ ЗА РАХУНОК ДОДАВАННЯ ВУГЛЕВОДНІВ ДО ШИХТИ НАПЛАВНОГО ДРОТУ.....	119
Юрій Попіль, к.т.н., доц.; Денис Степанов, к.т.н.; Ярослав Богуш	
РОЗРОБКА ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВОДНЕВО – КИСНЕВОЇ ПЛАЗМИ.....	121
Ігор Протоковілов, д.т.н., с.н.с.; Віталій Порохонько, к.т.н., с. докл.; Музаффар Абралов, к.т.н.	
ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНУ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВПЛИВОМ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ МЕТАЛУ	

ШВА.....	124
Одарка Прохоренко, к.т.н., доц.; Володимир Прохоренко, д.т.н., проф.;	
Чеслав Пулька, д.т.н. проф.; Віктор Сенчишин, к.т.н.	
ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОДНОБІЧНОГО І ДВОБІЧНОГО СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ.....	128
Чеслав Пулька, д.т.н., проф.; Михайло Пулька; Віталій Сенчишин; Сергій Окіпний; Мирослав Шарик	
ПРИСТРІЙ ДЛЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ФАСОННИХ ДИСКІВ ІЗ ЗНЯТТЯМ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ.....	132
Чеслав Пулька, д.т.н., проф.; Віктор Сенчишин, к.т.н.; Ігор Окіпний, к.т.н., доц.; Юрій Капаціла, к.т.н., доц.; Михайло Пулька	
ВДОСКОНАЛЕНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ.....	134
Чеслав Пулька, д.т.н., проф.; Віктор Сенчишин, к.т.н., Ігор Окіпний, к.т.н., доц.; Микола Підгурський, д.т.н., проф.; Одарка Прохоренко, к.т.н., доц.	
РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ДИСКІВ.....	136
Сергій Римар, д.т.н., с.н.с.; Олексій Прокоф'єв, к.т.н.; Руслан Губатюк, к.т.н.;	
Євген Пантелеймонов, к.т.н., с.н.с.; Валерій Абдулах	
ВИКОРИСТАННЯ ЗРАЗКІВ МАЛИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ФОРМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ІНДУКЦІЙНОГО ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ.....	138
Богдан Царик; Олег Махненко, д.т.н.	
РОЗРАХУНКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЄМНОСТЕЙ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ.....	141
Олександр Яровицин, к.т.н., с.д.; Микола Черв'яков, д.т.н., с.н.с.; Георгій Хрущов; Іван Волосатов	
РОЗРОБКА І АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ДІЛЯНКИ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ВАЖКОЗВАРЮВАНОВОГО НІКЕЛЕВОГО ВИСОКОЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ.....	145
Секція: МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ	
Андрій Бабій, д.т.н., проф.; І. Головецький	
ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСАХ НАВАНТАЖЕННЯ.....	149
Віктор Барановський, д.т.н., проф.; Марія Паньків, к.т.н., доц.; Віталій Паньків, к.т.н., доц.; Н. Дубчак, к.т.н., доц.; Юлія Паньків, Ph.D.	
МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ПРОДУКТІВ.....	152
Борис Карпінос, д.т.н., проф.; Андрій Бологін, к.т.н., с.н.с.; Петро Ковель, к.т.н., с.н.с.; Леонід Нагорний, д.т.н., проф.	
ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СИЛОВОГО ЕЛЕМЕНТУ ГЕЛІКОПТЕРА З УРАХУВАННЯМ РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	156
Костянтин Буйських, к.т.н., с.н.с.; Леонід Кравчук, д.т.н., проф.	
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНЬОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ.....	159
Олег Герасимчук, д.т.н., с.н.с.; Олег Кононученко, к.т.н., с.досл.	

ОЦІНКА ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДО ІНІЦІУВАННЯ ТРІЩИНИ ВІД КОНЦЕНТРАТОРА НАПРУЖЕНЬ У СТАЛЕВИХ ЗРАЗКАХ ЗА ЗМІННОГО РОЗМАХУ НАПРУЖЕНЬ ЦИКЛУ	162
М. Димань, к.т.н., с.д.; А. Лакша, д.м.н., проф., О. Фомін, к.м.н., доц. ДЕФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ОСТЕОСИНТЕЗУ СКЛАДНИХ ПЕРЕЛОМІВ КІСТОК ТАЗУ	166
Тарас Довбуш, к.т.н., доц.; Вікторія Мартинюк, Ph.D.; Анатолій Довбуш ОБҐРУНТУВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ БАРАБАННОГО ТИПУ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ГИЧКИ З ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ	170
Тарас Довбуш, к.т.н., доц.; Надія Хомик к.т.н., доц.; Ганна Цьонь, к.т.н. ОБҐРУНТУВАННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПАСИВНОГО НОЖА ДЛЯ ДООБРІЗУВАННЯ ГОЛОВОК КОРЕНЕПЛОДІВ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ	174
Євген Кондряков, к.т.н.; Андрій Кравчук, к.т.н.; Валерій Харченко, д.т.н.; Володимир Жмака МОДЕРНІЗАЦІЯ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО КОПРА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ УДАРНИХ ВИПРОБУВАНЬ РІЗНИХ ТИПІВ	178
Галина Кречковська д.т.н., с.досл.; Петро Соловей; Леся Свірська, к.т.н.; Іван Курнат, Олександра Студент, д.т.н., проф. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОШКОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОТОРІВ ПАРОВИХ ТУРБІН ВНАСЛІДОК КОНТАКТНОЇ ВТОМИ	182
Юрій Крутій, д.т.н., проф.; Данило Величко ПРО ВІЛЬНІ КОЛИВАННЯ КРУГЛИХ СУЦІЛЬНИХ ТА КІЛЬЦЕВИХ ПЛАСТИН НА НЕОДНОРІДНІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ ВІНКЛЕРА	186
Олександр Кіпніс, к.ф.-м.н. ПЛОСКА ЗАДАЧА МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ПРО СТИСК КУСКОВО-ОДНОРІДНОЇ ПІВПЛОЩИНИ З ЗАКРІПЛЕНОЮ МЕЖЕЮ ВЗДОВЖ МІЖФАЗНОЇ ТРІЩИНИ	189
Григорій Никифорчин, д.т.н., проф.; Ольга Звірко, д.т.н., проф., член-кореспондент НАН України; Олександр Цирульник, д.т.н., с.н.с.; Олег Венгринюк ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВОДНЕВОЇ КРИХКОСТІ ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ	193
Вячеслав Сидяченко, к.т.н., с.досл., Андрій Котляренко, к.т.н., с.досл. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ НА ЗРАЗКАХ З РІЗНОЮ СКУТІСТЮ ДЕФОРМАЦІЙ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРА РОЗКРИТТЯ ВЕРШИНИ ТРІЩИНИ	196
Олег Добриденко, к.т.н., с.н.с.; Максим Стрела, Ph.D. ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ВИКОНАННІ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОБІТ З ПРОДОВЖЕННЯ (ЗБІЛЬШЕННЯ) РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ	200
Георгій Цибаньов, д.т.н. ОПИС ЗАРОДЖЕННЯ І РОСТУ ТРІЩИНИ ВТОМИ З ГЛАДКОЇ ПОВЕРХНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ КРИВОЇ ВТОМИ	204
Павло Марущак, д.т.н., проф.; Володимир Дзюра, д.т.н., проф.; Олена Марущак	

БАГАТОМАСШТАБНА КЛАСИФІКАЦІЯ МОРФОЛОГІЧНИХ СКЛАДОВИХ ПОВЕРХНІ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ 206

Секція: НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН

Павло Булах, к.т.н.; Володимир Швець, к.т.н.; Анатолій Рутковський, к.т.н.; Володимир Данилюк, к.т.н.; Євген Кондряков, к.т.н.; Андрій Котляренко, к.т.н.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРУБЧАТИХ ЗРАЗКІВ ІЗ СТАЛІ 40ХН2МА..... 209

Григорій Габрусев, к.ф.-м.н., доц.; Ірина Габрусєва, к.т.н.

ОЦІНКА МІЦНОСТІ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ ПЛИТИ ПРИ ВТИСНЕННІ ІНДЕНТОРА СКЛАДНОЇ ФОРМИ..... 212

Дмитро Герус

СИНУСОЇДАЛЬНІ ЗУБЧАСТІ КОЛЕСА. ПЕРЕВАГИ, ОСОБЛИВОСТІ, ЗАСТОСУВАННЯ..... 216

Борис Карпінос, д.т.н., проф.; Андрій Бологін, к.т.н., с.н.с.; Георгій Горохов, к.т.н., с.н.с.; Юрій Манулін

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН..... 218

Андрій Гупка, к.т.н., доц.; Віктор Аулін, д.т.н., проф.; Петро Стухляк, д.т.н., проф.; Роман Лешук, к.т.н., доц.; Ігор Ярема, к.т.н., доц.; Валерій Буховець, к.т.н., доц.

ТРИБОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ СПРЯЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ТРАСПОРТНИХ ЗАСОБІВ..... 221

Вячеслав Дегтярев, к.т.н., с.н.с.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦЬ ВИТРИВАЛОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ МІЦНОСТІ З ЗАЛИШКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ..... 225

Сергій Кобельський, к.т.н., с.н.с.

ВПЛИВ УРАХУВАННЯ ПЛАСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ МЕТАЛУ НА ОПІР РУЙНУВАННЮ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000..... 228

Віктор Ковальов, д.т.н., проф.; Яна Васильченко, д.т.н., проф.; Галина Клименко, д.т.н., проф.; Максим Шаповалов, к.т.н., доц.; Микола Шаповалов ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РІЗЦІВ МАГНІТОІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ..... 232

Юрій Кусков, д.т.н., с.н.с.; Валерій Проскудін, к.т.н.; Антон Нетяга, к.т.н., м.н.с.; Ігор Чірков; Віктор Бовсуновський

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ОБЛАДНАННЯ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ У СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ..... 236

Олег Маковкін. К.т.н., доц.; Ігор Вальчук

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОШЕННЯ ДЕТАЛЕЙ..... 238

Михайло Михайлишин, к.ф.-м.н., доц.; Володимир Михайлишин

РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТОНКИХ ОБОЛОНОК..... 242

Георгій Писаренко, д.т.н., проф.; Андрій Майло, к.т.н.; Андрій Бялонович, к.т.н.; Олександр Войналович², к.т.н., доц.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІНЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ ПЛАСТИЧНОСТІ ПОВЕРХНІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ ЗА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖУВАННЯ.....	246
Віталій Книш, д.т.н., проф.; Сергій Соловей, к.т.н., с.н.с.; Михайло Мальгін, к.т.н.; Володимир Мірянін, Андрій Кадишев	
ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА КОРОЗІЙНУ ВТОМУ ЗМІЦНЕНИХ ВИСОКОЧАСТОТНОЮ МЕХАНІЧНОЮ ПРОКОВКОЮ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 09Г2С...	249
Павло Ткач, к.т.н., доц.	
СИНУСОЇДАЛЬНЕ ЗАЧЕПЛЕННЯ З ПІДВИЩЕНОЮ ЗНОСОСТІЙКІСТЮ ЗУБЦІВ.....	253
Дмитро Часов, к.т.н., доц.; Всеволод Бейгул, к.т.н., доц.; Сергій Ващенко; Віктор Давидюк	
ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА-ЕКСТРУДЕРА.....	257
Павло Булах, к.т.н.; Олександр Масло, к.т.н.; Володимир Швець, к.т.н.; Віктор Ламашевський, к.т.н.	
ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ РОЗСІЯНИХ ПОШКОДЖЕНЬ В ТОНКОСТІННОМУ ЦИЛІНДРІ В УМОВАХ ДВОВІСНОГО ЦИКЛІЧНОГО РОЗТЯГУ.....	260
Борис Шелестовський, к.ф.-м.н., доц.; Тетяна Пиндус	
КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ШТАМПА, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ, З ІЗОТРОПНИМ ПРУЖНИМ ШАРОМ.....	263
Владислав Шостак, к.т.н.; Сергій Пашенко, к.т.н., доц.; Артем Шульгін, к.т.н., с.досл.; Володимир Харченко	
МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ.....	267
Микола Підгурський, д.т.н., професор, Микола Сташків, к.т.н., доцент, Іван Підгурський, к.т.н, доцент, Наталія Макаренко, д.т.н., професор	
ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ Т-ПОДІБНОГО З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТОНКОСТІННИХ ПРОФІЛЬНИХ ТРУБ	270
Секція: ПОКРИТТЯ, НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ	
Сергій Бись, к.т.н., доц.; Вадим Галкін	
ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПРУЖИННИХ КІЛЕЦЬ.....	274
Сергій Бись, к.т.н., доц.; Олександр Липка	
ВПЛИВ СТРУКТУРНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛУ НА ЙОГО ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА КОНСТРУКТИВНУ МІЦНІСТЬ.....	277
Роман Кідун; Микола Пасько; Ганна Лаптева, к.т.н.; Олег Биковський, д.т.н., проф.	
НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОДІВ РУДНОТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ.....	279
Л. Лопата, к.т.н., доц.; В. Калініченко к.т.н.; І. Качинська	
КОГЕЗІЙНА І АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ ЯК ПАРАМЕТРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОЇ ОБРОБКИ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ.....	283
Володимир Медвідь, к.т.н., доц.; Андрій Ремез; Микола Пошивак; Петро Микулик	
АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ТА ТОЧНОСТІ ОФСЕТНИХ АНТЕН В	

РАДІОКОМУНІКАЦІЯХ.....	286
Ігор Смирнов, д.т.н., проф.; Андрій Чорний, к.т.н., доц.; Ігор Селіверстов, к.т.н., доц.; Володимир Лисак, Ph.D.; Тимофій Сопленко	
ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В ПЛАЗМОВИХ УЩІЛЬНЮЮЧИХ ПОКРИТТЯХ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ.....	290
Олександр Трапезон, д.т.н., п.н.с.	
ПРОГНОЗУВАННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ЗМІЦНЮЮЧИМИ ПОКРИТТЯМИ.....	293
Сергій Щетинін, д.т.н., проф.; Віра Щетиніна, д.т.н., проф.	
МЕХАНІЗМ ВИНИКНЕННЯ ТРИЩИН ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ.....	295
 Секція: МЕХАТРОНІКА, РОБОТОТЕХНІКА, ДРОНИ	
Валерій Кирилович, д.т.н., проф.; Роман Шубенко; Любомир Дімітров, д.т.н., проф.; Микола Кирилович ¹	
НЕЧІТКИЙ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР АЛЬТЕРНАТИВ: АВТОМАТИЗОВАНА РЕАЛІЗАЦІЯ СЕРЕДИННОГО ВИПАДКУ.....	297
Дмитро Лещенко, д.ф.-м.н., проф.; Тетяна Козаченко, к.ф.-м.н., доц.	
ЕВОЛЮЦІЯ РУХІВ ТВЕРДОГО ТІЛА З ТОЧКОВОЮ МАСОЮ В СЕРЕДОВИЩІ З ОПОРОМ.....	301
Юрій Лещинин, к.т.н.; Нестор Романишин; Володимир Волоський; Ігор Голінський; Ілля Федорович	
ЕФЕКТИВНІСТЬ АЛГОРИТМІВ БАЛАНСУВАННЯ В СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ БАТАРЕЇ ДЛЯ ВБУДОВАНИХ ТА РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ.....	303
Борис Липа	
ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ТЕХНОЛОГІЯХ РОЙОВИХ ДРОНІВ.....	306
Павло Марущак, д.т.н., проф.; Володимир Медвідь, к.т.н., доц.; Олександр Шовкун	
МАЛОГАБАРИТНА УСТАНОВКА ДЛЯ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА УМОВ ОСВІТЛЕННЯ ПРИ КОНТРОЛІ ДЕФЕКТІВ МЕТАЛОПРОКАТУ.....	308
Роман Михайлишин, к.т.н.; Франтішек Духон, канд. Техн. Наук, проф.; Михайло Михайлишин, к.ф.-м.н., доц.; Міхал Келемен к.т.н., проф.; Джін Сяо, к.т.н., проф.; Енн Маєвич Фей, к.т.н., проф.	
ВПЛИВ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНВЕЄРНИХ СИСТЕМ НА ПРОЦЕС РОБОТОТЕХНІЧНОГО МАНІПУЛЮВАННЯ ГНУЧКИХ ОБ'ЄКТІВ.....	311
Сергій Фундигус; Ігор Коноваленко, к.т.н., доц.	
РОЗПІЗНАВАННЯ ДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНЕВІЙ СТРУКТУРІ ПОКРИВЛІ БУДІВЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДРОНІВ ТА ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	314
 Секція: ПРИКЛАДНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО	
В. Бобик	
МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКЛОПАКЕТУ.....	317
Діана Глушкова, д.т.н., проф.; Володимир Большаков, д.т.н., проф.; Людмила	

Бодрова, к.т.н., проф. ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ГАЗОТЕРМІЧНИМ НАПИЛЕННЯМ... Діана Глушкова, д.т.н., проф.; Володимир Большаков, д.т.н., проф., Валерій Лазарюк, к.т.н., доц.	319
СТАЛЕМОЛІБДЕНОВЕ ПОКРИТТЯ, НАНЕСЕНЕ ГАЗОТЕРМІЧНИМ СПОСОБОМ..... Ірина Воленко, к.т.н., доц.; Антон Зусін, к.т.н., доц.	321
ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛУ РОЗРОБЛЕНИМИ НАПЛАВНИМИ ДРОТАМИ З МЕТАСТАБІЛЬНИМ АУСТЕНІТОМ..... Діана Глушкова, д.т.н., проф.; Володимир Большаков, д.т.н., проф.; Галина Крамар, к.т.н., доц.	323
ІОННО-ПЛАЗМОВЕ НАПИЛЕННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПРЕС-ФОРМ..... Тарас Майданчук, к.т.н., с.досл.; Анатолій Бондаренко; Євгенія Лук'яненко; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Валентин Ілюшенко, Дмитро Степченко	326
ДЕЯКІ ПИТАННЯ ЗВАРЮВАНOSTІ МІДНО-НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ІЗ ВМІСТОМ НІКЕЛЮ ДО 6,0%..... Марія Паньків, к.т.н., доц.; Віктор Барановський, д.т.н., проф.; Віталій Паньків, к.т.н., доц.; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Г. Герасимчук, к.т.н., доц.	328
МОДЕЛЮВАННЯ ТАНГЕНЦІАЛЬНОЇ СИЛИ ПРУЖНОГО УДАРУ..... Володимир Гвоздецький, к.т.н., с.досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.; Олександра Студент, д.т.н., проф.; Христина Задорожна, к.т.н.; Олександр Лук'яненко, к.т.н.; Нестор Мозола	331
ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ, НАПИЛЕНИХ РІЗНОТИПНИМИ ДРОТАМИ..... Володимир Гвоздецький, к.т.н., с.досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.; Олександра Студент, д.т.н., проф.; Христина Задорожна, к.т.н.; Олександр Лук'яненко, к.т.н.; Нестор Мозола	334
ТОПОГРАФІЯ ПОВЕРХНІ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ РІЗНОГО СКЛАДУ І ЇЇ ВПЛИВ НА МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ..... В. Коржик, д.т.н., чл.кор.НАНУ; Петро Стухляк, д.т.н., проф.; О. Берднікова, д.т.н., с.н.с.; М. Долгов, д.т.н., проф.; А. Гринюк, к.т.н., н.с.; А. Бабич, к.т.н., н.с.; Олег Тотосько, к.т.н., доц.; Данило Стухляк, к.т.н., доц.; О. Дем'янов, к.т.н., с.н.с.	339
ВПЛИВ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗРАЗКІВ ІЗ СТАЛІ AISI 304 НА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ..... Олександр Іванов, Ph.D.; Павло Присяжнюк, к.т.н., доц., Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Людмила Бодрова, к.т.н., проф., Галина Крамар, к.т.н., доц.; Ігор Коваль, к.т.н., доц.	343
ТЕРМОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ Fe-Me-C-V..... Діана Глушкова, д.т.н., проф., Володимир Большаков, д.т.н., проф., Сергій Мариненко, к.т.н., доц.	346
ОПТИМІЗАЦІЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ..... Альона Середя, Роман Кравчук, к. т. н., с. н. с., Олег Каток, к. т. н., с. н. с., Микола Рудницький, к. т. н., с. н. с., Володимир Швець, к. т. н., с. н. с., Валерій Харченко I, академік НАН України	350
ВИЗНАЧЕННЯ ЗНЕВУГЛЕЦЬОВАНОГО ШАРУ ЛЕГОВАНИХ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРІВ ТВЕРДОСТІ.....	353

Секція: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.787.4

Роман Бица, к.т.н.; Володимир Семеген; Олег Крук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВЛАСТИВОСТІ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ ЯК ЗАСОБУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Анотація. Розглянуто переваги і недоліки формування поверхневих структур у вигляді регулярних мікрорельєфів для забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин. Встановлено напрями вдосконалення регулярних мікрорельєфів для усунення визначених недоліків.

Ключові слова: регулярний мікрорельєф, поверхня, експлуатаційні властивості, тип мікрорельєфу

Roman Bytsa, Ph.D.; Volodymyr Semehen; Oleh Kruk

PROPERTIES OF REGULAR MICRORELIEF AS A MEANS OF ENSURING THE OPERATIONAL PROPERTIES OF THE SURFACES OF MACHINE PARTS

Abstract. The advantages and disadvantages of the formation of surface structures in the form of regular microreliefs to ensure the operational properties of the working surfaces of machine parts are considered. The areas of improvement of regular microreliefs to eliminate identified shortcomings have been established.

Keywords: regular microrelief, surface, operational properties, type of microrelief

Термін експлуатації виробу зазвичай залежить від ресурсу найбільш навантажених пар тертя. Розрахунковий ресурс деталі забезпечується наданням її функціональній поверхні необхідних експлуатаційних властивостей. На даний час відома велика кількість методів забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин. До них відносяться хімічна, термічна, гальванічна, хіміко-термічна обробка, обробка поверхневим пластичним деформуванням, формування необхідної мікроструктури поверхні та інші методи. Значна частина цих методів є, в достатній мірі, дослідженими та фактично вичерпали можливості для вдосконалення. Разом з цим вони забезпечують необхідні параметри якості чи необхідні фізико-механічні властивості поверхні у заданому діапазоні значень. Досить дієвим є метод формування поверхневої мікроструктури поверхні, який дозволяє забезпечити покращені експлуатаційні властивості та є економічно більш привабливим.

Регулярний мікрорельєф – це штучно створені періодично повторювані елементи поверхні певної форми та геометричних параметрів, які створені на плоскій чи обертовій поверхні. Зазвичай регулярні мікрорельєфи створюють у вигляді канавок різної форми. Форма, розміри та взаємне розміщення канавок регулярних мікрорельєфів можуть бути різними та визначаються функціональним призначенням поверхні на якій вони створюються. Геометричні параметри регулярних мікрорельєфів регламентуються нормативним документом [1].

Область застосування регулярних мікрорельєфів доволі широка:

- деталі автомобілів (гільзи циліндрів двигунів внутрішнього згорання; конусні диски варіаторних трансмісій; робочі поверхні деталей трансмісій; інші деталі пар тертя);

- ріжучий інструмент (робочі поверхні ріжучих інструментів та швидкозмінні пластини ріжучих інструментів);
- медичні протези та обладнання (суглобів, зубних імплантів, медичних інструментів та обладнання);
- деталі машин, що працюють в агресивних середовищах (пластини кислотних акумуляторних батарей);
- поверхні, що потребують гідрофобних властивостей.

Більшість наукових праць в цій галузі знань спрямовані на пошук залежності між геометричними характеристиками канавок мікрорельєфу та експлуатаційними властивостями поверхні на якій вони сформовані [2, 3, 4, 5].

Загальною характеристикою регулярних мікрорельєфів I, I, III типів, що створюються на плоских та обертових поверхнях можна назвати однакову глибину заглиблення канавок мікрорельєфу у поверхню матеріалу на якій вони створені. Наслідком такої геометрії канавок мікрорельєфу є те, що в процесі експлуатації поверхні і, як наслідок, її зношування, глибина канавок змінюється (зменшується) рівномірно на всій площині, що призводить до зміни експлуатаційних властивостей, зокрема зменшення здатності поверхні утримувати масляну плівку.

Відомі типи мікрорельєфів створюються на плоских чи обертових поверхнях. При цьому глибина канавок мікрорельєфу є незмінною, а профіль мікрорельєфу визначається формою осі канавки у площині паралельній до тієї на якій створюється мікрорельєф. Ця вісь може бути у вигляді синусоїди, трикутника та інших геометричних фігур. Враховуючи вищевикладене доцільно називати такі типи мікрорельєфів площинними.

Така будова мікрорельєфів дозволяє створювати поверхневі мікроструктури з різною відносною площею. Відносна площа мікрорельєфу – це відношення площі канавок мікрорельєфу до площі поверхні на якій вони створені. Створюючи мікрорельєфи з різною відносною площею можна фактично забезпечувати необхідні для певних умов експлуатації експлуатаційні властивості поверхні.

Створення регулярних чи частково регулярних мікрорельєфів як методу забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей машин має ряд переваг і недоліків.

Переваги площинних типів регулярних мікрорельєфів

1. Однорідність властивостей поверхні із сформованими регулярними мікрорельєфами.

2. Можливість утримувати масляну плівку більшого об'єму.

3. Збільшений опір захопленню при важких умовах експлуатації.

4. Зменшене значення коефіцієнта тертя ковзання спряжених поверхонь.

Недоліки площинних типів регулярних мікрорельєфів

1. Складність форми канавки мікрорельєфу призводить до складності технологічного процесу його формування.

2. Неможливість сформувати мікрорельєфи із відносною площею канавок мікрорельєфу близькою до 100%.

3. Складність забезпечення регулярності мікрорельєфу. При створенні мікрорельєфу на значних площах спостерігається порушення регулярності канавок мікрорельєфу.

4. Неоднорідна мікротвердість поверхні у канавках мікрорельєфу та поза ними.

5. Неоднорідна шорсткість поверхні у канавках мікрорельєфу та поза ними.

Створення на робочих поверхнях деталей машин регулярних мікрорельєфів може покращити експлуатаційні властивості поверхні протягом заданого періоду експлуатації. Однак для керування процесом забезпечення експлуатаційних

властивостей у широкому діапазоні значень необхідно здійснювати пошук нових видів регулярних мікрорельєфів. Такими новими формами мікрорельєфів можуть бути поверхневі структури утворені у вигляді циклоїди, трохоїди, та інших трансцендентних кривих, що описуються параметричними рівняннями [6]. Такі мікрорельєфи володіють рядом переваг, найсуттєвішою з яких є те, що технологія їх створення є набагато продуктивнішою, однак вимагає попереднього складного розрахунку та налаштування.

Разом з цим, перспективним є напрямок пошуку технічних рішень, які б забезпечували однакові (стабільні) експлуатаційні властивості поверхні протягом усього періоду експлуатації виробу, або властивості, які б дозволяли адаптуватись під умови експлуатації. Цього можна досягнути створивши нові типи мікрорельєфів із розширеними технологічними властивостями. До таких властивостей відносять підвищену гідрофобність та капілярність при настанні певних умов, збільшення за визначеними законами збільшення опорної площі та інші.

Перелік посилань

1. ISO 21920-2. GPS - Surface texture: Profile method - Part 2 - Terms, definitions and surface texture parameters.
2. Hurey, I., Hurey, T., Gurey, V. (2020). Wear Resistance of Hardened Nanocrystalline Structures in the Course of Friction of Steel-Grey Cast Iron Pair in Oil-Abrasive Medium. In: Ivanov, V., et al. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_57
3. Wu W, Chen G, Fan B, Liu J (2016) Effect of Groove Surface Texture on Tribological Characteristics and Energy Consumption under High Temperature Friction. PLoS ONE 11(4): e0152100. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152100>
4. Zhang, Y., Zeng, L., Wu, Z., Ding, X. and Chen, K. (2019), Synergy of surface textures on a hydraulic cylinder piston. Micro Nano Lett., 14: 424-429. <https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5535>
5. Nagit G., Slatineanu L., Dodun O., Ripanu M., Mihalache A. (2019). Surface layer microhardness and roughness after applying a vibroburnishing process. Journal of Materials Research and Technology. 8. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.044>
6. Dzyura, V., Maruschak, P., Semehen, V., Kruk O., Gurey V. Analysis of Causes that Lead to Failure of Conical Discs of Variable Automatic Transmissions. J Fail. Anal. and Preven. (2024). <https://doi.org/10.1007/s11668-024-01912-y>
7. Swirad, S. Influence of Ball Burnishing on Lubricated Fretting of the Titanium Alloy Ti6Al4V. Lubricants 2023, 11, 341. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080341>
8. Wu W, Chen G, Fan B, Liu J (2016) Effect of Groove Surface Texture on Tribological Characteristics and Energy Consumption under High Temperature Friction. PLoS ONE 11(4): e0152100. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152100>
9. Slavov, S.; Van, L.S.B.; Dimitrov, D.; Nikolov, B. An Approach for 3D Modeling of the Regular Relief Surface Topography Formed by a Ball Burnishing Process Using 2D Images and Measured Profilograms. Sensors 2023, 23, 5801. <https://doi.org/10.3390/s23135801>

УДК 621.01:681.31

Василь Васильків, д.т.н., проф.; Олександр Корнєв; Назарій Маковинський
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна;

ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ І ШНЕКОВИХ ЗАГОТОВОК

Анотація. У роботі розроблено методику опису технологічного процесу виготовлення гвинтових і шнекових заготовок. У ній ТП подано у вигляді ієрархічної структури за допомогою структурних формул на основі мереж Петрі, у якій операція і технологічний перехід є переходом мережі Петрі, а отримані проміжні заготовки – станом згаданої мережі. Технологічну операцію виготовлення проміжної заготовки у структурі ТП представлено як процес змінний у часі.

Ключові слова: гвинтова заготовка, шнекова заготовка, технологічний процес.

Vasyl Vasylykiv, Ph.D., Prof.; Oleksandr Korniev; Nazarii Makovynskyi

DESCRIPTION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING SCREW FLIGHTS AND AUGER BLANKS

Abstract. The paper develops a method for describing the technological process of manufacturing screw flights and auger blanks. In this method, the technological process is presented as a hierarchical structure using structural formulas based on Petri nets, where an operation and technological transition are represented as a transition in the Petri net, and the obtained intermediate blanks are the states of the mentioned net. The technological operation of manufacturing an intermediate blank in the structure of the technological process is represented as a process that changes over time.

Keywords: helical flight, auger billet, technological process.

У сучасному виробництві існує потреба у застосуванні малогабаритних високопродуктивних шнекових транспортерів. Гвинтові робочі органи таких транспортерів часто виконують складеними із секційних елементів, які мають складну геометричну форму. Це зумовлено широкими можливостями зміни довжини шнекового робочого органу та заміни спрацьованих елементів. Такі елементи шнека отримують зі шнекових заготовок (ШЗ). У свою чергу технологічний процес (ТП) виготовлення згаданих заготовок відзначається складністю та працемісткістю. Для підвищення ефективності виготовлення згаданих виробів існує необхідність в оптимізації структури ТП. Для цього необхідно розробити його математичну модель. У роботі [1] описано методику опису ТП у формі ієрархічної структури за допомогою структурних формул на основі мереж Петрі, у якій операція і технологічний перехід є переходом мережі Петрі, а отримані проміжні заготовки – станом згаданої мережі. Тобто технологічну операцію виготовлення заготовки розглянуто як процес змінний у часі. Кодове позначення елемента ієрархічної структури є таким

$$\tilde{A} = \zeta J_i^j \Omega_s^k, \quad (1)$$

де ζ – позначення типу об'єкту, який ідентифікують такими позначеннями: Z – заготовка, A – технологічна операція, B – технологічне устаткування, O – структурний елемент операції, який змінний в часі, тобто (технологічний перехід, допоміжний перехід, установ, позиція, допоміжний хід, прийом) тощо; J – номер ієрархічного рівня атомарного елемента; i – позначення номера варіанта виконання атомарного елемента; Ω – номер ієрархічного рівня блочного елемента, у склад якого входить атомарний елемент; s – позначення альтернативи блочного елемента; j і k – відповідно номери груп ієрархічних рівнів у яких розміщені атомарний і блочний елементи ієрархії.

За такою методикою елемент структури ТП виготовлення ГЗ і ШЗ нами представлено у вигляді графу, зображеного на рис. 1, а опис його елементів – у табл. 1.

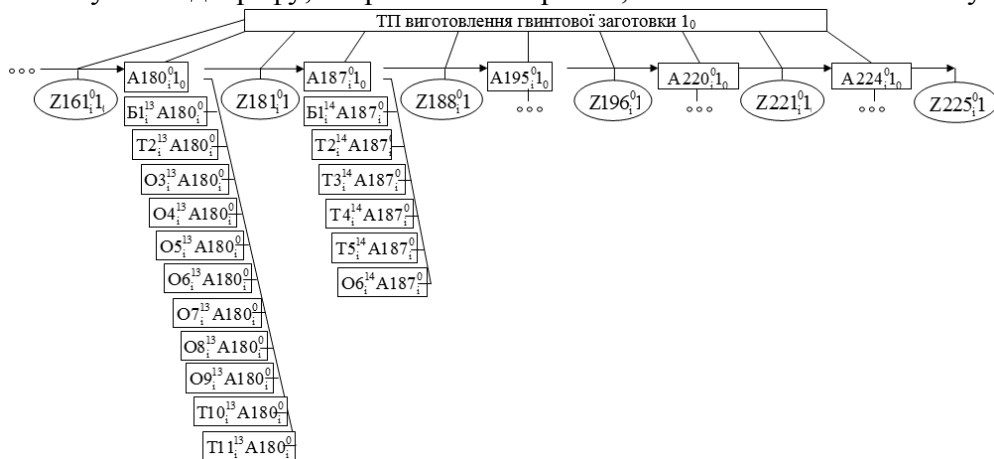


Рис. 1 Фрагмент графу структури ТП

Таблиця 1 – Фрагмент структури ТП виготовлення ГЗ і ШЗ

Позначення	Зміст елемента
Z161 _{i1} ⁰	Кільцева секторна заготовка нагріта
A180 _{i10} ⁰	Формування секційної спіралі (гвинтової заготовки (ГЗ))
B1 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Прес 6334
T2 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Штмп 1651-4167
O3 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Встановлення заготовки на прес в штампі
O4 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Вмикання пресу. Вмикання дворучне.
O5 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Формування заготовки в необхідні розміри
O6 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Витримування заготовки в штампі
O7 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Знімання заготовки і розміщення в тарі
O8 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Очищення штампу від окалини стиснутим повітрям
O9 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Перевірка розмірів
T10 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Лінійка 1000 ГОСТ 427-80
T11 _{i13} ¹³ A180 _i ⁰	Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 16680
Z181 _{i1} ⁰	Отримана секційна (одновиткова) гвинтова заготовка
A187 _{i10} ⁰	Зачищування спіралі
B1 _{i14} ¹⁴ A187 _i ⁰	Верстак
T2 _{i14} ¹⁴ A187 _i ⁰	Шліфувальна машина 3883210000 3А-382
T3 _{i14} ¹⁴ A187 _i ⁰	Тара 1459-2200000
T4 _{i14} ¹⁴ A187 _i ⁰	Навушники ВЦННІОТ-4А ТУ 400-28127-76
T5 _{i14} ¹⁴ A187 _i ⁰	Респіратор «Сніжок-П» ТУ 84-1013-84
O6 _{i14} ¹⁴ A187 _i ⁰	Зачищення заусениць на крайках витків гвинтової спіралі
Z188 _{i1} ⁰	Гвинтова заготовка зачищена
A195 _{i10} ⁰	Здійснення приймального контролю
B1 _{i14} ¹⁴ A195 _i ⁰	Стіл Пр. 1466
Z196 _{i1} ⁰	Заготовка проконтрольована
A220 _{i10} ⁰	Формування багатовиткової ГЗ із відкритою навивкою витків
Z221 _{i1} ⁰	Багатовиткова ГЗ із відкритою навивкою
A224 _{i10} ⁰	Складання: закріплення ГЗ на валу
Z225 _{i1} ⁰	Отримана шнекова заготовка

Перелік посилань

1. Васильків В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 05.02.08. Львів, 2015. 48 с.

УДК 631.356.2

Максим Гадайчук

Вінницький національний агротехнічний університет, Україна

КОМБІНОВАНИЙ КОПАЧ КОРЕНЕПЛОДІВ ЦИКОРІЮ

Анотація. Коренеплоди цикорію – важлива технічна культура агропромислової та переробної галузі України. Зниження виробництва коренеплодів є наслідком відсутності ефективної збиральної техніки, робочі органи якої не задовольняють необхідні показники якості викопування – втрати та пошкодження коренеплодів перевищують встановлені агротехнічні вимоги до процесу роботи коренезбиральних машин. Для підвищення показників якості нами запропоновано удосконалений комбінований копач коренеплодів цикорію, застосування якого дозволить зменшити втрати та пошкодження коренеплодів. Основними робочими органами комбінованого копача є односторонній сферичний диск, який встановлено відносно осі рядка коренеплодів під кутом атаки та розміщений за ним розрихлювач. Глибина ходу розрихлювача, який виконано підпружиненим більше глибини ходу сферичного диска. Ключові слова: коренеплоди цикорію, копач, сферичний диск, розрихлювач, пружина.

Maksym Hadaichuk

COMBINED CHICORY ROOT CROP DIGGERS

Abstract. Chicory roots are an important technical crop of the agro-industrial and processing industry of Ukraine. The decrease in the production of root crops is a consequence of the lack of effective harvesting equipment, the working bodies of which do not meet the necessary indicators of the quality of digging - the loss and damage of root crops exceed the established agrotechnical requirements for the operation of root harvesting machines. To improve quality indicators, we have proposed an improved combined chicory root digger, the use of which will reduce losses and damage to root crops. The main working organs of the combined digger are a one-sided spherical disk, which is installed relative to the axis of the row of root crops at an angle of attack, and a loosener is placed behind it. The stroke depth of the loosener, which is made spring-loaded, is greater than the stroke depth of the spherical disk. Keywords: chicory roots, digger, spherical disc, loosener, spring.

Цикорій кореневий – цінна лікарська, харчова, технічна та кормова культура, виробництво якої є провідною та традиційною провідною галуззю агропромислового комплексу України [1]. Існуючі технічні засоби збирання коренеплодів цикорію кореневого, а саме підкопування коренеплодів підіймачами СНУ-3С з наступним ручним їх витягуванням з ґрунту, очищення від налиплого ґрунту та гички, складання коренеплодів у валки з наступним підбиранням валка навантажувачами не забезпечує річної окупності затрат праці на збирання цикорію, які становлять у середньому 90...150 люд.год/га, або близько 50 % всіх затрат праці. Це суттєво впливає на техніко-економічні показники виробництва цикорію [2].

Механізоване роздільне збирання застарілими комплексами бурякозбиральних машин призводить до значних втрат коренів цикорію, які становлять 45...60 (%) і незадовільних показників якості очищення коренеплодів від домішок (12...18 %) залежно від типу ґрунту та кліматичних умов [3].

Для доробки сировини до необхідної кондиції для її переробки застосовують ручну працю, а від показників якості виконання технологічного процесу викопування коренеплодів в значній мірі залежать техніко-експлуатаційні та в кінцевому результаті економічні показники виробництва даної продукції рослинництва.

Використання існуючих технічних засобів, призначених для збирання коренеплодів цикорію та застосування ручної праці на окремих технологічних операціях збирання коренеплодів, що характерно для колективних і фермерських господарств, значно збільшує використання енергоресурсів та суттєво знижує рентабельність умов господарювання.

Недоліками відомих пристроїв, які призначені для механізованого викопування коренеплодів цикорію, є значні пошкодження та втрати коренеплодів під час їх викопування внаслідок зламу підземної хвостової частини за рахунок неналежної глибини ходу робочих органів [4].

Розробка та обґрунтування параметрів робочих органів, перш за все для викопування коренеплодів з мінімальними втратами цикорію призведе до зростання економічних та техніко-експлуатаційних показників і значного підвищення ефективності виробництва продукції в цілому.

Для підвищення технологічної ефективності процесу збирання коренеплодів цикорію нами запропоновано технічний засіб для викопування коренеплодів (рис. 1), який дозволить підвищити повноту викопування коренеплодів і зменшити їх пошкодження за рахунок інтенсифікації процесу руйнування навколоплідного середовища та виникнення додаткових динамічних ефектів, які забезпечують збільшення сили виштовхування коренеплодів з ґрунту.

Комбінований робочий орган для викопування коренеплодів цикорію складається з одностороннього сферичного диска 2, який відносно рядка коренеплодів розташований під певним кутом. Диск вільно посаджений на вісь 3 обертання диска, яку змонтовано в стояку (на рис. 1 не показано), жорстко закріпленому на рамі 9 копача. Також на стояку змонтовано кронштейн 5.

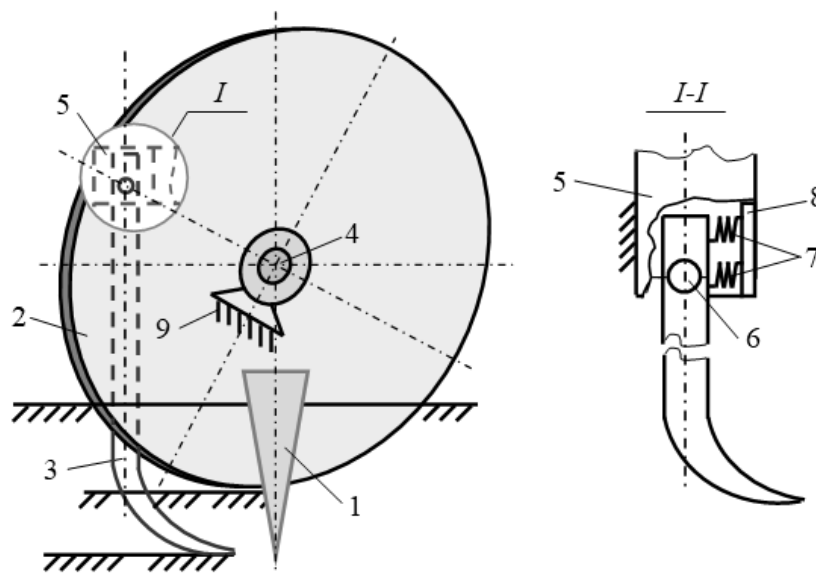


Рисунок 1. Конструктивна схема комбінованого копача: 1 – коренеплід; 2 – сферичний диск; 3 – розрихлювач; 4 – вісь обертання диска; 5 – кронштейн кріплення розрихлювача; 6 – вісь повороту розрихлювача; 7 – пружина; 8 – упорна пластина; 9 – рама

Кронштейн 5 має можливість переміщувати вздовж стояка та фіксуватися на ньому за допомогою фіксуючих пари болт-гайка. У кронштейні встановлено вісь 6, на яку посаджено розрихлювач 3. За допомогою пружин 7, які одним кінцем зв'язані з розрихлювачем, а другим кінцем упираються в упорну пластину 8, стояк розрихлювача виконаний підпружиненим.

Під час руху комбінованого копача по рядкам коренеплодів цикорію, розрихлювач 3 та сферичний диск 2 руйнують навколоплідне ґрунтове середовище та зв'язки залягання коренеплоду в ньому за рахунок обертання сферичного диска з кутовою швидкістю $\omega_\delta = d\vartheta_\delta / dt$ та руху розрихлювача (тобто диска) з поступальною швидкістю ϑ_δ . При цьому відбувається таке явище (процес), як переміщення викопаного ґрунтового шару по сферичній поверхні диска та, відповідно, його подальше переміщення на наступні робочі органи коренезбиральної машини.

Дослідження цього процесу є важливою науковою задачею в плані забезпечення мінімізації подачі ґрунтових домішок сферичним диском на наступні робочі органи коренезбиральної машини під час викопування ним коренеплодів цикорію.

Мінімізація подачі ґрунтових домішок може досягатися шляхом дослідження динамічних процесів, які виникають під час руху копача по рядкам коренеплодів і, відповідно, розробки математичної моделі, яка описує взаємозв'язок технологічних і конструктивно-кінематичних параметрів процесу переміщення копача в ґрунтовому середовищі.

Процес переміщення викопаного ґрунтового шару по сферичній поверхні під час викопування коренеплодів цикорію сферичним диском розглянемо згідно складеної схеми, яку наведено на рис. 2.

Основними параметрами сферичного диска є: діаметр сфери D_c , м; радіус диска R_δ , м; глибина ходу диска h_δ , м; кут атаки диска α , град.; кут нахилу диска до горизонту ε , град.

При розгляді процесу переміщення ґрунтового шару по сферичній поверхні диска під час викопування коренеплодів цикорію доцільно вибрану систему координат $Oxyz$ розташовувати так, щоб вся система координат $Oxyz$ переміщувалася одночасно з сферичним диском з постійною швидкістю руху ϑ_δ (швидкість руху диска, м/с) відносно поверхні ґрунту, а викопаний ґрунт падав на сферичний диск з постійною швидкістю $\vartheta = const$, м/с.

Для забезпечення умови $\vartheta = const$ за початок відліку системи координат $Oxyz$ приймаємо точку O , або точку яка співпадає з центром сфери. Вісь Ox направимо в глибину ґрунту перпендикулярно його поверхні. Вісь Oy спрямуємо так, щоб радіус-вектор центра диска E , або осі обертання диска належав площині xOy . Вісь Oz направимо перпендикулярно осі Ox та осі Oy , або перпендикулярно площині рис. 2.

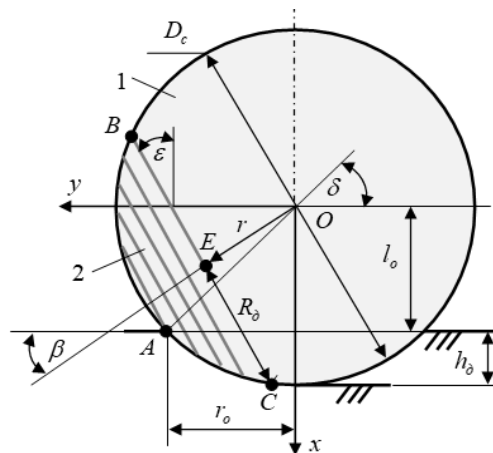


Рисунок 2. Схема для розрахунку динамічної взаємодії сферичного диска з шаром ґрунту: 1 – сфера; 2 – сферичний диск

Крім того, на схемі рис. 2 позначено: $r = 2\sqrt{R_c^2 - 4R_o^2}$ – відстань до центра диска від центра сфери, або модуль вектора $|\vec{r}|$, м; l_o – відстань від центра O сфери 1 до поверхні ґрунту, м; r_o – радіус кривини точки дотику A поверхні ґрунту та диска, $r_o = 2\sqrt{R_c^2 - 4l_o^2}$, м; δ – кут між радіусом-вектором точки дотику B диска до поверхні ґрунту (в площині xOy) та віссю Oy , рад.: $\sin \delta = 2l_o / D_c$; $\cos \delta = 2r_o / D_c$; β – кут нахилу осі диска, або вектора \vec{r} відносно осі Oy , град.

При цьому: $h_o = R_o \cos \beta + r \sin \beta - l_o$; вектор швидкості \vec{g} має компоненти $\vec{g}_x = 0$, $\vec{g}_y = \vec{g}_n \sin \alpha$, $\vec{g}_z = -\vec{g}_n \cos \alpha$, м/с.

Масу ґрунту m_z , який падає на диск визначається за відомою формулою $m_z = \rho_z V_z$, де ρ_z – питома маса (щільність) ґрунту, кг/м³; V_z – об'єм ґрунту, який падає на диск, м³. Об'єм ґрунту V_z , який падає на диск можна визначити, врахувавши при цьому площу диска S_o на яку падає ґрунт та одиничний вектор \vec{n} , який визначає миттєве значення товщини шару ґрунту, який падає на диск, або $V_z = \int_{S_o} n dS_o$.

Тоді середня сила реакції N_o буде визначатися за формулою

$$N_o = - \int_{S_o} \rho_g \vec{g}_n (\vec{g} \times \vec{n}) n dS_o, \quad (1)$$

де \vec{n} – одиничний вектор, який направлений у точку контакту (падіння) шару ґрунту на диск.

Рішення інтегрального виразу (1) відносно осей системи координат $Oxyz$ матиме вигляд

$$\left. \begin{aligned} N_{xo} &= -2\rho_z \vec{g}_n^2 R_o^2 \theta_1 \sin \alpha; \\ N_{yo} &= -\rho_z \vec{g}_n^2 R_o^2 (\theta_o + \theta_2) \sin \alpha; \\ N_{zo} &= -\rho_z \vec{g}_n^2 R_o^2 (\theta_o - \theta_2) \cos \alpha \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де N_{xo} , N_{yo} , N_{zo} – середня сила реакції диска на падаючий шар ґрунту, яка діє, відповідно по осі Ox , Oy , Oz , Н.

Таким чином, застосування розрихлювача дозволяє підвищити технологічну надійність процесу викопування коренеплодів, що призводить до зменшення зламу підземної хвостової частини коренеплодів, або зменшення пошкодження та втрат коренеплодів.

Перелік посилань

1. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник; за ред. Д. Г. Войтюка / Д. Г. Войтюк, В. М. Барановський, В. М. Булгаков та ін. К.: Вища освіта, 2005. 464 с.

2. Барановський В. М. Результати теоретично-експериментальних досліджень секундної подачі вороху коренеплодів. Механізація сільськогосподарського виробництва. 2008. Т. 1. С. 111–120.

3. Baranovsky V., Truhanska O. Pankiv M., Bandura V. Research of a contact impact of a root crop with a screw auger. Research in Agricultural Engineering, 2020. Vol. 66. No 1. P. 33–42.

4. Baranovsky V. M., Skalsky O. J., Pankiv M. R., Pastushenko A. S. Chicory root crops combined harvester. INMATEH – Agricultural Engineering. Vol. 53. No 3. P. 41–50.

УДК 539.3

Надія Гашчин, к.т.н., доц.; Галина Семенишин

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

НАГРІВАННЯ КІЛЬЦЕВОГО ДИСКА З ТЕРМІЧНИМ ЕКРАНУВАННЯМ ТОРЦІВ

Анотація. Отримано розв'язок задачі нагрівання кільцевого диска з термічно екранованими торцями із оптимальною потужністю теплових джерел.

Ключові слова: кільцевий диск, нагрівання, екранування, оптимізація.

Nadiia Gashchyn, Ph.D, Assoc. Prof.; Halyna Semenishyn

RING DISC HEATING WITH THERMAL SHIELDING OF THE ENDS

Abstract. The solution to the problem of heating a ring disk with thermally shielded ends with the optimal power of heat sources was obtained.

Keywords: ring disk, heating, shielding, optimization.

Одним із перспективних напрямків у процесі складання машин і механізмів є використання з'єднань із натягом. Для автоматизації складання найчастіше використовують пресовий та термічний способи. При складанні габаритних деталей з метою уникнення пошкоджень при посадці віддають перевагу термічному з'єднанню, що здешевлює процес за рахунок меншої вартості обладнання.

З метою подальшого підвищення ефективності процесу нагрівання і, відповідно, зменшення вартості, необхідно застосовувати додаткові заходи, до яких належить теплове екранування відкритих поверхонь, які не беруть участі у процесі.

У дослідженні розглядається нагрівання кільцевого диска по його поверхнях за допомогою змінної в часі теплової потужності джерел. Дослідження, наведені у роботі [1], розглядають нагрівання аналогічного диска без екранування відкритих поверхонь (внутрішнього та зовнішнього торців диска), що є недостатньо ефективним з точки зору економії енергії, при чому за рахунок цих втрат напруження всередині диска при посадці мають дещо більше значення за рахунок нерівномірності його нагріву. Проте, як видно із [1], загальна тенденція зміни енергії у часі є експоненціальною

$$W(t) = W_0 e^{\frac{\alpha}{c\rho h}t}$$

Внаслідок цього одержимо рівняння балансу потужності у вигляді:

$$2c\rho Sh \frac{dT}{dt} + 2\alpha ST = W_0 e^{\frac{\alpha}{c\rho h}t}, \quad (1)$$

в якому $2S$ - повна площа поверхонь диска, α - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні, c - питома теплоємність матеріалу, ρ - густина матеріалу, h - товщина диска, t - біжучий час, W_0 - постійна, яка рівна потужності в початковий момент часу, знаходження якої і є метою цього дослідження, .

Перший доданок рівняння (1) описує потужність, яка необхідна на нагрівання диска, як масивного тіла, другий визначає потужність, яка втрачається на випромінювання з його поверхні, у правій частині записана потужність джерела теплової енергії.

Розв'язок диференціального рівняння (1), з врахуванням початкової умови $T(t=0) = 0$, має вигляд

$$T = \frac{W_0}{2S\alpha} \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha}{c\rho h}t\right). \quad (2)$$

Кінцева температура, при якій одержимо необхідне переміщення u_0 при $t = \tau$, на внутрішньому радіусі R_1 може бути прийнята з [1] такою

$$T = \frac{u_0}{R_1\alpha_T}, \quad (3)$$

де α_T - коефіцієнт лінійного розширення матеріалу диска.

Підставляючи необхідне значення температури (3) в (2) при $t = \tau$ одержимо розрахункове значення коефіцієнта потужності

$$W_0 = \frac{2u_0S\alpha}{R_1\alpha_T \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha\tau}{c\rho h}\right)}. \quad (4)$$

Тоді формули для знаходження теплової потужності джерел енергії і усередненої по товщині температури диска визначаються таким чином

$$W = \frac{2u_0S\alpha}{R_1\alpha_T \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha\tau}{c\rho h}\right)} e^{\frac{\alpha}{c\rho h}t}, \quad (5)$$

$$T = \frac{u_0}{R_1\alpha_T \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha\tau}{c\rho h}\right)} \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha}{c\rho h}t\right). \quad (6)$$

Формули (5) і (6) визначають потужність і температуру, які необхідні для створення на внутрішньому контурі диска заданого натягу $2u_0$. Вони можуть бути використані для розрахунку інженерної (виробничої) методики для технологічного процесу нагрівання кільцевого диска з метою посадки з відповідним розрахунковим натягом при мінімальних енергетичних затратах.

Числові результати, визначені за формулами (5) і (6), які відповідають методиці інженерного розрахунку, з достатньою для практики точністю співпадають з величинами потужності та температури, обчисленими за формулами [1] при умові теплоізоляції торцевих поверхонь ($k = 0$ у граничній умові).

Побудований інженерний розв'язок задачі про знаходження оптимальної потужності та температури, необхідної для посадки диска на круглий вал, достатньо точно описує процес термопосадки диска з металічного матеріалу, в якому для збільшення точності виконання технології торці термоізовані.

Перелік посилань

1. Шаблій О.М., Гащин Н.Б. Оптимізація посадки кільцевого диска на круглий вал // Вісник ТДТУ.- 2001. -Том 6. № 2. - С. 5-11.

УДК 620.9

Юрій Гладь, к.т.н., доц.; Надія Крива

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Анотація. Проведене числове дослідження електричних і теплових параметрів індукційної опалювальної установки.

Ключові слова: індукційний нагрів, теплові джерела, оптимальні параметри.

Yurii Hlado, Ph.D, Assoc. Prof.; Nadija Kryva

NUMERICAL STUDY OF INDUCTION HEATING PROCESSES

Abstract. A numerical study of the electrical and thermal parameters of the induction heating installation was carried out.

Keywords: induction heating, heat sources, optimal parameters.

Теоретичні дослідження теплових та електричних параметрів нагрівальних опалювальних установок, що розглядаються у [1, 2], потребують числового моделювання з метою досягнення раціональних конструктивних та енергетичних показників вказаних опалювальних установок.

Вважатимемо, що вся енергія, яка виділяється у сталевій частині передається до рухомого теплоносія (води). Втрати тепла у навколишнє середовище знехтуємо, вважатимемо, що теплоізоляція є достатньою.

При опаленні приміщень температура води на вході до установки з часом підвищиться та стабілізується на певному рівні, такому, що втрати енергії на опалення та на нагрівання теплоносія стануть рівними між собою. В цьому випадку важливим є забезпечення циркуляції теплоносія із швидкістю, достатньою для його нагрівання до безпечного рівня.

Дослідимо залежність показників ефективності роботи нагрівальної індукційної установки від конструктивних параметрів індуктора. Основні конструктивні параметри, які аналізувались - це діаметр та висота осердя установки, а також діаметр дроту, яким виконана обмотка.

Для проведення аналізу за допомогою програми обчислимо залежності потужності, коефіцієнта корисної дії та індукції у нагрівальній установці та побудуємо відповідні графіки.

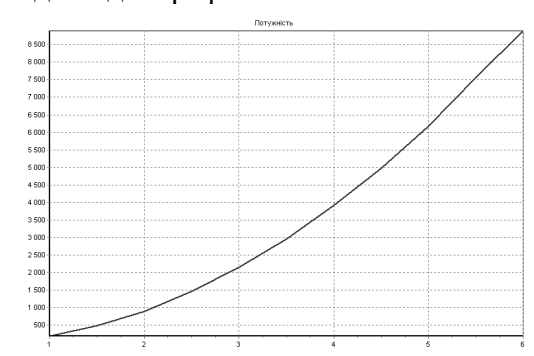


Рис. 1 Графік потужності, яку розвиває індуктор, в залежності від діаметра дроту.

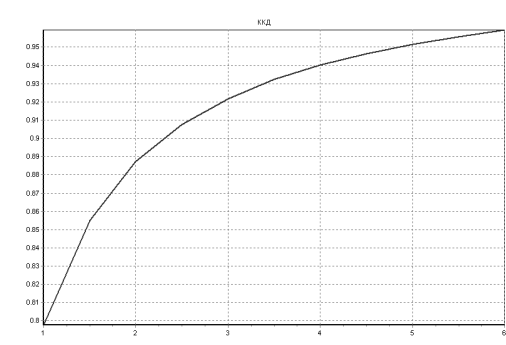


Рис. 2 Графік к.к.д. індуктора в залежності від діаметра дроту.

Аналіз графіків на рис. 1 і рис. 2 показує, що збільшення діаметра мідного дроту, яким навита обмотка індуктора, призводить до збільшення потужності нагріву практично у квадратичній залежності. Це пояснюється тим, що із збільшенням діаметра дроту зменшується кількість витків, і відповідно, індуктивність, що призводить до суттєвого збільшення струму. Занадто велике зменшення витків спричиняє перевантаження по намагніченню, матеріал заходить у глибоке насичення, а тому потрібно обмежитись таким значенням індукції, щоб воно не перевищувало допустимого, приблизно 0,5 - 1,0 Тл.

Коефіцієнт корисної дії із зменшенням діаметра дроту суттєво погіршується, що пов'язано в першу чергу із значним зростанням опору намотки, як відомо у залежності четвертого степеня від діаметра дроту при тому ж об'ємі намотки

$$R = \rho \frac{V}{\pi^2 r^4}.$$

При цьому значне збільшення індуктивності внаслідок суттєвого збільшення витків сприяє значному зменшенню струму та, відповідно, зменшенню індукції. Такий режим роботи не бажаний, бо зменшення к.к.д. і загальної потужності суттєво погіршує техніко-економічні показники установки, тобто вона недовикористовується по потужності.

Отже, існує певна оптимальна межа для вибору діаметра дроту в залежності від проектної потужності нагрівача. Як збільшення, так і зменшення його діаметра негативно впливають на загальну роботу установки.

Проведемо аналіз залежності параметрів індукційного нагрівача від зміни діаметра осердя індуктора.

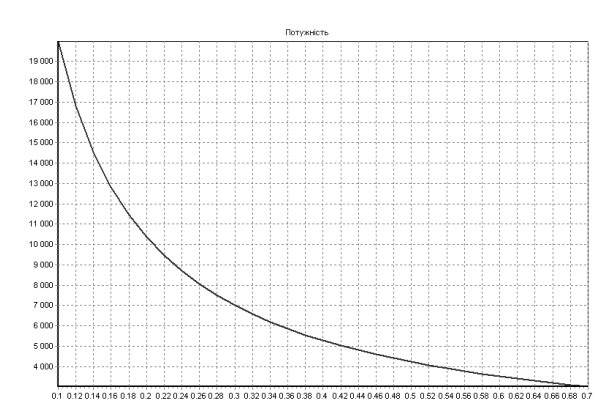


Рис. 3 Графік залежності потужності, яку розвиває індуктор, від його діаметра.

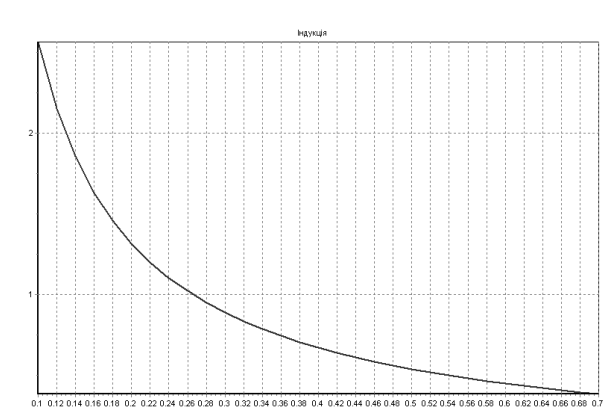


Рис. 4 Графік залежності індукції в індукторі від його діаметра.

На рис. 3 і 4 зображено зміну потужності та рівня індукції у досліджуваному індукторі в залежності від його діаметра. Як видно, збільшення діаметра індуктора суттєво зменшує як потужність, що розвиває установка, так і рівень індукції в ній. Це очевидно, тому що збільшення діаметра приводить до збільшення індуктивності індуктора і зменшення струму в ньому, а це напряду впливає на зменшення потужності установки. Виходячи із допустимого рівня магнітної індукції необхідно добирати геометрію індуктора, тобто його діаметр та висоту.

Доцільно, також, проаналізувати залежність потужності та індукції в установці нагрівача від зміни висоти осердя індуктора. Відповідні графічні залежності зображені на рис. 5 і 6.

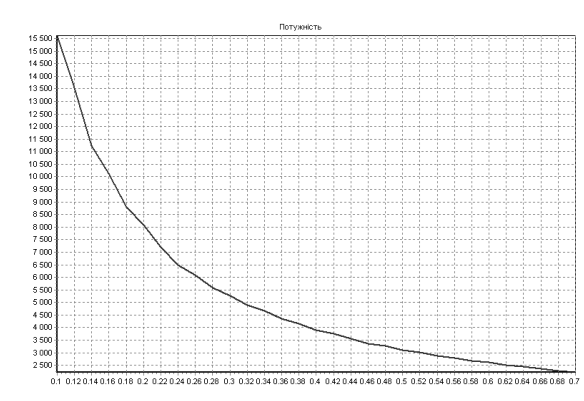


Рис. 5 Графік залежності потужності, яку розвиває індуктор, від висоти осердя.

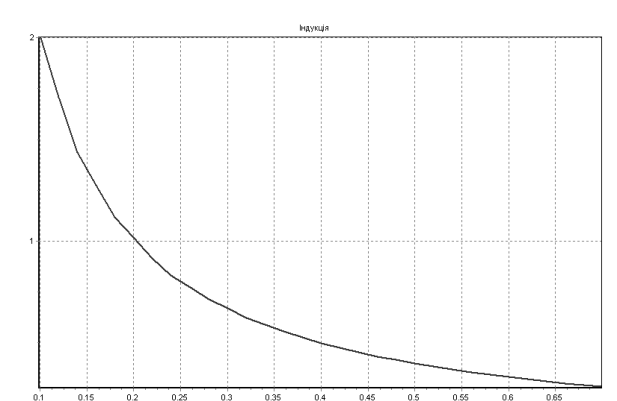


Рис. 6 Графік залежності індукції в індукторі від висоти осердя.

Аналіз графіків рис. 5 і 6 подібний до попереднього. Залежності можна пояснити аналогічно, як і для зміни діаметра. Збільшення висоти збільшує кількість витків обмотки, що призводить до збільшення індуктивності та опору обмотки. Це призводить до зменшення потужності та рівня індукції. Проте к.к.д. є майже не залежним від висоти індуктора.

Аналіз характеристик роботи нагрівача, його потужності, к.к.д. та індукції показує, що шляхом зміни конструктивних параметрів можемо досягти певних раціональних показників його роботи.

Необхідно обирати таке співвідношення діаметра і висоти індуктора, щоб виконати умови конструктивного існування нагрівача, технології виготовлення та ефективного використання матеріалів, не перевищуючи рівня індукції при максимально досяжному рівні коефіцієнта корисної дії.

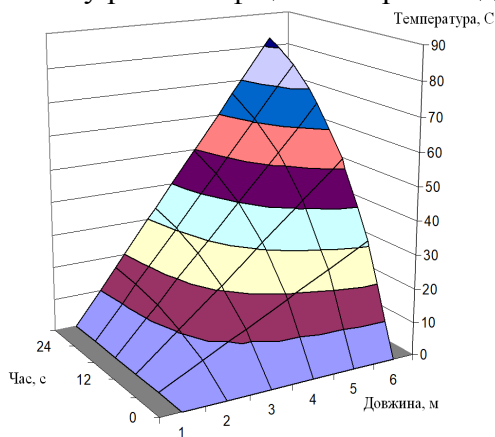


Рис. 7 Зміна температури в часі та по довжині труби теплообмінника.

На рис. 7 наведено поверхню двовимірної залежності температури теплоносія у теплообміннику індукційної опалювальної установки від зміни часу на кожному поздовжньому січенні трубки теплообмінника. Аналіз графіка рис. 7 показує, що по довжині трубки теплообмінника температура зростає лінійно, так як енергія, що передається на кожній ділянці індуктора є однаковою. Цей факт свідчить про те, що чим більша довжина труби, тим до більшої температури можна нагріти теплоносій при однаковій питомій потужності теплових джерел, що спричиняються індукційними струмами.

Перелік посилань

1. Гладь Ю.Б. Інженерна методика розрахунку індукційного нагрівача / Ю.Б. Гладь, Н.Б. Гашин, Н.Р. Крива // Матеріали XV науково-технічної конференції "Інформаційні моделі, системи та технології". - ТНТУ, 2023, с. 229-230.
2. Крива Н. Р. Розрахунок спіралеподібного нагрівача / Надія Крива, Галина Семенишин // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 121–122.

УДК 622.24.051.55

Ігор Грицай, д.т.н., проф.; Андрій Сліпчук, к.т.н., доц.; Андрій Кук, к.т.н., доц.
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ ВРІЗАННЯ В МЕТОДІ POWER SKIVING

Анотація. Наведено результати дослідження процесу нарізання зубчастих коліс за методом Power Skiving на основі розроблених моделей недеформованої стружки та сили різання. На основі аналізу процесу різання на етапі вривання встановлено, що є можливість підвищення продуктивності процесу при збереженні якості коліс шляхом скорочення сумарного шляху різання за рахунок багатократних коротких ходів на етапі вривання з наступним різанням на повну глибинупрофілю за 1-2 проходи.

Ключові слова. Power Skiving, комп'ютерне моделювання, вривання, шлях різання, продуктивність

Ihor Hrytsay, Ph.D., Prof.; Andrii Slipchuk, Ph.D., Assoc. Prof.; Andrii Kuk, Ph.D., Assoc. Prof.

INVESTIGATION OF NON-STATIONARY CUT-IN PROCESSES IN POWER SKIVING METHOD

Abstract. The paper presents the results of the study of the process of cutting gears by the power-skiving method on the basis of the developed models of undeformed chips and cutting forces. Based on the analysis of the cutting process at the cre-шт stage, it is established that it is possible to increase the productivity of the process while maintaining the quality of the gears by reducing the total cutting path through several short strokes at the cut-in stage, followed by cutting to the full depth of the profile in 1-2 strokes

Keywords: Pover Skiving, computer simulation, cut-instage, cutting path, performance

Протягом останніх років у виробництві зубчастих коліс набуває все ширшого застосування метод Power Skiving, відомий раніше як зуботочіння. Поширення цього методу на колеса зовнішнього зачеплення та колеса великих модулів зумовлене його значними перевагами у порівнянні з традиційними методами зубонарізання, зокрема, черв'ячним зубофрезеруванням та зубодовбанням: велика швидкість різання при забезпеченні високої якості зубчастих коліс. Разом з тим, аналіз цієї технології показав, що існує резерв для істотного підвищення її продуктивності.

Дослідження Power Skiving на основі розроблених авторами моделей недеформованої стружки та розрахунку її параметрів, а також сили різання і динаміки процесу [1] показали, що на обмеження робочих режимів в цьому методі впливають умови різання на стадії вривання, яке є особливим етапом процесу формування зубчастої поверхні. Пояснимо це на порівнянні цього етапу формування зубчастого колеса з черв'ячним зубофрезеруванням, що на сьогодні залишається основним методом нарізання зубчастих коліс в машинобудуванні.

В різанні черв'ячною фрезою в одній впадині в циклі осьової подачі бере участь значна кількість зубців, які розташовані на її гвинтовій поверхні. Наприклад, якщо кількість рейок фрези 10, коефіцієнт торцевого перекриття з колесом 2,5, то впадина формується двадцятьма п'ятьма зубцями, які ріжуть за час контакту фрези з колесом в одному циклі подачі. Для тих же умов Skiving -різець обробляє впадину одним зубцем, відповідно до закону парного зачеплення двох коліс, який реалізовано в цьому методі. Звідси випливає значна різниця в умовах вривання черв'ячної фрези і сківінг-різця: при зміщенні цього інструменту на величину осьової подачі його зубець приходить у

впадину, прорізану в попередньому циклі на значно меншу глибину, а при контакті зубця з цієї поверхнею виникає удар і стрибкоподібне збільшення сили різання. Такі умови нестационарного різання змушують використовувати «ощадливі» режими різання: зменшувати величину подачі, або нарізати колесо з великим числом проходів за малої глибини різання. Ці несприятливі умови зберігаються протягом певного числа обертів заготовки до початку формування остаточної впадини між зубцями колеса та при переміщенні Skiving-різця на певну довжину в осевій подачі. Після формування сталого перехідної поверхні у впадині різання продовжується як стаціонарний процес із власними закономірностями, які циклічно повторюються під час кожного різу [2].

Кінематична схема процесу Power Skiving та сили, які діють на інструмент наведено на рис.1, а. Результати моделювання сили різання в одній впадині під час врізання на послідовних обертах інструменту під час третього проходу показані на рис.1, б. Початкові дані: колесо евольвентне прямозубе; модуль 2,5 мм; кількість зубців: колеса 33, різця 24; осьова подача 0,75 мм/об.; швидкість різання 190 м/хв.; кількість проходів чотири, глибина різання по проходах: 0,5m, 1m 1,5m та 2m; зовнішній діаметр різця 66 мм; кут схрещення осей $\omega = 25^{\circ}$.

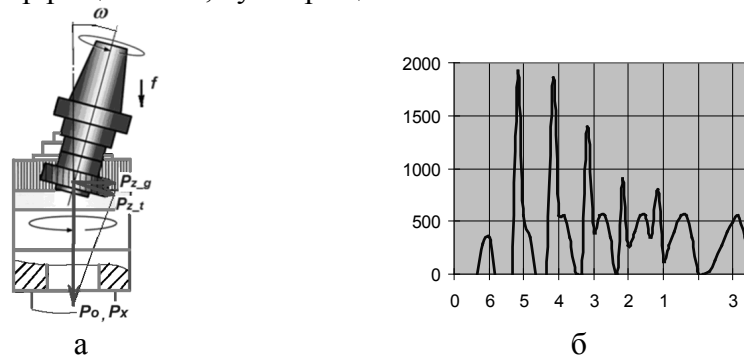


Рис.1. Кінематична схема процесу Power Skiving (а) та сили різання в одній впадині на послідовних обертах інструменту при врізанні на третьому проході з глибиною різання (б)

Графіки на рис.1, б відображають сили однозубого різання, коли моделюється процес роботи одного зубця інструменту в одній впадині. На рис. 2, а показано графік сумарної сили, як сили багатозубого різання під час третього проходу, який відтворює умови зубонарізання відповідно до коефіцієнту торцевого перекриття, коли в зачепленні перебувають одночасно кілька зубців інструменту. Для порівняння зміни умов перебігу процесу зубонарізання на рис.2, б наведено силу різання під час цього ж проходу після завершення врізання, тобто в умовах стаціонарного різання.

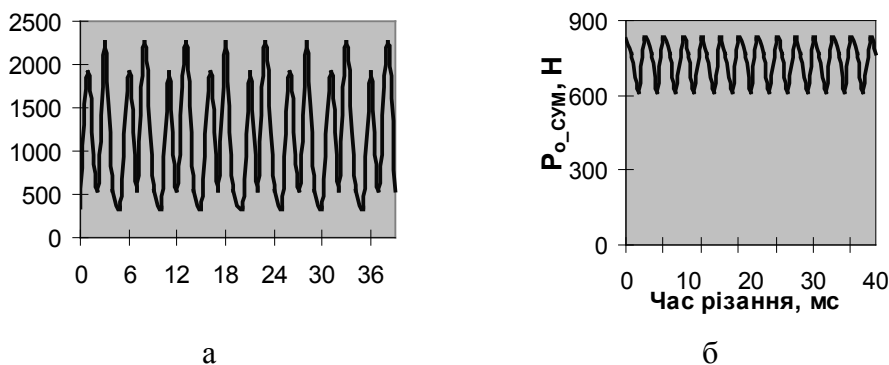


Рис.2. Сила неперервного різання на другому оберті в третьому проході при врізанні (а) та сили неперервного стаціонарного різання (б)

На рис.3 наведено графік сумарної сили неперервного багатозубого різання, яке здійснюється на повну глибину профіля за один прохід для тих же початкових даних. Як видно, максимальна сила однопрохідного різання на етапі стаціонарного різання менша за пікові значення цієї сили на етапах вривання на другому оберті третього проходу в 2 рази. Одночасно середня сила теж зменшується вдвічі.

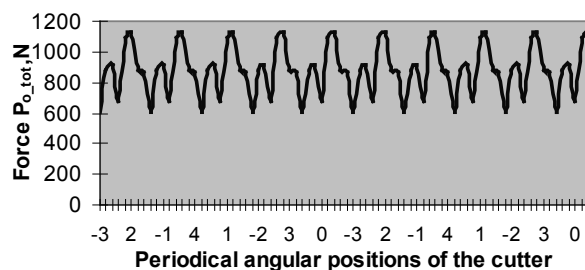


Рис. 3. Сила неперервного стаціонарного різання при нарізанні колеса на повну висоту профіля

Отримані результати, зокрема, порівняння сили різання на окремому проході при багато прохідному обробленні (900 Н) і сили, яка виникає на стадії стаціонарного (усталеного) різання на повну глибину профілю (1200 Н) дають підстави для такого висновку. Замість багатьох проходів на всю довжину колеса із поступовим збільшенням глибини різання, пропонується використовувати багатократні короткі переходи тільки на довжині шляху вривання, а після завершення формування перехідної поверхні у впадині між зубцями колеса і виходу інструменту на усталений режим роботи здійснювати один хід на всю висоту колеса (або за два ходи - залежно від можливостей Skiving-верстата). Оскільки довжина шляху вривання істотно менша від повної висоти колеса, то завдяки такій зміні операції можна багатократно скоротити час оброблення, підвищити продуктивність процесу, уникнувши ударних динамічних навантажень та забезпечивши стійкість різця і точність зубчастого колеса.

Перелік посилань

1. I. Hrytsay, A. Slipchuk, M. Bosansky. Justification of the Choice of Parameters for the Gear Power Skiving Operation Based on Computer Simulation. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*. vol.73, no. 2, pp. 33-44. 2023
2. I. Hrytsai and A. Slipchuk. Features of using the over-skiving method for multi-pass cutting of external gears. *Mech. Adv. Technol.*, vol. 7, no. 3 (99), pp. 317–324, 2023.

УДК 621.867

Лариса Данильченко, к.т.н., доц.; Дмитро Радик, к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Анотація. Встановлено вплив термодинамічних складових на міцнісні властивості поверхневого шару деталей методами пластичного деформування, отримано рівняння енергетичного балансу локального об'єму, сформованого при зміцненні поверхонь деталей.

Ключові слова: пластична деформація, поверхневий шар, теплова енергія

Larysa Danylchenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Dmytro Radyk, Ph.D., Assoc. Prof.

INVESTIGATION OF THERMODYNAMIC STATE OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION PROCESS

Abstract. The influence of thermodynamic components on the strength properties of the surface layer of parts by plastic deformation methods is determined, and the equation of energy balance of the local volume formed during the hardening of parts surfaces is obtained.

Keywords: plastic deformation, surface layer, thermal energy

Процес поверхневого пластичного деформування (ППД) - це сукупність складних взаємопов'язаних явищ, які зумовлюють формування якісно нового поверхневого шару з покращеними фізико-механічними характеристиками. Основною характеристикою ефективності зміцнення тим чи іншим методом ППД слугує підвищення експлуатаційних властивостей деталей, таких як опір втомлюваності, контактна витривалість й зносостійкість. Однак, їх визначення залежно від багатьох параметрів процесу є тривалим й працемістким процесом.

До найперспективніших методів вирішення цього завдання належить метод енергетичної оцінки явищ і умов перебігу процесу ППД. Оброблення ППД пов'язане з роботою, затраченою на зміцнення поверхневого шару (ПШ), що своєю чергою залежить від енергетичного стану. Отже, поверхнева енергія є однією з основних характеристик матеріалу, що визначають його деформованість, а також фізико-механічні властивості ПШ після ППД. У галузі оцінки механічних властивостей матеріалів, їх опору пластичній деформації залежно від напруженого стану швидкісних, температурних режимів деформування, хімічного й фазового складу, а також їх структури накопичено великий експериментальний досвід. Особливості більшості досліджень, проведених у цьому напрямку, полягають в тому, що вони розглядаються з позиції механіки твердого тіла в рамках теорій пружності та пластичності. На основі цих досліджень запропоновано багато інженерних методів розрахунку характеристик ПШ та експлуатаційних властивостей деталей [1]. Однак механічні теорії, що застосовуються для опису процесу ППД, базуються на низці припущень. Це в багатьох випадках спрощує завдання, але при цьому віддаляє його від дійсності.

На теперішній час в механічних теоріях, що застосовуються для опису процесу поверхневого пластичного деформування (ППД) активно розвивається новий напрям, заснований на термодинамічному розгляді механізмів і закономірностей пластичної деформації під час руйнування матеріалів. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження з кінетики деформації при руйнуванні різних матеріалів, обговорення яких міститься в багатьох опублікованих роботах, дають змогу з урахуванням сучасних уявлень підійти як до опису явищ процесу ППД, так і до їх енергетичної оцінки.

Відповідно до сучасних уявлень будь-який процес деформування та руйнування твердих тіл є кінетичним і незворотнім незалежно від фізико-хімічної природи матеріалу, його структури, а також умов навантаження. Це положення повною мірою стосується і процесу ППД, оскільки за своєю суттю, він є процесом об'ємної пошкоджуваності матеріалу, за якого в деформованому елементі ПШ зароджуються та накопичуються різного роду дефекти та пошкодження.

Подання процесу ППД як кінетичного ґрунтується на двох експериментально встановлених фактах, перший з яких свідчить про його статистичний характер, який розкриває його феноменологічну сторону. В основі феноменологічного процесу лежить залежність зміцнення елементу ПШ від силових параметрів навантаження і часу (циклів) їх впливу. З аналізу цієї залежності випливає, що якщо два процеси ППД, що супроводжуються зміцненням унаслідок внутрішньої пошкоджуваності елементу ПШ, протікають як при вищих зовнішніх силових параметрах навантаження, так і за нижчих, то відмінність у поведінці деформованого елементу ПШ залежить лише від швидкості (ступеня) його пошкоджуваності.

Характерною ознакою статистичного процесу є те, що у кожен момент часу (або циклу формування елементу ПШ) обраним умовам навантаження відповідає певний ступінь його пошкоджуваності. Як тільки пошкоджуваність матеріалу в локальному мікрооб'ємі перевищує граничне (критичне) значення, починається процес його руйнування у вигляді мікро- і макропорушень під впливом тривалості оброблення ППД на опір втоми та зносостійкість, з появою на поверхні ознак руйнування (мікротріщини) експлуатаційні показники ПШ починають знижуватися. Це дає змогу припускати, що під час ППД існує критична величина накопичення пошкоджуваності, за якої забезпечується найбільший ефект зміцнення поверхні, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики деталей.

Якщо розглядати процес ППД з позиції термодинамічної теорії, то, відповідно до її основних положень, поверхневий шар будь-якого твердого металевого тіла, що піддається деформуванню в процесі ППД так само, як і саме тіло, структурно приймається як квазісуцільне та неоднорідне середовище, в якому статистично рівномірно розподілені структурні елементи й різного роду дефекти та пошкодження. Одні з них є внутрішніми джерелами елементарних дефектів, інші - перешкодами для їх руху. Фізично макроскопічне явище пластичної деформації, пошкоджуваності та руйнування елементу ПШ у процесі ППД розглядається як сукупність величезної кількості мікроскопічних елементарних атомно-молекулярних перегруповань, що зумовлюють рух, взаємодію і знищення на стиках дефектів, інші перешкоджають їх руху, взаємодії та знищенню.

Швидкість пластичної деформації елементу визначається швидкістю руху та знищення елементарних дефектів за рахунок флуктуації теплової енергії під впливом зовнішніх сил. Пошкоджуваність матеріалу в процесі ППД пов'язане з накопиченням у деформованих елементах ПШ різних дефектів і скупчень. Руйнування макроскопічного елементу ПШ відбувається під час подальшого деформування об'ємів, що мають граничну щільність дефектів.

Таким чином, енергетичний процес ППД можна інтерпретувати як процес одночасного перебігу в деформованих елементах ПШ двох протилежних взаємопов'язаних явищ:

- зростання щільності прихованої енергії E_{np} дефектів і пошкоджень, що накопичуються в матеріалі за рахунок роботи A_{np} ;
- зниження значення E_{np} за рахунок різних релаксаційних процесів, що відбуваються усередині деформованого елементу ПШ.

При цьому зростання щільності прихованої енергії пов'язане з пошкодженням

матеріалу і, як наслідок, зміцненням ПШ, а її зниження спричинене динамічним поверненням (розміцненням) внаслідок теплового ефекту пластичної деформації q .

Тоді згідно з основним законом термодинаміки рівняння енергетичного балансу процесу ППД для одиничного локального об'єму ПШ має вигляд:

$$A_{nl} = \Delta E_{np} + q.$$

Експериментально встановлено, що значна частина теплової енергії, пов'язана з тепловим ефектом процесу ППД, не затримується в деформованому елементі ПШ, а розсіюється по об'єму деталі, деформувальних тіл (іденторів) обробного інструменту або середовища і в навколишнє середовище за рахунок теплообміну q .

При цьому лише незначна частина цієї енергії затримується в деформованому елементі ПШ, підвищуючи його внутрішню енергію на величину E_m .

Таким чином, тепловий ефект пластичної деформації можна представити як:

$$q = \bar{q} + \Delta E_m.$$

Тоді рівняння енергетичного балансу процесу ППД має вигляд:

$$A_{nl} = \Delta E_{np} + q.$$

Накопичувана в деформованому елементі ПШ внутрішня енергія ΔE визначається сумою двох складових: потенційної (прихованої) ΔE_{np} і кінетичної (теплової) ΔE_m :

$$\Delta E = \Delta E_{np} + \Delta E_m.$$

Саме ця енергія пов'язана з пошкоджуваністю матеріалу ΔE_{np} і його термічним знеміцненням ΔE_m ; вона є відповідальною за міцнісні властивості ПШ, що формується в процесі ППД, і, отже, цілком обґрунтовано може бути прийнята за інтегральний показник пошкоджуваності елемента ПШ. Оскільки зміцненню ППД, як правило, піддаються деталі, які попередньо пройшли механічне оброблення, для оцінки й прогнозування міцнісних властивостей ПШ необхідно враховувати внутрішню енергію $E_{вн}$, накопичену в деформованому елементі на попередніх ППД етапах оброблення.

У загальному вигляді енергетичний стан деформованого в процесі ППД елемента можна описати рівнянням:

$$E = E_{вн} + \Delta E.$$

Відповідно до кінетичних уявлень процесу ППД поверхневий шар вважається максимально ефективно зміцненим, коли внутрішня енергія в деформованих елементах, що знаходяться на поверхні ПШ, досягне граничної (критичної) величини.

Цей стан ПШ для конкретних умов процесу ППД характеризується фізико-механічними характеристиками, що забезпечують максимальне підвищення експлуатаційних властивостей деталей. Отже, граничну внутрішню енергію можна прийняти як критерій зміцнення, а енергетичну умову граничної деформованості ПШ можна записати у вигляді:

$$E = \Delta E_{вн} + \sum_{i=1}^N \Delta E_i = E^*,$$

де $E_{вн}$ - внутрішня енергія в локальному макрооб'ємі ПШ у вихідному (до ППД) стані, що враховує спадкові властивості матеріалу при глибині його залягання $h = 0$;

ΔE_i - зміна внутрішньої енергії в локальному макрооб'ємі в процесі ППД.

Для кількісної оцінки граничної внутрішньої енергії E^* , за якої в процесі ППД досягається максимальне з точки зору підвищення експлуатаційних властивостей зміцнення ПШ, можна скористатися аналогією між процесами поглинання енергії кристалічною решіткою під час механічного навантаження при нагріванні.

І в тому, і в іншому випадку порушення міжатомних зв'язків настає в результаті поглинання граничної для даної кристалічної решітки величини енергії. У разі нагрівання металу від заданої температури T_0 до температури плавлення $T_{пл}$ граничну

питому енергію визначаємо за формулою:

$$E_{\text{пит}} = \int_{T_0}^{T_{\text{пл}}} c_p dT + q_{\text{пл}},$$

де c_p - питома теплоємність; $q_{\text{пл}}$ - прихована теплота плавлення.

Величина $\int_{T_0}^{T_{\text{пл}}} c_p dT$ характеризує зміну кількості теплоти металу при нагріванні

від заданої температури до температури плавлення; яка витрачається на збудження атомних коливань критичної величини без порушення міжатомних зв'язків. Ці порушення виникають, коли кристалічна решітка поглинає додаткову енергію, що дорівнює прихованій теплоті плавлення. При механічному навантаженні, як і при плавленні, процесу порушення міжатомних зв'язків передують спотворення кристалічної решітки до критичної величини з тією лише відмінністю, що при механічному навантаженні це зумовлюється досягненням у деформованих локальних об'ємах ПШ критичної щільності дислокацій, за якої подальше поглинання енергії кристалічною решіткою призводить до порушення міжатомних зв'язків.

Якщо прийняти, що питома енергія, що витрачається на граничне спотворення кристалічної решітки, не залежить від виду енергії, що підводиться (теплова або механічна), то гранична питома енергія, яку здатна поглинути кристалічна решітка, повинна відповідати тепловмісту (ентальпії) металу. З цього випливає, що критична внутрішня енергія E^* , що накопичується в деформованому елементі ПШ після ППД, кількісно може бути оцінена за допомогою термодинамічної константи - ентальпії металу в твердому стані H при температурі плавлення:

$$E^* = \int_{T_0}^{T_{\text{пл}}} c_p dT = H.$$

Використовуючи вищенаведену аналогію, рівняння енергетичного балансу процесу ППД можна представити у вигляді:

$$A_{\text{пл}} = (P_i, t_i, i) = (1+k_{\text{мд}}) \Delta H,$$

де $k_{\text{мд}} > 1$ - коефіцієнт, що враховує значення теплової енергії пластичної деформації, яка не затримується в деформованому елементі ПШ;
 $\Delta H = H - E_{\text{вн}}$ - зміна ентальпії металу в процесі ППД.

Однак слід зазначити, що подібна аналогія стосується лише локальних об'ємів металу. Її перенесення на рівень великих об'ємів неправомірне, оскільки в процесі нагрівання енергія поглинається кристалічною решіткою практично рівномірно по всьому об'єму металу, а під час пластичної деформації внаслідок анізотропії й недосконалості кристалічної решітки відбувається неоднорідне поглинання енергії.

Отримане в результаті енергетичного аналізу процесу ППД рівняння є критеріальним, оскільки дає змогу обґрунтувати як технологічні параметри реалізації процесу, так і фізико-механічні характеристики ПШ, сформованого в результаті зміцнення динамічними методами ППД.

Перелік посилань

1. Данильченко Л.М., Радик Д.Л. Дослідження методів зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням / Збірник тез доповідей XX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя 17-18 травня 2017 р. - Тернопіль: ТНТУ, 2017. – С.21.

УДК 621.81

Андрій Дячун, к.т.н., доц.; Олег Деріш, В. Грасовник

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГВИНТОВИХ ГОФРОВАНИХ ЗАГОТОВОК

Анотація. Представлено конструкцію формувального інструменту для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок із змінним внутрішнім радіусом. Встановлено зв'язок середнього кута контакту стрічки з крайкою зуба та середньою глибиною деформації стрічки. Виведено рівняння для знаходження радіальної сили деформації стрічки.

Ключові слова: формувальний інструмент, гвинтова гофрована заготовка, стрічка, радіальна сила деформації.

Andriy Diachun, Ph.D., Assoc. Prof.; Oleh Derysh, V. Grasoynyk

THE STUDY OF THE FORMING TOOL PARAMETERS FOR THE SCREW CORRUGATED WORKPIECES MANUFACTURING

Abstract. The design of a forming tool for the screw corrugated workpiece with a variable inner radius manufacturing is presented. The relationship between the average contact angle of the tape with the edge of the tooth and the average depth of the tape deformation was established. The equation for radial force of tape deformation calculation is derived.

Keywords: forming tool, screw corrugated workpiece, tape, radial deformation force.

Інструмент для деформації стрічки у гвинтову гофровану заготовку (ГГЗ) із змінним внутрішнім радіусом представлено на рисунку 1. В процесі синхронізованого обертання за допомогою зубчастих коліс 1 циліндричних валків 2 і 3 із рівномірно виконаними по колу формувальними зубами 4 і 5, в зазор між ними подають стрічку 6 прямокутного поперечного січення. В наслідок цього проходить формування ГГЗ 7. Під час роботи за допомогою механізму регулювання 8 змінюють кут α нахилу формувальних зубів 5 відносно центральної вісі циліндричного валка 3. Це призводить до зміни радіуса ГГЗ заготовки від R_1 до R_2 .

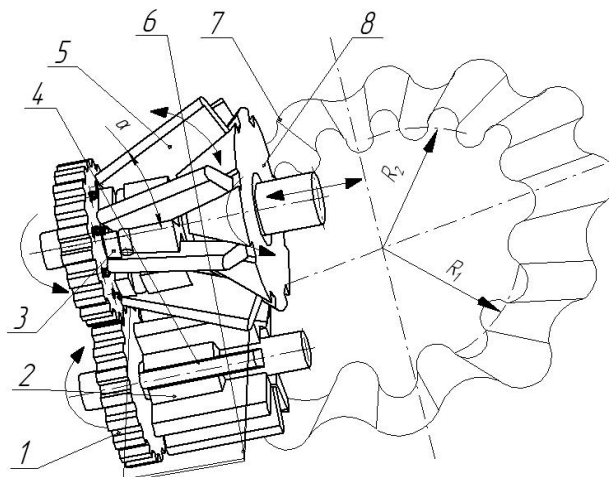


Рис. 1. Схема інструменту для виготовлення гвинтових гофрованих заготовок із змінним радіусом

Основними параметрами, які розглядаються під час проектування пристроїв для виготовлення гофрованої стрічки формувальними інструментами є радіальна сила деформації P_r та необхідний крутильний момент M_k на формувальних інструментах.

Для того щоб знайти ці величини, розглянуто рисунок 2, на якому показано схему формування гофр на стрічці формувальними інструментами.

Згідно експериментальних даних радіальна сила деформації P_r досягає свого максимуму при найбільшій глибині деформування стрічки, тобто коли центральна вісь зуба проходить через центр протилежного формувального інструмента, тому розрахунок проведено для цього випадку. Протягом процесу формоутворення відбувається огинання верхніх крайок зубів стрічкою. В даному випадку розглянуто крайки формувальних зубів циліндричної форми, оскільки вони найчастіше використовуються і мають найменший вплив при утворенні дефектів, пов'язаних із розривом матеріалу, чи пошкодження поверхневого шару стрічки.

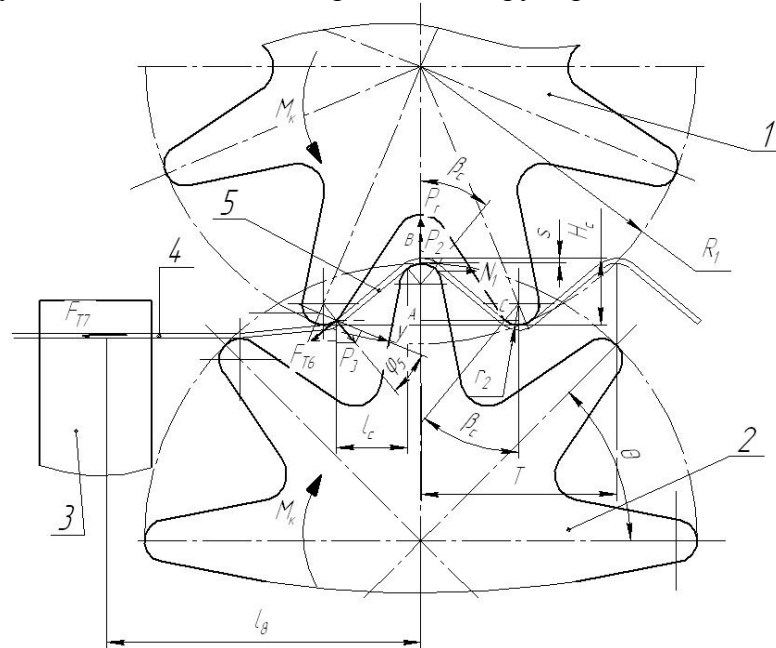


Рис. 2. Розрахункова схема процесу формоутворення гофр на стрічці: 1 – верхній формувальний інструмент; 2 – нижній формувальний інструмент; 3 – напрямна; 4 – стрічка; 5 – профільна стрічка

Оскільки однією із основних геометричних характеристик профільної стрічки є висота гофри, знайдено зв'язок середнього кута контакту стрічки з крайкою зуба β_c та середньою глибиною деформації H_c :

$$H_c = \left(\frac{T}{2} - 2r_2 \sin \beta_c \right) \cdot \operatorname{tg} \beta_c + 2r_2 (1 - \cos \beta_c) + s (\cos \beta_c + \sin \beta_c - 1), \quad (1)$$

де T – крок розміщення зубів; r_2 – радіус заокруглення крайки зубів; s - товщина стрічки.

Рівняння для знаходження радіальної сили деформації P_r стрічки:

$$P_r = \frac{1,15B \left[\sigma_{T0} \frac{s^2}{4} + \Pi \left(\frac{(r_2 + s)^2 + r_2^2}{4} \ln \sqrt{\frac{r_2 + s}{r_2}} - \frac{(r_2 + s)^2 - r_2^2}{8} \right) \right]}{\frac{T}{2} - 2r_2 \sin \beta_c} \left(1 + \frac{\mu_s \operatorname{tg} \beta_c}{2} \right), \quad (2)$$

де B – ширина стрічки; σ_{T0} - екстрапольована границя текучості матеріалу стрічки; Π – лінійний модуль зміцнення матеріалу стрічки; μ_s – коефіцієнт тертя між стрічкою і крайкою зуба.

УДК 621.941.1

Богдан Завертанний, Ph.D.; Геннадій Пасов, к.т.н., доц.; Віра Мурашківська
Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РОБОТИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ МЕТАЛОРИЗАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Анотація. В Національному університеті «Чернігівська політехніка» на кафедрі «Автомобільний транспорт та галузеве машинобудування» для вивчення навчальних дисциплін «Програмування систем ЧПК технологічного обладнання» та «Основи технології виробництва та ремонту автомобільного транспорту» застосовується спеціальний навчальний симулятор «CNC Simulator Free», для теоретичного та практичного вивчення токарної обробки на верстатах з ЧПК. Вказаний програмний продукт дозволяє впровадити у навчальний процес візуалізовану практичну складову для підготовки роботи з фізичними системами.

Ключові слова: симуляція, ЧПК, токарний верстат, точіння.

Bohdan Zaveretannyi, Ph.D.; Hennadii Pasov, Ph.D., Assoc. Prof.; Vira Murashkovska

VISUALIZATION OF WORK AND PRACTICAL APPLICATION OF NUMERICAL SOFTWARE CONTROL SYSTEMS OF METALLIC EQUIPMENT

Abstract. At the Chernihiv Polytechnic National University, the "Automotive Transport and Industrial Mechanical Engineering" department uses a special educational simulator "CNC Simulator Free" for the theoretical and practical study of turning processing on CNC machines for the study of the educational discipline "Programming of CNC systems of technological equipment". This software product allows you to introduce a visualized practical component into the educational process for preparing work with physical systems.

Key words: simulation, CNC, lathe, turning.

На базі Національного університету «Чернігівська політехніка» у навчально-науковому інституті механічної інженерії, технологій та транспорту на кафедрі «Автомобільний транспорт та галузеве машинобудування» для вивчення навчальної дисципліни «Програмування систем ЧПК технологічного обладнання» застосовується навчально-практичний продукт – «CNC Simulator». Продукт використовується для вивчення підготовчих (технологічні) функцій G та допоміжних функцій M програмування систем ЧПК металорізального обладнання мовою програмування FANUC, їх наочного застосування.

У продукті наявний ряд функцій для візуалізації. Наявна можливість спостерігати за проходженням токарних операцій в режимі реального часу, контролювати та перевіряти програму на наявність помилок.

Програмний продукт надає можливість відтворити на екрані комп'ютера (або іншого пристрою, наприклад, смартфона) модель токарного верстата з ЧПК. Наявна можливість переглядати результати токарних операцій з різних ракурсів, а також візуалізувати і аналізувати траєкторію руху інструменту.

CNC Simulator. Програмний продукт можна вважати повноцінним віртуальним верстатом, який відтворює функції матеріального металорізального обладнання. Застосовувати продукт можна не тільки в навчальних цілях, але і з метою контролю виконання керуючої програми обробки матеріалу для виявлення недоліків та помилок. Написаний у продукті код можна використовувати на матеріальному обладнанні ЧПК

для токарної обробки. Загальний вигляд продукту зображено на рис.1.

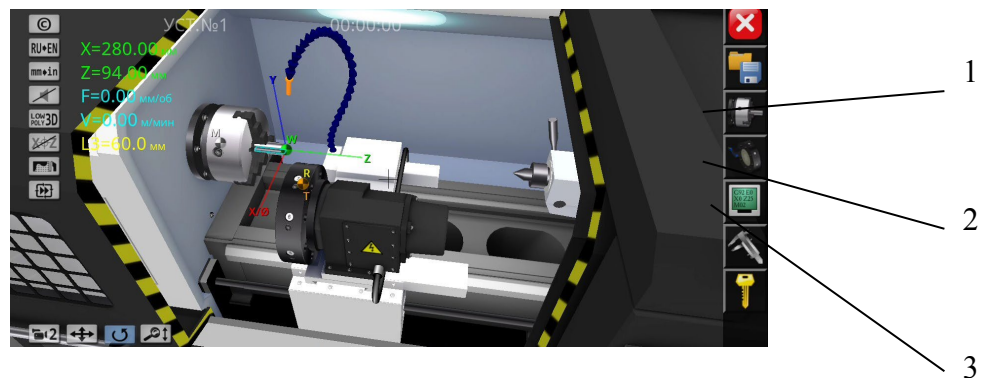


Рис. 1. “CNC Simulator” вигляд інтерфейсу:

1 – панель керування та написання програми; 2 – панель вибору інструменту; 3 – панель вибору заготовки

Панель керування та написання програми. На рис. 2 показано панель керування та написання програми продукту. За допомогою зрозумілого для користувача інтерфейсу можливе створення різноманітних програм токарної обробки деталей.



Рис. 2. Панель керування та написання програми

Вибір інструменту. На рис. 3 зображено панель вибору інструменту.

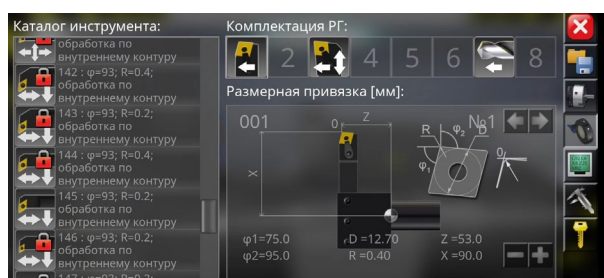


Рис.3. Панель вибору інструменту

При виборі інструменту вказується вся необхідна інформація для налагодження верстата, така як – радіус заокруглення пластини, виліт різця, кути пластини та ін.

Вибір заготовки. На рис. 4 показана панель заготовок. В ній обирається діаметр оброблюваної заготовки, довжина затиску заготовки у патроні, торцевий припуск на обробку, система координат інструменту, верстата та деталі.



Рис.4. Панель заготовок

Довідка. У програмному продукті також надана можливість застосовувати зразки стандартних програм. Також у програмі наявна довідка по значенню і програмуванню підготовчих та допоміжних функцій, що показано на рис. 5.

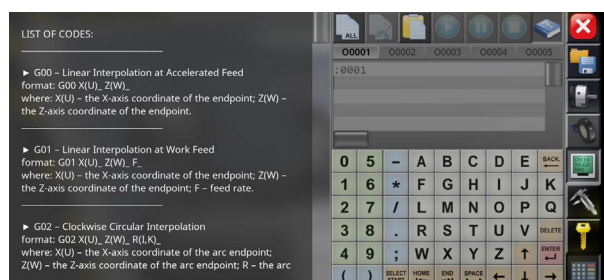


Рис.5. Довідка по значенню функцій мови програмування

Керуюча програма. Фрагмент керуючої програми токарної обробки написаної на лабораторних заняттях студентами та реалізованої у продукті, а потім і на матеріальному металорізальному обладнанні наведено на рис. 6.

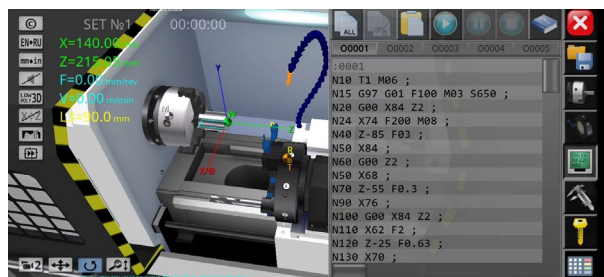


Рис.6. Фрагмент керуючої програми

Висновки і пропозиції. Впроваджено у навчання програмний продукт, який надає можливість відтворити на екрані комп'ютера (або іншого пристрою) модель токарного верстата з ЧПК. Наочне застосування продукту дозволяє підготувати здобувача освіти методом самостійного аналізу, проб та помилок до подальшого використання набутих навичок програмування на матеріальному обладнанні, як при навчанні, так і на виробництві. Також застосування продукту створює основу знання спеціальних G та M функцій для подальшого вивчення САМ систем з програмування обладнання ЧПК.

УДК 62-229.323

Юрій Капаціла, к.т.н., доц.; Віталій Сенчишин; Олександр Шовкун
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЦАНГИ ДЛЯ ПОДАЧІ ПРУТКОВОГО МАТЕРІАЛУ

Анотація. Запропоновано варіант конструкції цангового патрона для подачі пруткового матеріалу. Описано будову і принцип дії, сферу застосування і переваги пристрою, наведено аналітичні залежності для визначення діапазону зміни діаметра та зусилля затиску.

Ключові слова: цанга, шнек, технологія, затиск, заготовка.

Yurii Kapatsila, Ph.D., Assoc. Prof.; Vitalii Senchyshyn; Alexander Shovkun
COLLET DESIGN FOR FEEDING BAR MATERIAL

Abstract. A collet chuck design is proposed for feeding bar material. The work describes the structure, principle of operation, scope of application, and advantages of the design. Analytical inputs are provided for determining the range of diameter and clamping force change.

Keywords: collet, auger, technology, clamping, blank.

Подача пруткового матеріалу – це процес автоматичної подачі прутків або стержнів для подальшої обробки чи використання в різних галузях промисловості, зокрема в процесах механічного оброблення для подачі матеріалів для обробки чи складання виробів, в електронній промисловості для автоматичної подачі компонентів під час складання електронних пристроїв, у виробництві харчових продуктів для автоматичної подачі інгредієнтів під час обробки або упакування.

Для забезпечення затиску та подачі пруткового матеріалу існує велика кількість засобів технологічного оснащення, найпоширенішими з яких є цангові патрони. Подавальні цанги дозволяють механізувати та автоматизувати процес подачі матеріалу і, таким чином, досягти підвищення продуктивності, точності та ефективності виробничих процесів. Вони характеризуються високою швидкодією, точністю, надійністю, ефективністю, забезпечують необхідні зусилля затиску.

Одним з недоліків цангових патронів є невеликий діапазон затиску і, як наслідок, обмежена гнучкість налаштування. В умовах сучасного багатоменклатурного виробництва цей недолік може стати доволі суттєвим, оскільки веде до підвищення підготовчо-заключного часу, а отже, і до зниження продуктивності, тому завдання розроблення нових конструкцій патронів для подачі пруткового матеріалу є актуальним.

Пропонується конструкція цангового патрона для подачі пруткового матеріалу, основним силовим елементом якого є спіраль шнека. Принцип дії патрона базується на здатності шнека змінювати діаметр під дією осьового навантаження.

Цанга (рис. 1) складається з корпусу 1, зовнішня поверхня якого виконана циліндричною, а внутрішня – конічною. В середині корпусу встановлена розрізна втулка 7, яка складається з трьох однакових частин, кожна яких жорстко кріпиться своїми вільними кінцями до підпружинених стержнів 4 і 5, розміщених в радіальних отворах корпусу 1. Як вже було зазначено, основним силовим елементом цанги є спіраль шнека 8, зовнішня поверхня якої виконана конічною відповідно до внутрішньої поверхні корпусу 1, а внутрішня – циліндричною. Кінець спіралі більшого діаметра фіксується в циліндричні виточки передньої частини корпусу, а інший кінець меншого

діаметра кріпиться між різьбовими виступами рухомого упора 2, який переміщається в циліндричній виточці в хвостовій частині корпуса і з'єднаний з трубою подачі металорізального верстата. При переміщенні упора вздовж осі спіраль шнека розтягується, її внутрішній діаметр зменшується, що приводить до стиснення розрізної втулки і, як результат, до затиску прутка 3.

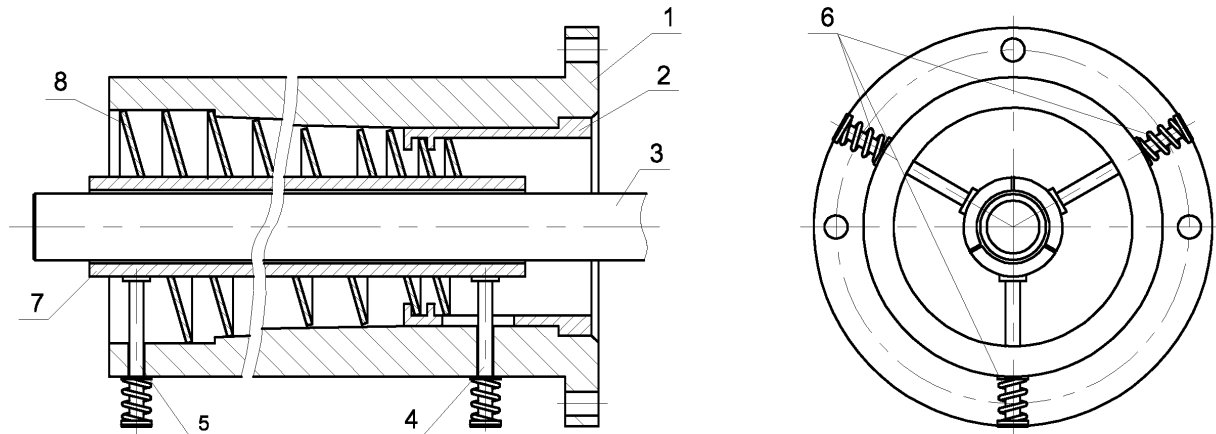


Рисунок 1 – Конструкція цанги для подачі пруткового матеріалу

Визначення основних геометричних співвідношень шнека проводиться на основі відомих залежностей, розроблених для гвинтових циліндричних пружин.

Діапазону зміни діаметрів можна визначити за залежністю:

$$\Delta D = -FD^3 \sin \alpha \left(\frac{1}{2C} - \frac{\cos 2\alpha}{\cos^2 \alpha} \right) - \left(\frac{T_{кр} D^2}{2 \cos \alpha} \right) \left(\frac{2 \sin^2 \alpha}{C} + \frac{\cos 2\alpha}{B} \right),$$

де D – середній діаметр спіралі,

C – жорсткість бруса при крученні,

B – жорсткість бруса при згині,

$T_{кр}$ – момент, який діє в торцевих площинах, виникає при навантаженні спіралі осьовими силами і закручує спіраль по ходу навивки,

α – початковий кут підйому осі гвинтового бруса.

Зусилля затиску:

$$F \geq \beta \frac{2T_{кр}}{D} \frac{d\rho}{dz}, \quad \frac{d\rho}{dz} = \frac{Z_L}{2\varphi D \frac{d\varphi}{d\rho} + \varphi}, \quad T_{кр} = -\frac{FD(B-C)\sin 2\alpha}{4(B\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)},$$

де Z_L – довжина спіралі по осі Z ,

β – коефіцієнт запасу,

φ – кутовий параметр,

ρ – радіус кривизни.

Запропонована конструкція забезпечує швидкий і надійний затиск гладких циліндричних заготовок, діапазон діаметрів перевищує аналогічний показник традиційних цангових патронів. Крім того, за рахунок того, що зусилля затиску рівномірно розподіляється по всій довжині розрізної оправки, забезпечується можливість закріплення тонкостінних заготовок без їх деформації.

Слід зазначити, що ця розробка носить концептуальний характер, для її втілення в реальну конструкцію, необхідне проведення комплексу пошуково-дослідницьких та проектно-конструкторських робіт.

УДК 621.9.06

Антоніна Кологойда, к.т.н., доц.; Геннадій Пасов, к.т.н., доц.; Віра Мурашківська
Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна

ПРОЕКТУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ТА ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕМЕНТІВ КОРОБКИ ШВИДКОСТЕЙ З ВИКОРИСТАННЯ САПР

Анотація. В сучасній інженерії невід'ємними складовими процесу проектування є різноманітні системи САПР. Знання широкого спектру спеціальних програмних пакетів різного напрямлення дозволить більш ефективно виконувати розрахунки, проектування та різноманітні дослідження вузлів обладнання.

Ключові слова: верстат, коробка швидкостей, шпиндель, динаміка, САПР.

**Antonina Kolohoida, Ph.D., Assoc. Prof.; Gennadiy Pasov, Ph.D., Assoc. Prof.
Vira Murashkovska**

DESIGN, CALCULATION AND DYNAMIC ANALYSIS OF GEARBOX ELEMENTS USING CAD

Abstract. In modern engineering, various CAD systems are integral components of the design process. Knowledge of a wide range of special software packages of various directions will allow to perform calculations, design and various researches of equipment nodes more efficiently.

Keywords: machine tool, gearbox, spindle, dynamics, CAD.

Невід'ємною складовою підготовки фахівців машинобудівної галузі є набуття навиків щодо проектування та розрахунку вузлів та обладнання в цілому. Значна увага приділяється механізмам передачі руху, таким як різноманітні редуктори, коробки швидкостей та інші. В цьому випадку необхідно забезпечити не тільки якість деталей, безпроблемне їх складання і достатній ресурс, але і певні чіткі співвідношення між вхідними та вихідними швидкостями, плавність регулювання. На придбання цих компетентностей зорієнтовано ряд дисциплін професійної підготовки, в межах яких розглядаються певні етапи проектування та перевірки механізмів.

На даному етапі розвитку технологій значна кількість операцій може бути спрощена та автоматизована за рахунок використання засобів САПР. Однак при цьому спеціаліст повинен вміти не тільки використовувати спеціалізовані програмні пакети але і вдало обирати більш зручний варіант та аналізувати результати розрахунків.

Наприклад, при проектуванні коробки швидкостей коробки швидкостей та шпиндельного вузла верстату доцільно використовувати ряд програмних продуктів. Рекомендується використовувати як спеціальні математичні розрахункові програми, так і програми просторового моделювання.

Оскільки розрахунок здійснюється за певною послідовністю та визначеними залежностями, доцільно створити спеціалізовану розрахункову програму (рис. 1), що дозволить при зміні вхідних даних швидко отримувати необхідні значення.

На базі виконаних розрахунків необхідно побудувати графік частот обертання (рис. 2) та схему коробки швидкостей верстату (рис. 3). Побудови такого рівня зручно здійснювати в графічних пакетах, наприклад Autocad. При цьому для надання гучності графіку частот обертання зручно використовувати інструментарій параметричного креслення, який дозволить зв'язати відповідні точки графіка.

$$\begin{aligned}
 a &:= 5 & V_{\max} &:= 210 & D_{\max} &:= 150 & n_{d\max} &:= 3000 & n_{d\text{nom}} &:= 1600 & n_{d\min} &:= 1000 \\
 & & V_{\min} &:= 10 & D_{\min} &:= 15 & \phi &:= \frac{1}{1-a \cdot 0.01} & \phi &= 1.053 & \phi &:= 1.06 \\
 n_{\min} &:= \frac{1000 \cdot V_{\min}}{\pi \cdot D_{\max}} & n_{\min} &= 21.221 & n_{\max} &:= \frac{1000 \cdot V_{\max}}{\pi \cdot D_{\min}} & n_{\max} &= 4.456 \times 10^3 \\
 & & & & & & n_{\min} &:= 21.2 & & & n_{\max} &:= 4500 \\
 R_n &:= \frac{n_{\max}}{n_{\min}} & R_n &= 212.264 & R_d &:= \frac{n_{d\max}}{n_{d\min}} & R_d &= 3 \\
 R_{dN} &:= \frac{n_{d\max}}{n_{d\text{nom}}} & R_{dN} &= 1.875 & R_{dM} &:= \frac{n_{d\text{nom}}}{n_{d\min}} & R_{dM} &= 1.6
 \end{aligned}$$

Рис. 1 – Частина програми розрахунку параметрів коробки швидкостей у математичному пакеті Mathcad

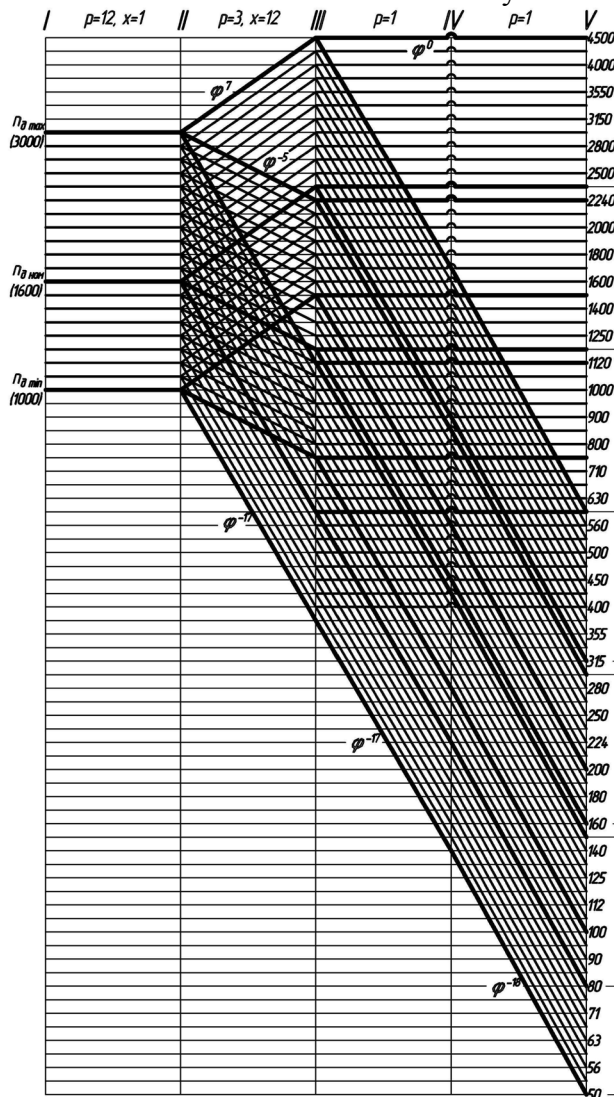


Рис. 2 – Графік частот обертання приводу
 $z = 12_1 \cdot 3_{12} \cdot (1_0 + 1_{17} \cdot 1_{18})$, $\phi = 1,06$

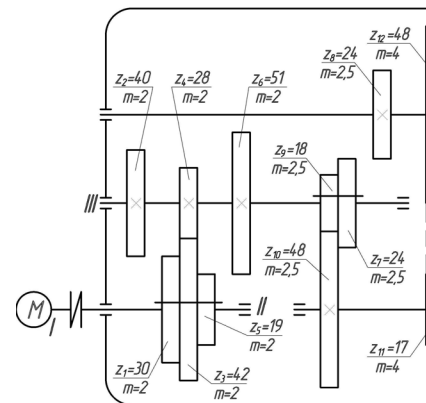


Рис. 3 – Коробка швидкостей

Проектування та підготовку технічної документації також зручно здійснювати в графічних програмних пакетах. Однак роботу зручніше починати зі створення просторової моделі окремих деталей та вузла вцілому. Для створення типових елементів зручно використовувати вбудовані бібліотеки, які не тільки мають

різноманітний набір стандартних деталей, типу кілець, підшипників, кришок і т.д., а і дозволяють за визначеними параметрами будувати зубчасті колеса та їх блоки. На рисунку 4 зображено спрощену просторову модель коробки швидкостей верстату.

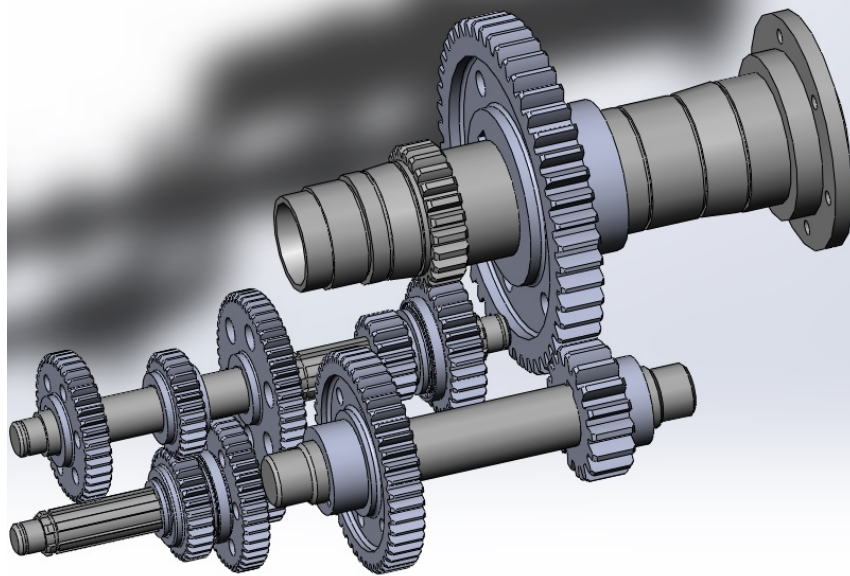


Рис. 4 – Привод головного руху

Однією з переваг наявності просторових моделей вузлів є можливість виконання різноманітних перевірочних розрахунків. Наприклад, система Solidworks дозволяє виконувати статичні, частотні (рис. 5), температурні та інші види аналізу. Результат аналізу наводиться у вигляді кольорових діаграм, за якими легко аналізувати поведінку деталі в певних умовах та контролювати їх параметри міцності.

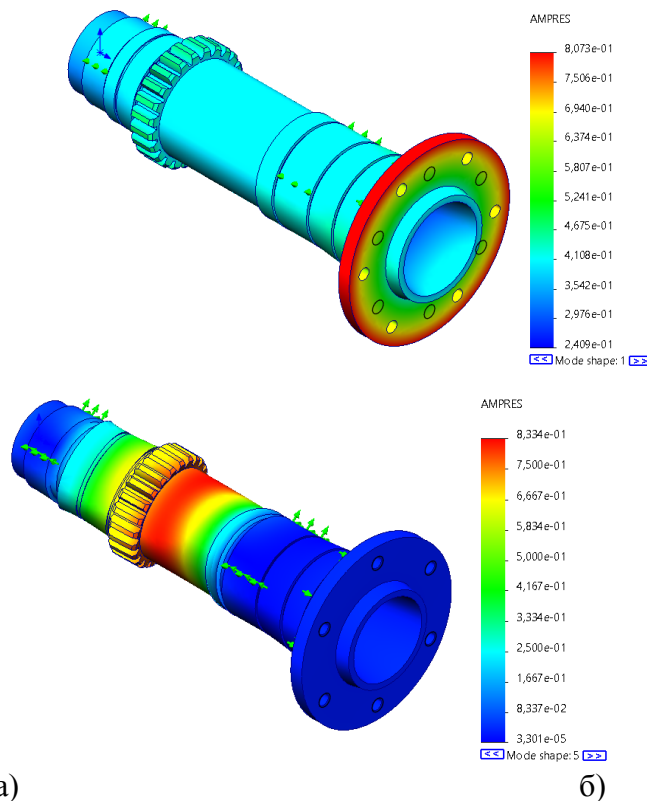


Рис. 5 – Результати частотного розрахунку шпинделя:

а – діаграма коливань для 1-ї власної частоти; б – для 5-ї власної частоти

Сучасні верстати працюють з досить високими частотами обертання, тому при проектуванні рухомих елементів, також необхідно звертати увагу на динамічні параметри.

При динамічному розрахунку важливим етапом є визначення власних частот деталей. За стандартним налаштуванням система Solidworks дозволяє визначити 5 перших власних частот коливання та форми коливань. Для прикладу виконано частотний аналіз шпинделя спроектованої коробки швидкостей. На рис. 5 частково наведено результати розрахунку. Для більш повного аналізу динамічних параметрів шпинделя також необхідно визначити його перехідну (рис. 6) та амплітудо-фазово-частотну характеристики (рис. 6). Побудова цих характеристик здійснюється у математичному пакеті Mathcad. При цьому шпиндель розбивається на ряд ділянок з постійним зовнішнім та внутрішнім діаметром.

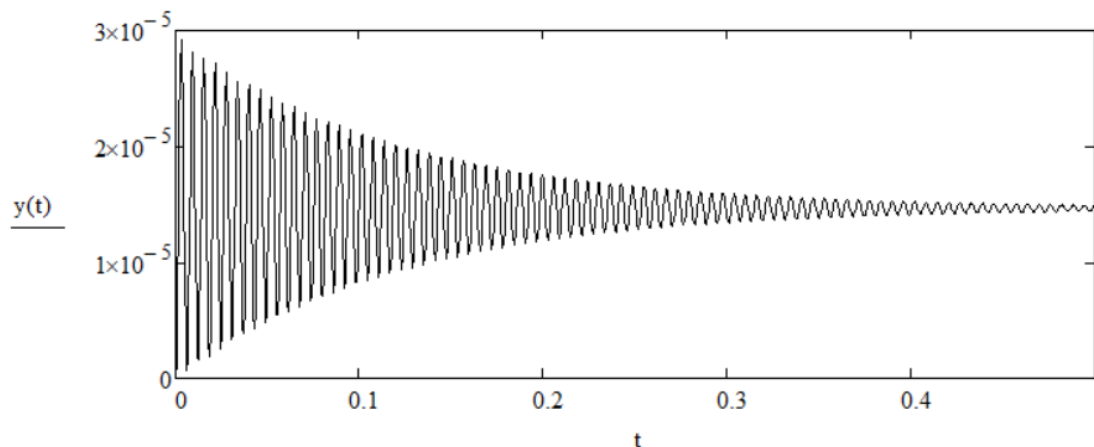


Рис. 6 – Перехідна характеристика шпинделя

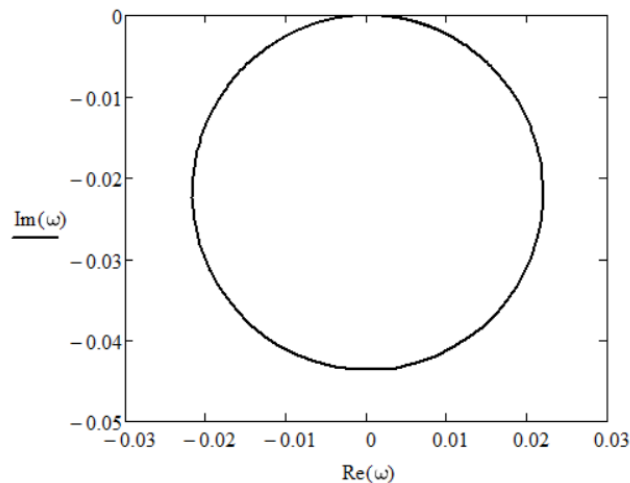


Рис. 7 – Амплітудо-фазова-частотна характеристика

Висновки і пропозиції. Отже, спеціалісти машинобудівної галузі повинні знати та вміти використовувати спеціальні програмні пакети, з метою спрощення проектування розрахунку та моделювання елементів різноманітних механізмів, та зокрема верстатного обладнання. Відповідно при підготовці фахівців слід звертати особливу увагу на різноманітні засоби САПР та області їх використання. Знання широкого спектру спеціальних програмних пакетів різного напрямлення дозволить більш ефективно виконувати розрахунки, проектування та різноманітні дослідження вузлів обладнання. А також полегшить та підвищить якість підготовки необхідної технічної документації.

УДК 531.374

Роман Комар, к.т.н., доц.; Петро Комар

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ФРЕЗАМИ ІЗ ЗМІННИМИ ПЛАСТИНАМИ

Анотація. Розглянуто особливості технологій оброблення торцевих поверхонь фрезами із змінними ріжучими пластинами. Описано окремі аспекти технологічних процесів оброблення ускладнених конструктивних елементів.

Ключові слова: технологія, обробка, фрезерування, торцева поверхня, змінна пластина.

Roman Komar, Ph.D., Assoc. Prof.; Petro Komar

RESEARCH OF THE TECHNOLOGY OF PROCESSING END SURFACES WITH CUTTERS WITH INTERCHANGEABLE PLATES

Abstract. Features of end surface processing technologies with milling cutters with replaceable cutting plates are considered. Some aspects of technological processes of processing complex structural elements are described.

Keywords: technology, processing, milling, end surface interchangeable plate.

На даний час фрезерування є універсальним методом обробки різнотипних поверхонь у сучасному машинобудуванні. Протягом декількох останніх років поряд з удосконаленням технологічного обладнання відбулося значне розширення області застосування фрезерного інструменту у технологіях оброблення торцевих поверхонь, яке пов'язане із вдосконаленням конструкцій різальних інструментів, застосуванням сучасних матеріалів. Тому перед сучасним технологом вибір способу обробки неоднозначний. Особливо з урахуванням того, що до традиційних областей використання фрез додалися такі як виготовлення отворів, обробка кишень і вибірок, обробка поверхонь обертання, різьб і т.д. Технології та інструментальне оснащення також постійно допрацьовуються з метою підвищення продуктивності, надійності і якості обробки.

Фрези із змінними пластинами є найбільш перспективним інструментом для обробки торцевих і плоских поверхонь. Основною перевагою є можливість швидкої заміни зношених чи поламаних лез та забезпечення високої точності обробки завдяки можливості їх регулювання. Відповідно швидко зростає роль фрез в обробці складних криволінійних поверхонь на обробних центрах, автоматичних лініях і верстатах багатоцільового призначення.

Особливу увагу заслуговують конструкції сучасних різальних пластин. Твердосплавні пластини конструюють таким чином, щоб забезпечити високу продуктивність і стійкість інструменту для різних матеріалів і умов обробки. Підвищення продуктивності та стійкості забезпечується за рахунок геометрії передньої поверхні пластини (наявність і розмір захисної фаски, кут її нахилу), марки твердого сплаву (співвідношення міцності і зносостійкості), і конструкції пластини (форма та інші параметри пластини).

Найчастіше зустрічаються чотиригранні і тригранні змінні твердосплавні пластини. У старіших конструкціях фрез використовуються квадратні (4 ріжучих кромки), трикутні (3 ріжучих кромки) або пластини типу «ламаний трикутник» (3 ріжучих кромки). Інструмент з такими пластинами забезпечує прийнятні результати по продуктивності обробки і якості отриманих поверхонь, але значно програє за цими показниками фрезам зі спеціально спрофільованими пластинами. При їх застосуванні

на обробленій поверхні отримується ідеально рівна, якісна поверхня із високою шорсткістю. Найбільш перспективною технологією, закладеної в конструкцію фрез, є технологія покрокового врізання. Ріжуча кромка центральної чотиригранної пластини має форму хвилі. Першим проводить різання один з виступів на центральній пластині, формуючи на торці деталі кільцевий надріз. Технологія покрокового врізання дозволяє стабілізувати інструмент і максимально знизити ймовірність його відводу від траєкторії оброблюваної поверхні. Крім того, значно знижуються сили різання.

При торцевому фрезеруванні, по можливості, необхідно уникати фрезерування площин з перетином пазів і отворів, так як при цьому ріжучі кромки будуть працювати в незадовільних умовах переривчастого різання. Операції обробки отворів необхідно виконувати після фрезерування. Якщо такий варіант неможливий, то при перетині фрезою отворів потрібно знизити величину подачі на 50% від рекомендованої. При обробці великих площин потрібно не переривати контакт фрези із заготовкою, обходячи поверхню по периметру, а не за кілька паралельних проходів. Обробку кутів необхідно здійснювати по радіусу, що перевищує радіус фрези, щоб виключити виникнення вібрацій, пов'язаних з різким збільшенням кута охоплення фрези.

Наскрізні та закриті з однієї сторони канавки обробляють фрезеруванням дисковими фрезами. Фрезерування канавки відбувається за один-два проходи. Цей спосіб найбільш продуктивний і забезпечує достатню точність ширини канавки. Використання цього способу обмежує конфігурація канавок: закриті канавки з закругленнями на кінцях не можна виготовити цим способом. Такі канавки виготовляються кінцевими фрезами за один або декілька проходів. Фрезерування кінцевою фрезою за один прохід відбувається таким чином: спочатку фреза при вертикальній подачі проходить на повну глибину канавки, а потім вмикається повздовжня подача, на якій шпонкова канавка фрезерується на повну довжину. При цьому способі потрібне потужне обладнання, міцне закріплення фрези та інтенсивне охолодження. Але такий спосіб дає неточний розмір канавки за шириною внаслідок зносу діаметру фрези.

Чорнове фрезерування шліців, в особливості великих діаметрів інколи проводиться фрезами на горизонтально-фрезерних верстатах, що мають поділкові механізми. Методом копіювання виготовляють шліци за допомогою шліцьової дискової фрези; розподільно за допомогою трьох фрез (спочатку двома фрезами фрезерують бокові поверхні шліців, а потім третьою фрезою внутрішню поверхню шліців); двома дисковими фасонними фрезами. Чистове фрезерування шліців дисковими фрезами дозволяється у випадку відсутності спеціального верстата або інструмента, тому що воно не дає достатньої точності за кроком і ширині шліців. Існує метод нарізання прямо бічних шліців попереднім фрезеруванням фасонними дисковими фрезами і чистовим фрезеруванням бокових поверхонь шліців торцевими фрезами, оснащеними пластинами із твердого сплаву.

Основним геометричним параметром фрез є головний кут в плані. Він вимірюється між периферійною ріжучою кромкою і площиною торця фрези і визначає напрямок сил різання і товщину проникнення ріжучого інструменту. Вибір геометрії пластин умовно спрощений до трьох областей, що розрізняються характером різання: легка, середня і важка геометрія. Характерним для торцевого фрезерування є те, що діаметр фрези значно більший, ніж ширина обробки і вісь фрези знаходиться поза оброблюваною поверхнею. В цьому випадку рекомендується вибирати діаметр фрези, що перевищує ширину фрезерування на 20-50%. Якщо обробка може бути проведена за кілька проходів, то ширина різання за кожен прохід повинна бути рівною $3/4$ діаметра фрези. При цьому формування стружки і навантаження на різальну кромку будуть оптимальними.

УДК 621.9

Дмитро Коновалов, Володимир Крупа, к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ЗОВНІШНІХ РІЗЕЙ ЗА КЛАСИФІКАЦІЙНИМИ ОЗНАКАМИ

Анотація. Здійснено аналіз способів фрезерування різей, виділено ряд їх класифікаційних ознак. Проаналізовано методи формоутворення при різних видах фрезерування різей а також особливості співвідношення рухів інструменту та заготовки.

Ключові слова: схема, співвідношення, формоутворення

Dmytro Konovalov; Volodymyr Krupa, Ph.D., Assoc. Prof.

ANALYSIS OF METHODS OF MILLING EXTERNAL THREADS ACCORDING TO CLASSIFICATION SIGNS

Abstract. An analysis of the milling methods was carried out, and a number of their classification features were identified. Forming methods for different types of thread milling, as well as features of the correlation between the movements of the tool and the workpiece are analyzed.

Key words: diagram, ratio, form formation

На вибір способу обробки різей впливає значна кількість факторів, серед яких: необхідна ступінь точності, конструктивні розміри, потрібна якість поверхні, оброблюваний матеріал, продуктивність обробки тощо. Найбільшою продуктивністю серед інших відзначається метод нарізання різей фрезами. Різні способи різьфрезерування [1-8] відрізняються продуктивністю, точністю і якістю обробки, можливістю обробки заданих типів різей і реалізації на різних типах обладнання при використанні кінематичних схем з двома обертовими і рухами [9].

Попри значні переваги різьфрезерування має і свої недоліки, до яких слід віднести:

- вартість виготовлення інструментів, що значно перевищує наприклад вартість різців;
- необхідність контролю точності кожного зуба фрези;
- складність і дороговизна перезагострювання;
- точність профілю різі;
- необхідність забезпечення додаткових формоутворюючих рухів (у порівнянні із нарізанням різцями) тощо.

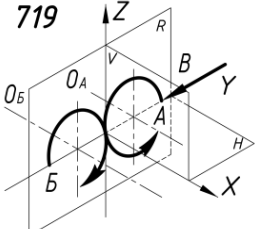
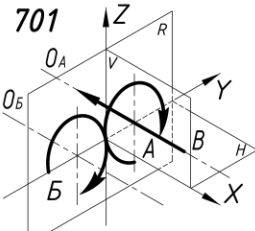
Здійснено аналіз формоутворюючих рухів при різних видах фрезерування, зокрема виділено наступні класифікаційні ознаки:

1. За способом реалізації рухів при різьфрезеруванні на різному типі обладнання.
2. За методом формоутворення різі: копіюванням, дотику, огинанням.
3. По куту нахилу осей інструменту і нарізання різі: паралельні, перетинаються під розрахунковим кутом, перпендикулярні.
4. За розташуванням осей інструменту і нарізаної різьби: осі розташовані в одній площині, схрещуються.
5. Кінематичні схеми: всі способи відносяться до 7-ої групи кінематичних схем з двома обертовими та одним поступальним рухами [9].
6. Щодо швидкостей головного руху та руху подачі.

Аналіз за даними ознаками поданий в таблиці

Таблиця. Аналіз особливостей різних способів фрезерування різей

Спосіб фрезерування	Метод формоутворення (твірна+напрямна)	Кінематична схема [9]	Співвідношення оборотних рухів
Кінцевою фрезою	Копіювання+ дотику	<p>703</p>	$\frac{n_i}{n_d} = \frac{\pi D}{s_d \cdot z}$
Дисковою фрезою	Копіювання+ дотику	<p>707</p>	$\frac{n_i}{n_d} = \frac{\pi D}{s_d \cdot z}$
Гребінчастою фрезою	Копіювання+ дотику	<p>701</p>	$\frac{n_i}{n_d} = \frac{\pi D}{s_d \cdot z}$
Торцевою фрезою	Копіювання+ дотику або Сліду+дотику	<p>702</p>	$\frac{n_i}{n_d} = \frac{\pi D}{s_d \cdot z}$
Вихрове нарізання	Копіювання+ дотику	<p>707</p>	$\frac{n_i}{n_d} = \frac{\pi D}{s_d \cdot z}$
Черв'ячною фрезою	Огинання +дотику	<p>719</p>	$\frac{\omega_i}{\omega_d} = \frac{z_d}{z_i}$

Фрезоточіння	Копіювання+ дотику		$\frac{n_i}{n_d} = \text{ціле число}$
Токарно-фрезерна обробка	сліду+ дотику		$\frac{\omega_i}{\omega_d} = 0,8 \dots 1,2$

Де n_i – частота обертання інструмента; n_d – частота обертання заготовки; D – діаметр нарізуваної різі; s_z – подача на зуб фрези; z – кількість зубів фрези; ω_i – кутова швидкість обертання інструменту; ω_d – кутова швидкість обертання заготовки;

Дане дослідження дозволяє вибрати потрібний метод та пристрій різьфрезерування для його використання в технологічному процесі.

Перелік посилань

1. Шанайда В. Аналіз геометричної моделі процесу фрезерування внутрішніх замкових різей / В. Шанайда, Р. Склярів, О. Редько // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 74. — № 2. — С. 144-150.

2. Мазур, М. П.; Соколан, К. С. Особливості конструювання гребінчастих фрез із механічним кріпленням твердосплавних непереточуваних пластинок. Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2020 (283). С. 261-264

3. Григурко, І. О., Доценко, С. М. Вихровий метод фрезерування трапеціоїдної різьби. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2020. (22), 311-315.

4. Канарєєв, Ф. М., Новиков, П. А., Харченко, О. О. Підвищення точності внутрішніх різьб (М3... М6) та продуктивності їх формоутворення в деталях з алюмінієвих сплавів. Вісник ЖДТУ. Серія" Технічні науки", 2012, (1 (60)), С. 14-20.

5. Кондратюк, О. Л.; Сичов, Ю. І.; Скоркін, А. О. Дослідження точності різьби при охоплюючому різьбофрезеруванні. Системи обробки інформації, 2010, 9: 58-60.

6. Псюк М. І. Перспективи підвищення якості різьбових з'єднань технологічними засобами при їх виготовленні. Молода наука. Технологія машинобудування : збірник наукових праць всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих вчених. Краматорськ: ДДМА, 2016. С. 150-151

7. High precision threading performance // Sandvik Coromant: website. Режим доступу: <http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionDocuments/downloads/global/brochures/engb/C-1040-092.pdf> (Дата доступу 25.03.2024).

8. Thread Whirling on CNC Turning Machines // Cncmanual: website. Режим доступу: <http://cncmanual.com/thread-whirling-on-cnc-turning-machines/> (Дата доступу 25.03.2024).

9. Равська Н.С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці [текст] / Н.С. Равська, П.П. Мельничук, О.В. Мамлюк, Т.П. Ніколаєнко, О.А. Охрімченко. – К.: 2013, 215 с.

УДК 621.01

Віталій Корендій, к.т.н., доц.; Олег Паращин; Володимир Гелетій, к.т.н., доц.
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ ЛІНІЙНИХ, ЕЛІПТИЧНИХ І КОЛОВИХ КОЛИВАНЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВІБРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН ЗА ДОПОМОГОЮ ВІБРОЗБУДНИКІВ ПЛАНЕТАРНОГО ТИПУ

Анотація. У роботі представлено окремі результати досліджень кінематики керованого віброзбудника планетарного типу, який може бути використаний у приводі різних вібраційних технологічних машин (сепараторів, трамбівок, конвеєрів тощо).

Ключові слова: динамічна схема, кінематична схема, траєкторія, моделювання.

Vitaliy Korendiy, Ph.D., Assoc. Prof.; Oleh Parashchyn; Volodymyr Heletiy, Ph.D., Assoc. Prof.,

IMPLEMENTATION OF RECTILINEAR, ELLIPTICAL AND CIRCULAR OSCILLATIONS OF WORKING MEMBERS OF VIBRATORY TECHNOLOGICAL MACHINES WITH THE HELP OF PLANETARY-TYPE VIBRATION EXCITERS

Abstract. The paper presents some results of investigations on the kinematics of a controllable planetary-type vibration exciter that can be used to actuate various vibratory technological machines (screens, sieves, tampers, compactors, rammers, conveyors, etc.).

Keywords: dynamic diagram, kinematic diagram, trajectory, modeling.

Вібраційні технологічні машини є важливим інструментом у багатьох галузях промисловості, забезпечуючи високу ефективність і якість виконання різних технологічних процесів. Вібраційні машини широко використовуються для виконання таких операцій, як сепарація, змішування, транспортування, очищення, просушування та механічна обробка матеріалів. Завдяки вібраціям, які створюються за допомогою збуджувачів різних типів (дебалансні, ексцентрикові, електромагнітні, пневматичні тощо), ці машини здатні забезпечити рівномірний розподіл матеріалів вздовж робочого органу і високу швидкість обробки.

Одним з основних типів вібраційних машин є вібраційні сита, які широко застосовуються для класифікації та сортування сипких і дрібноштучних матеріалів за розміром часток. Ці сита можуть працювати з різними типами матеріалів, від зерна до гірничих порід, забезпечуючи високу точність і продуктивність процесу. Вібраційні транспортери також є важливими в системах транспортування сипких і дрібноштучних матеріалів, дозволяючи ефективно переміщувати продукцію на виробничих лініях.

Вібраційні машини для обробки поверхонь використовуються для очищення, просушування, знежирення, притирання, полірування та поверхневого зміцнення деталей. Вони широко застосовуються у виробництві деталей для автомобільної, аерокосмічної, медичної та інших галузей, де потрібна висока якість поверхні та точність обробки. Вібраційні обробні машини можуть використовувати різні типи абразивних матеріалів і рідин для досягнення бажаного ефекту обробки.

Вібраційні ущільнювачі ґрунту і бетону застосовуються в будівництві для забезпечення високої щільності матеріалів і зниження ризику утворення порожнин. Ці машини використовуються для ущільнення фундаментів, доріг, тротуарів та інших будівельних конструкцій. Завдяки вібраційному впливу, досягається рівномірний розподіл матеріалу вздовж ущільнюваної поверхні та висока міцність конструкцій.

Таким чином, вібраційні технологічні машини є невід'ємною частиною сучасного виробництва, забезпечуючи високу продуктивність і якість виконання

технологічних процесів. Вони дозволяють оптимізувати виробничі процеси, знизити витрати і підвищити конкурентоспроможність продукції на ринку.

Одним із основних елементів будь-якої вібраційної технологічної машини є віброзбудник. Саме параметри останнього у значній мірі визначають ефективність виконання тих чи інших технологічних операцій. На відміну від низки класичних віброзбудників дебалансного, ексцентрикового чи електромагнітного типів, у даній роботі буде проаналізовано можливості забезпечення регульованих траєкторій коливань робочих органів вібраційних технологічних машин шляхом використання керованого віброзбудника планетарного типу.

Спрощена динамічна схема вібраційної технологічної машини, оснащеної пропонованим віброзбудником планетарного типу, та, безпосередньо, кінематична схема механізму віброзбудника подані на рис. 1. Тіло масою m_1 здійснює коливання у площині xOy (вздовж горизонтальної осі Ox та вертикальної осі Oy) та встановлене на нерухомій основі за допомогою чотирьох пружно-демпфувальних елементів. Останні характеризуються коефіцієнтами жорсткості k_x, k_y та коефіцієнтами в'язкого опору c_x, c_y . Коливання системи генеруються за рахунок дії інерційних сил, що впливають на сателіт (планетарну шестерню) (масу m_2) та неврівноважену масу m_3 під час їх обертання навколо двох взаємно перпендикулярних осей, розташованих у шарнірах O та E .

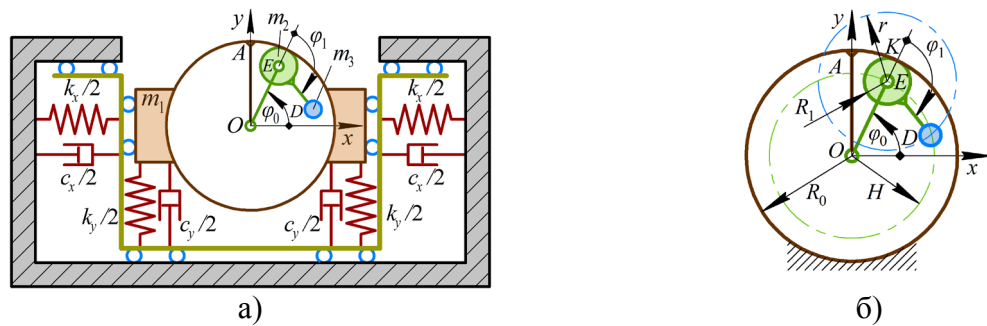


Рис. 1. Динамічна схема вібраційної технологічної машини (а) та кінематична схема механізму віброзбудника планетарного типу (б)

Згідно з кінематичною схемою механізму віброзбудника планетарного типу (рис. 1б) прийнято, що корона (епіцикл) є фіксованою, тоді як обертання водила OE характеризується кутовою координатою φ_0 . Враховуючи геометричні параметри механізму ($R_0 = OK, R_1 = EK, H = OE, r = ED$) і приймаючи постійну кутову швидкість водила ω_0 , визначимо основні співвідношення між кутами φ_0 і φ_1 :

$$\varphi_0 = \omega_0 \cdot t; \quad \varphi_1 = -\varphi_0 \cdot [(H + R_1)/R_1] = -k \cdot \omega_0 \cdot t, \quad (1)$$

$$\text{де } k = (H + R_1)/R_1.$$

Беручи до уваги систему координат xOy з початком у точці O , виведемо аналітичні вирази для визначення горизонтального та вертикального положення неврівноваженої маси D :

$$x_D = H \cdot \cos \varphi_0 + r \cdot (\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_0 - \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_0); \quad (2)$$

$$y_D = H \cdot \sin \varphi_0 + r \cdot (\cos \varphi_1 \cdot \sin \varphi_0 + \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_0). \quad (3)$$

При виконанні кінематичного аналізу більш інформативним є розгляд безрозмірних аналогів переміщень замість їх абсолютних значень:

$$\dot{x}_D = x_D/R_0, \quad \dot{y}_D = y_D/R_0. \quad (4)$$

Під час обертання водила з постійною кутовою швидкістю достатньо розглянути його один оберт, щоб побудувати відповідні траєкторії руху невідбалансованої маси в безрозмірних величинах згідно рівнянь (4). Результати моделювання (рис. 2), проведеного у програмному продукті Wolfram Mathematica, були отримані для наступних співвідношень між геометричними параметрами механізму: $H/R_0 = 0.5$ і $R_1/R_0 = 0.5$, тоді як відношення r/R_1 і початковий кут відхилення водила $\varphi_0(t=0, \varphi_1=0) = \Phi_0$ вважаються змінними.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що колову траєкторію руху незвідбалансованої маси можна отримати, коли відстань між масою і віссю обертання сателіта дорівнює нулю ($r/R_1 = 0$). Всі інші співвідношення r/R_1 в діапазоні $(0..1)$ забезпечують еліптичні траєкторії, великі осі яких утворюють кути Φ_0 з віссю Ox . Аналогічно, співвідношення $r/R_1 = 1$ дозволяє генерувати прямолінійний рух незвідбалансованої маси під різними кутами Φ_0 до горизонтальної осі.

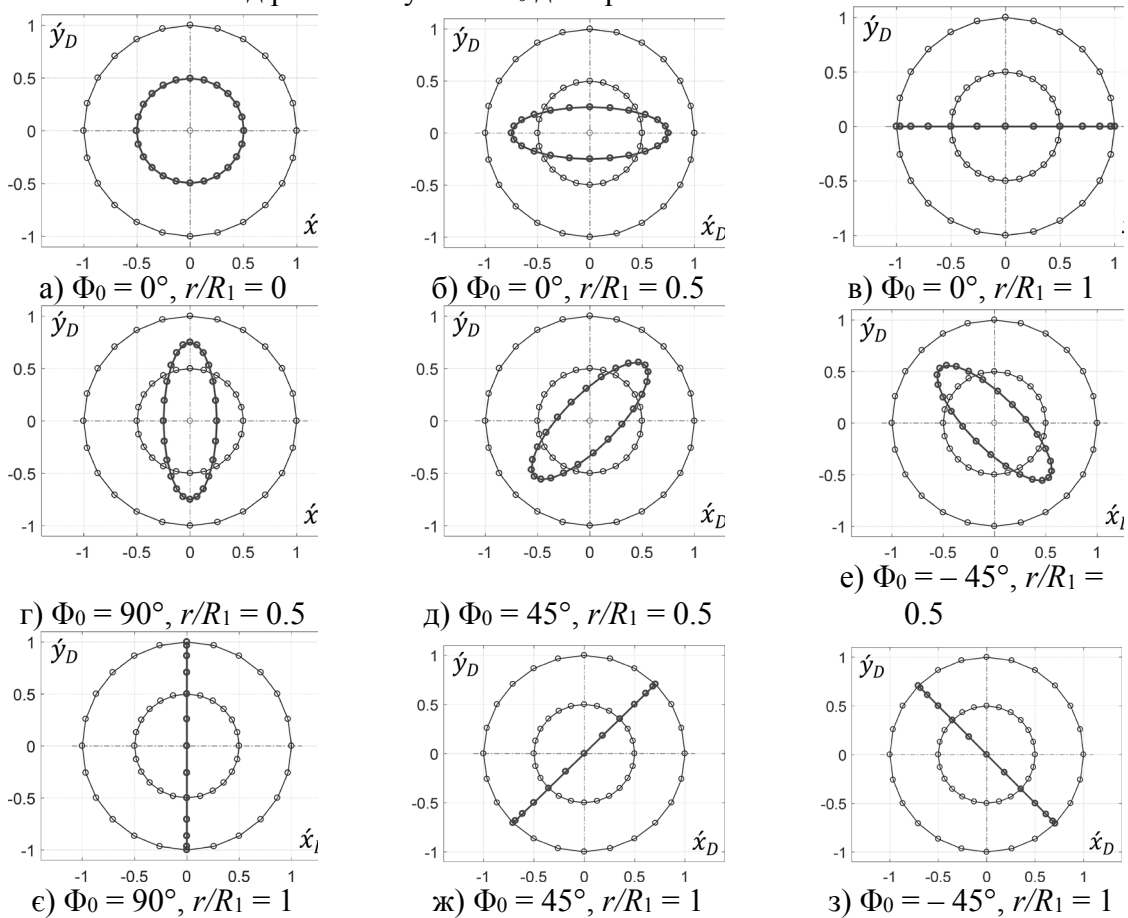


Рис. 2. Безрозмірні траєкторії незбалансованої маси вібробудника

Розглядаючи можливу практичну реалізацію отриманих результатів, можна зробити наступні висновки. Вертикальні прямолінійні та еліптичні траєкторії незбалансованої маси і, як наслідок, робочого органу можуть бути використані у віброущільнювальних і трамбувальних машинах. Горизонтальні прямолінійні та кругові траєкторії можуть бути реалізовані в просіювальному обладнанні (вібростатах, вібросепараторах). Кругова траєкторія руху робочого органу може бути використана у вібраційних притиральних і полірувальних машинах. Похилі прямолінійні та еліптичні траєкторії є доцільними для конвеєрного обладнання. Таким чином, запропонований вібробудник планетарного типу потенційно дозволить забезпечувати регульовані траєкторії робочого органу в залежності від конкретних технологічних потреб.

УДК 621.9.01

Максим Новіцький; Андрій Сліпчук, к.т.н., доц.

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДЕМПФЕРІВ КОЛИВАНЬ В КОНСТРУКЦІЇ ВІБРОСТІЙКОГО МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Анотація. Розглянуто особливості використання сухого та в'язкого тертя в конструкціях металорізального інструменту в якості демпфера енергії коливань. Розроблено та досліджено математичну модель двомасової коливальної схеми вставного ножа збірної фрези, одна із мас якої моделює защемлену частину ножа – пресове з'єднання із сухим тертям, а інша – консольну частину, що піддається впливу автоколивань, які можливі в процесі різання металу. Проаналізовано вплив сухого тертя в пресовому з'єднанні ножа на амплітуду резонансних коливань різця та деталі. Показано можливість ефективного гасіння амплітуди автоколивань різця за рахунок оптимального вибору параметрів пресового з'єднання вставних ножів із корпусом збірної фрези. Проведено оцінку впливу внутрішнього в'язкого тертя в матеріалах із високим рівнем демпфування енергії на амплітуду автоколивань різця та розглянуто можливість їх використання в конструкції вібростійкого металорізального інструменту. Ключові слова: автоколивання, демпфування енергії коливань, конструкційне демпфування, амплітуда коливань, якість поверхні деталі.

Maksym Novitskyi; Andrii Slipchuk, Ph.D., Assoc. Prof.

FEATURES OF THE USE OF VIBRATION DAMPERS IN THE DESIGN OF VIBRATION-RESISTANT METAL CUTTING TOOLS

Abstract. The paper considers the features of using dry and viscous friction in the construction of metal-cutting tools as a damper of oscillation energy. A mathematical model of a two-mass oscillatory scheme of the insertion knife of a assembled milling cutter was developed and studied, one of the masses of which models the clamped part of the knife - a press connection with dry friction, and the other - the cantilever part, which is subject to self-oscillations that are possible in the process of metal cutting. The influence of dry friction in the press joint of the knife on the amplitude of resonant oscillations of the cutter and the part was analyzed. The possibility of effective damping of the amplitude of self-oscillations of the cutter due to the optimal choice of parameters of the press connection of insert knives with the body of the assembled milling cutter is shown. The influence of internal viscous friction in materials with a high level of energy damping on the amplitude of self-oscillations of the cutter was evaluated and the possibility of their use in the design of a vibration-resistant metal-cutting tool was considered.

Keywords: self-oscillation, damping of vibration energy, structural damping, vibration amplitude, surface quality of the part.

В сучасному машино-, приладо- і кораблебудуванні, особливо в авіаційній і ракетній техніці, хімічному і енергетичному машинобудуванні паралельно з полімерними композиційними матеріалами широке використання знаходять корозійно-стійкі та жароміцні сталі і сплави.

Всі ці матеріали належать до важкооброблюваних. При їх обробці різанням спостерігаються більш інтенсивні вібрації, чим при різанні вуглецевих та низьколегованих конструкційних сталей при тих же умовах, що призводить до втрати якості поверхні деталей.

Характерною особливістю процесу різання важкооброблюваних сплавів є схильність пружної технологічної системи до інтенсивних вібрацій. У випадку жароміцних титанових сплавів це пояснюється, перш за все, великими значеннями нормальної складової сили різання відносно тангенціальної. Причиною служить мала пластичність та високі коефіцієнти тертя титанових сплавів. Крім цього, різко виражена елементність стружки, яка росте із збільшенням перерізу зрізу та швидкості різання, а також нестійке наростування та заїдання служать додатковим джерелом збудження параметричних та вимушених коливань. У випадку оброблення різанням корозійно-стійких і жароміцних сплавів виникають інтенсивні автоколивання технологічних систем. Це пояснюється як великими силами різання так і великими значеннями коефіцієнта усадки стружки. Це призводить до збільшення фазової характеристики сили різання (відставання до критичних значень) і, як наслідок, різкого збільшення амплітуди автоколивань.

Колівання, які виникають в металорізальних верстатах під час обробки цих матеріалів суттєво ускладнюють процес отримання якісної поверхні деталі та зменшують стійкість інструментів.

Одним із основних та ефективних методів зменшення амплітуди вимушених та параметричних коливань технологічних систем є відходження від резонансу. Елементність стружки та сам процес стружкоутворення у випадку оброблення титанових сплавів має яскраво виражену частотну складову. Виходячи з цього, по можливості, і вибирають режими різання [1]. Якщо використання таких режимів різання є неможливе, то для зменшення амплітуди коливань використовують явища демпфування в системі ВПД, що теж може давати позитивний ефект, оскільки вони відбуваються біля резонансу.

У випадку автоколивань, які здійснюються на резонансній частоті різця та деталі, то ефективним методом боротьби з цим явищем є лише демпфування. Демпфування буває активне та пасивне. Демпфування слід вводити в той елемент системи ВПД, маса якого є найменшою [2]. Тобто, якщо маса різця є меншою від маси деталі, то демпфувати необхідно коливання різця. Одним із ефективних демпферів таких коливань є гістерезис елементів ВПД. Гістерезис може бути як конструкційним [2], який відбувається в нерухомих з'єднаннях механізмів технологічних систем, так і внутрішнім, який виникає в матеріалах, що мають високий рівень розсіювання енергії коливань.

Активні демпфери більш ефективні. Їх дія заснована на створенні протифазної вібрації сили за допомогою різних джерел коливань [4]. Джерелами коливань можуть служити електричні, гідравлічні та пневматичні перетворювачі [5]. Система управління активного демпфера дозволяє змінювати частоту протифазної сили в досить широких межах, що дозволяє значно розширити область застосування даних пристроїв, але застосування даного виду демпферів обмежується їх надмірною складністю, високою вартістю і збільшенням споживання електроенергії.

В даній роботі розглядається спосіб визначення демпфувальної здатності ріжучого інструмента – вставного ножа збірної фрези в процесі його резонансних коливань та визначаються межі існування оптимальних значень сили тертя в пресовому з'єднанні вставного ножа для ефективного демпфування автоколивань системи ВПД. Також, для порівняння, розглядається такий перспективний напрям зменшення амплітуди автоколивань технологічної системи ВПД як демпфування енергії, засноване на використанні матеріалів, що мають високий рівень внутрішнього розсіювання енергії коливань.

Як видно на рис. 1,а, ніж 3 встановлено в паз фрези 1 та закріплено пресовим з'єднанням з допомогою клина 2. В більшості випадків самі ножі виконують у вигляді

клина, однак така конструктивна схема є складнішою для розрахунків (несиметричною), тому розглянемо простішу схему, оскільки всі подальші висновки будуть справедливими і для складніших схем кріплення.

Як відомо [2], в процесі навантаження пресового з'єднання осьовою силою, деформація, викликана цією силою, поширюватиметься на певну величину, яка буде пропорційною відношенню цієї сили до величини сили тертя пресового з'єднання. І якщо ці сили будуть рівними, то відбудеться зсув деталі в з'єднанні. В даному випадку зсув деталі буде неможливий, оскільки задній торець вставного ножа впирається в торець паза корпусу фрези. Однак робота сили тертя буде здійснюватися на всій довжині пресового з'єднання. Якщо ж величина осьової сили буде меншою від сили тертя, то настільки ж меншою буде зона деформації, і меншою буде робота сили тертя.

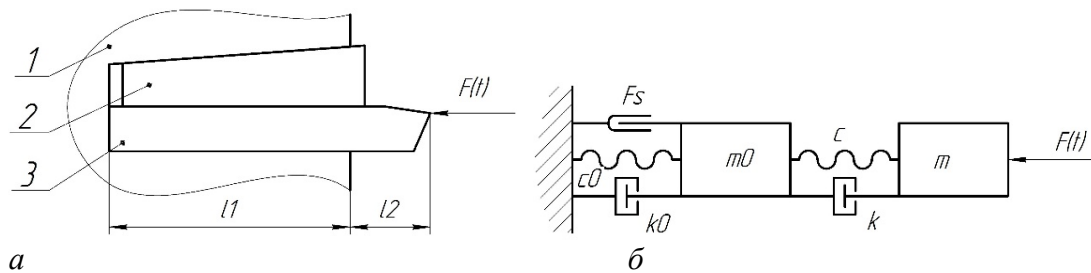


Рис. 1. Конструктивна (а) та розрахункова (б) схеми пресового з'єднання

Розрахунок демпфування в такому з'єднанні можливо (і доцільно) виконати за допомогою методу скінченних елементів із рухомими границями, оскільки величина зони деформації визначатиме жорсткість та рухому масу ножа. Однак цей метод, на жаль, ще не впроваджено в такі програми як MATLAB чи SolidWorks, тому його використання вимагає серйозної професійної кваліфікації в даному напрямі теоретичних досліджень. Другим недоліком цього методу є те, що математичне моделювання автоколивань металорізального верстата можливе лише в дискретній моделі, а використання континуальної моделі в дискретній є неможливе.

Для вирішення цієї проблеми і здійснюється спроба описати конструктивну схему, подану на рис. 1,а системою диференціальних рівнянь (1), розрахункову схему якої показано на рис. 1,б.

Як видно із розрахункової схеми, масу вставного ножа умовно замінено двома приведеними масами m та m_0 , а жорсткість – двома жорсткостями c та c_0 . Причому на масу консолі ножа m діє лише демпфер в'язкого внутрішнього тертя в його матеріалі, а на масу защемленої частини ножа ще й сила тертя.

$$\frac{d^2x}{dt^2}m - c(x - x_0) - k\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_0}{dt}\right) + F(t) = 0$$

$$\frac{d^2x_0}{dt^2}m_0 + c(x - x_0) + k\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_0}{dt}\right) - cx_0 - k_0\left(\frac{dx_0}{dt}\right) - F_s = 0$$

Аналіз результатів математичного моделювання вказує на те [2], що оптимальне значення контактного тиску в пресовому з'єднанні вставних ножів збірної фрези може суттєво зменшити амплітуду автоколивань системи ВПД, а запропонована розрахункова схема, суть якої полягає в заміні одномасової схеми на двомасову, на якісному рівні адекватно описує коливання вставних ножів і може бути використана в математичному моделюванні автоколивань в металорізальних верстатах.

Застосування інструменту з підвищеними внутрішніми дисипативними властивостями теж дозволяє знизити амплітуду автоколивань в технологічній системі верстата, що виникають в процесі різання важкооброблюваних сталей і сплавів.

В цьому плані перспективним є напрям створення універсальних державок для різців із механічним кріпленням багатогранних пластин, які можуть бути виготовлені із сплавів високого демпфування, що широко використовуються в промисловості для виготовлення корпусних деталей дизельних двигунів внутрішнього згорання, рамних опорних конструкцій, пружних опор прецизійних верстатів, зубчастих коліс, лопаток парових та газових турбін з метою зменшення їх акустичної та вібраційної активності, а також підвищення втомної міцності.

Одним із перспективних матеріалів для виготовлення вібростійких державок різців є чавуни із пластинчатим графітом [2], причиною високого демпфування енергії в яких є мікропластичні деформації металічної матриці та графітових включень. Через це, демпфування в чавунах із глободним графітом є значно меншим, а демпфування в білому чавуні є близьке до сталі. Хоча фізико-механічні характеристики чавуну і дещо поступаються негартованій сталі 45, в більшості випадків вони є цілком достатніми для використання їх в якості матеріалу державок, особливо із врахуванням того факту, що логарифмічний коефіцієнт затухання в чавунах із зростанням температури – зростає (як і в сталях). Також слід відмітити високу залежність логарифмічного декременту чавунів від величини напруження, тобто демпфування зростає із збільшенням напруження в матеріалі державки.

Виготовлення універсальних державок різців та оправок із сплавів високого демпфування теж може суттєво підвищити вібростійкість інструменту в процесі різання корозійностійких та жароміцних хромонікелевих сталей і сплавів, а хоч матеріали із високим внутрішнім демпфуванням мають менші значення декременту згасань, їм властивий більш широкий частотний діапазон.

Отже, явище розсіювання енергії коливань в місці кріплення інструмента, або в самому інструменті, може використовувати для запобігання або обмеження коливань, що виникають в процесі різання важкооброблюваних матеріалів. При цьому демпфування в пресових з'єднаннях різців збірних інструментів доцільніше використовувати у випадку чорнових проходів, а використання сплавів із високим внутрішнім демпфуванням – для чистових.

Перелік посилань

1. Stupnytskyu V., Novitskyi Y., Novitskyi Y., Xianning S. Comprehensive system for simulation of vibration processes during the titanium alloys machining // *Archive of Mechanical Engineering*. – 2023. – Vol. 70, iss. 1. – P. 85–105.

2. Maksym Novitskyi, Yurii Novitskyi, Andrii Slipchuk. The possibility of using structural damping in the design of a prefabricated turning cutter to reduce the amplitude of self-oscillations in the process of metal cutting. *UJMEMS.2023;Volume 9, Number 4*: 44-50.

3. Внуков Ю. Н. Применение модуляции скорости главного движения фрезерного станка для гашения регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенных деталей / Ю. Н. Внуков, В. В. Натальчишин, А. И. Гермашев, М. В. Кучугуров, С. И. Дядя // *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. Серія : *Машинобудування*. - 2014. - № 3. - С. 12-17.

4. Внуков Ю. М., Дядя С. І., Кучугуров М. В., Кондратюк Є.В. Пристрій для дослідження автоколивань при токарній обробці. Патент України UA101906. (2015).

УДК 621.9.06

Геннадій Пасов, к.т.н., доц.; Антоніна Кологойда, к.т.н., доц.; Богдан Завертанний, Ph.D.

Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна

АНІМАЦІЯ РОБОТИ ГІДРОЦИЛІНДРІВ ТА ПНЕВМОКАМЕР ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПРЯМОЛІНІЙНОГО ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ

Анотація. В Національному університеті «Чернігівська політехніка» на кафедрі «Автомобільний транспорт та галузеве машинобудування» для вивчення навчальної дисципліни «Гідравліка та гідро- пневмоавтоматика» розроблено навчальний програмний продукт – «Анімація роботи гідроциліндрів та пневмокамер для створення прямолінійного поступального руху». Запропонований програмний продукт дозволяє зробити процес навчання більш яскравим, наочним та дешевим.

Ключові слова: анімація, гідроциліндр, пневмокамера, прямолінійний рух.

Hennadii Pasov, Ph.D., Assoc. Prof.; Antonina Kolohoida, Ph.D., Assoc. Prof.; Bohdan Zaveretannyi, Ph.D.

ANIMATION OF THE WORK OF HYDRAULIC CYLINDERS AND PNEUMATIC CHAMBERS TO CREATE STRAIGHT-LINE PROGRESSIVE MOVEMENT

Abstract. At the Chernihiv Polytechnic National University has developed an educational software product for the study of the disciplines “Hydraulics and Hydro-Pneumatic Automation” – “Animation of the operation of hydraulic cylinders and pneumatic chambers to create rectilinear translational motion”.

Keywords: animation, hydraulic cylinder, pneumatic chamber, rectilinear motion.

В Національному університеті «Чернігівська політехніка» на кафедрі «Автомобільний транспорт та галузеве машинобудування» для вивчення навчальних дисциплін «Спеціалізований рухомий склад», «Гідравліка та гідро- пневмоавтоматика», «Промислові роботи» розроблено навчальний продукт – «Анімація роботи гідроциліндрів та пневмокамер для створення прямолінійного поступального руху». Анімація розроблена для лабораторій «Промислові роботи» з реальними роботами: МП-11, М10П, М20П, РМ-01.

Під час розроблення анімаційного моделювання гідроциліндрів та пневмокамер для створення прямолінійного поступального руху було використано сучасний програмний продукт “3Ds Max”.

Гідропривод. Для створення прямолінійно-поступальний рух у сучасних верстатах особливо широко використовується гідропривод (рис. 1).

Принцип роботи гідроприводу полягає в наступному: масло з резервуара 1 подається насосом 2 під тиском через дросель 3 до золотникового крану 4. У залежності від положення крана 4 масло подається по правому 5 чи лівому мастилопроводах 6 у відповідну порожнину циліндра 7 і змушує переміщатися поршень зі штоком та зв'язаний з ними робочий орган. На рис. 2 представлено поетапні положення роботи розподільчого крану. На рис. 3-4 наведено проміжні положення роботи поршня гідроциліндра при прямому та зворотному рухах.

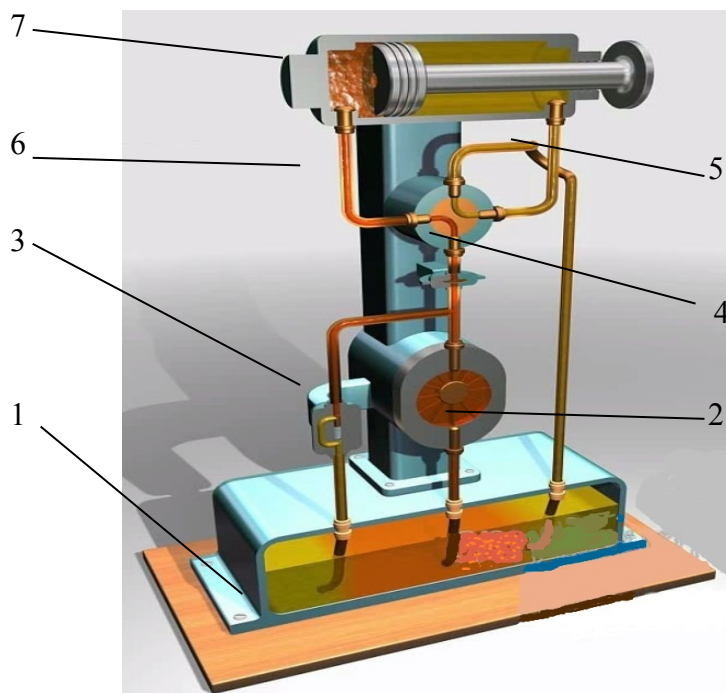


Рис. 1. 3D модель гідроприводу:
1 – резервуар; 2 – насос; 3 – дросель; 4 – кран; 5 – правий мастилопровід; 6 – лівий мастилопровід; 7 – циліндр

Для здійснення прямолінійного поступального руху необхідно знати максимальну силу циліндра F , яка розраховується за формулою:

$$F = p \cdot S$$

де p – максимально допустимий тиск, S – ефективна площа поршня.

Цю силу необхідно знати, наприклад у гідропідсилювачах самоскидів. Варіюючи вхідними показниками можна анімаційно вивчати роботу гідроприводу.

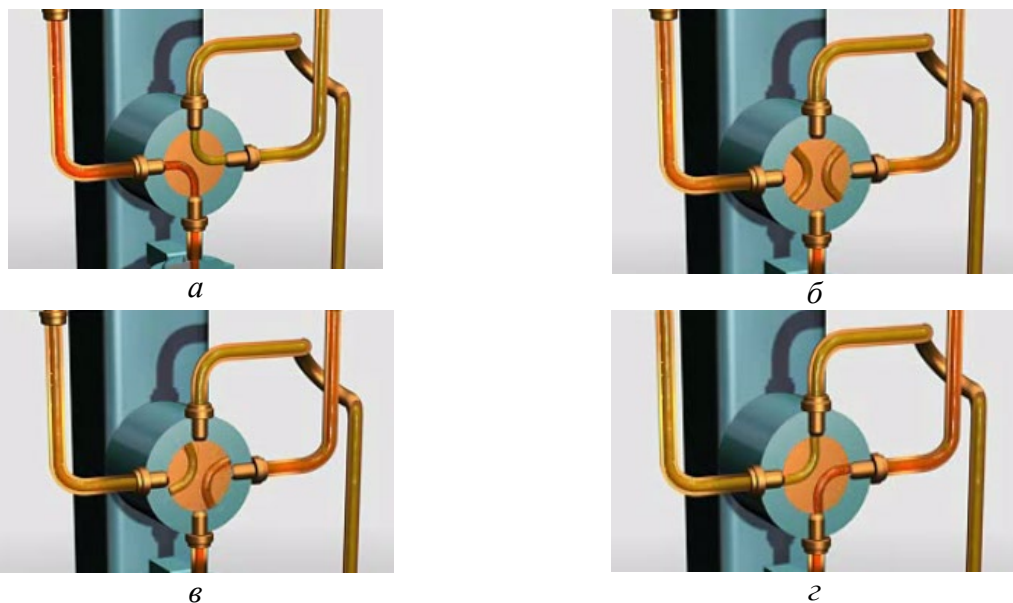


Рис. 2. 3D модель роботи розподільчого крану:
а – початкове положення; б, в – проміжні положення; г – кінцеве положення

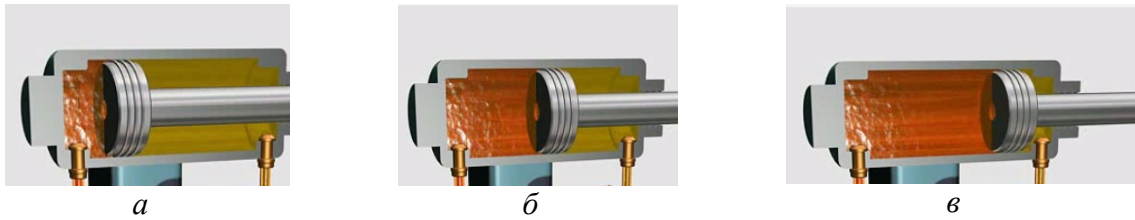


Рис. 3. 3D модель роботи гідроциліндру при прямому русі:
а – початкове положення; б, – проміжне положення; в – кінцеве положення

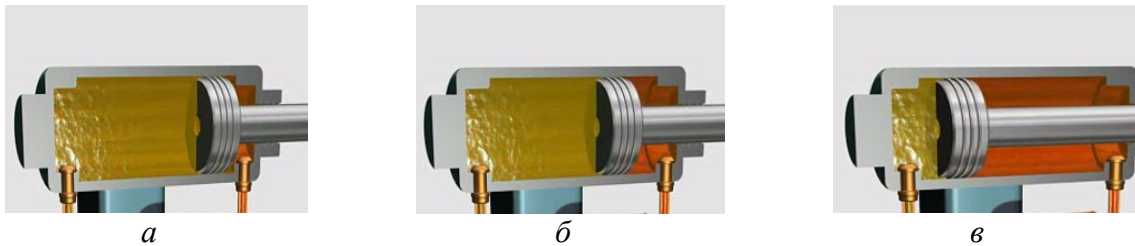


Рис. 4. 3D модель роботи гідроциліндру при зворотному русі:
а – початкове положення; б – проміжне положення; в – кінцеве положення

Пневмопривод. У сучасних верстатах для повідомлення робочим органам поступальних переміщень знаходять також широке застосування пневмоприводи. Для створення великих переміщень використовуються пневмоциліндри, а для коротких переміщень – пневмокамери. Пневмокамера складається з наступних складових частин: мембрани 1, пружини зворотного руху 2 та робочого поршня 3 (рис. 5). На рис. 6 представлено роботу пневмокамери при подачі в неї стиснутого повітря. На рис. 7 зображено повертання камери за допомогою пружини в початкове положення при відсутності подачі стиснутого повітря. Варіюючи входними показниками можна анімаційно вивчати роботу пневмокамери.

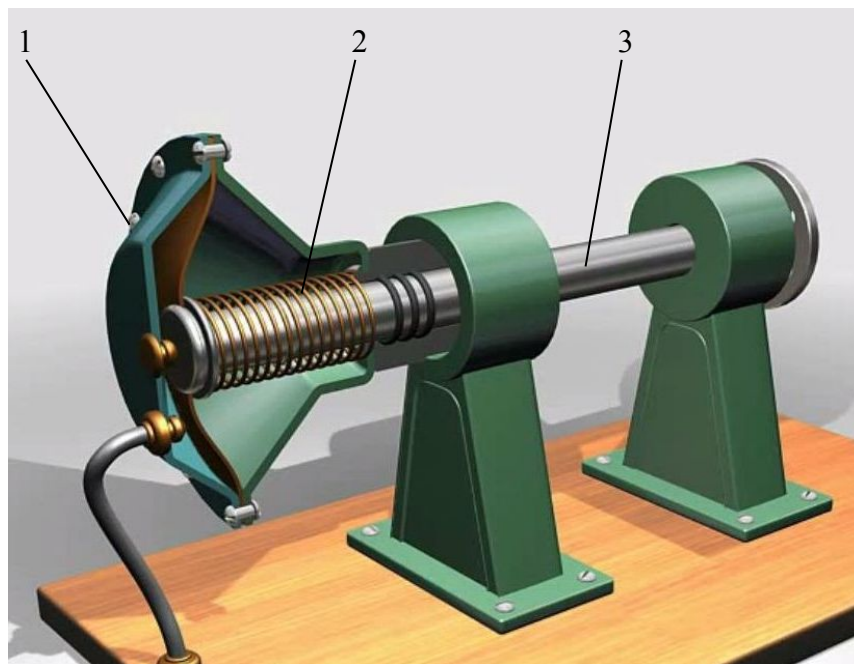


Рис. 5. 3D модель пневмокамери:
1 – мембрана; 2 – пружина зворотного руху; 3 – робочий поршень

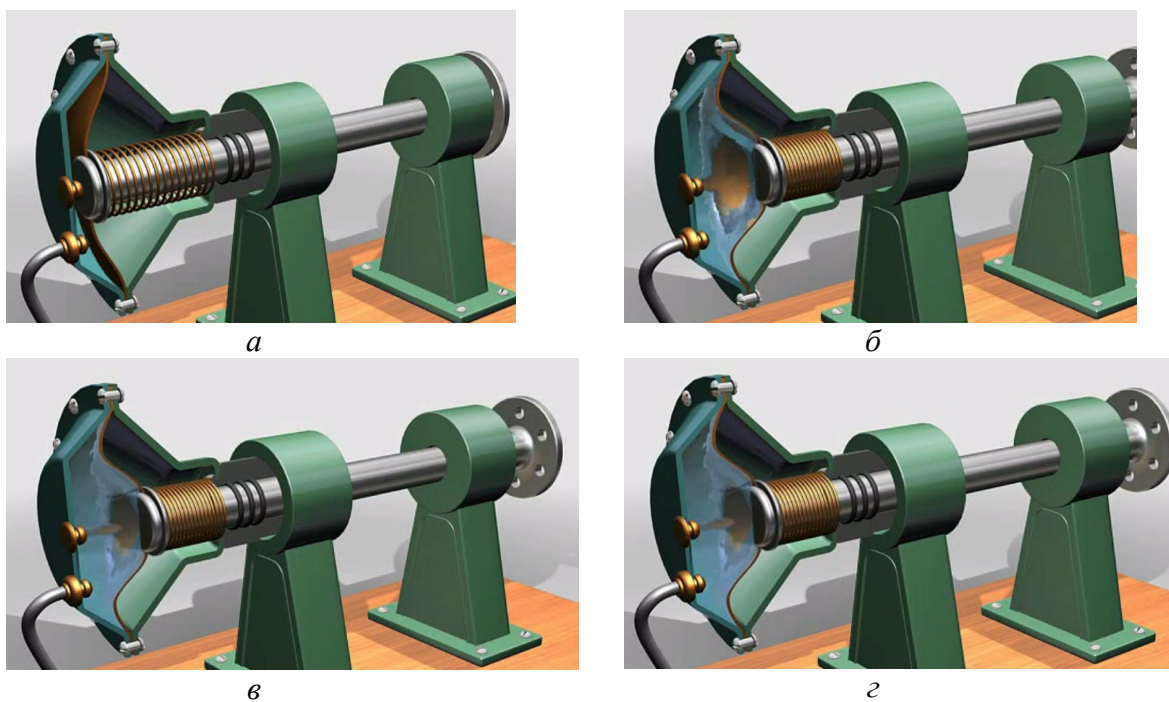


Рис. 6. 3D модель роботи пневмокамери при прямому русі:
а – початкове положення; б, в – проміжні положення; г – кінцеве положення

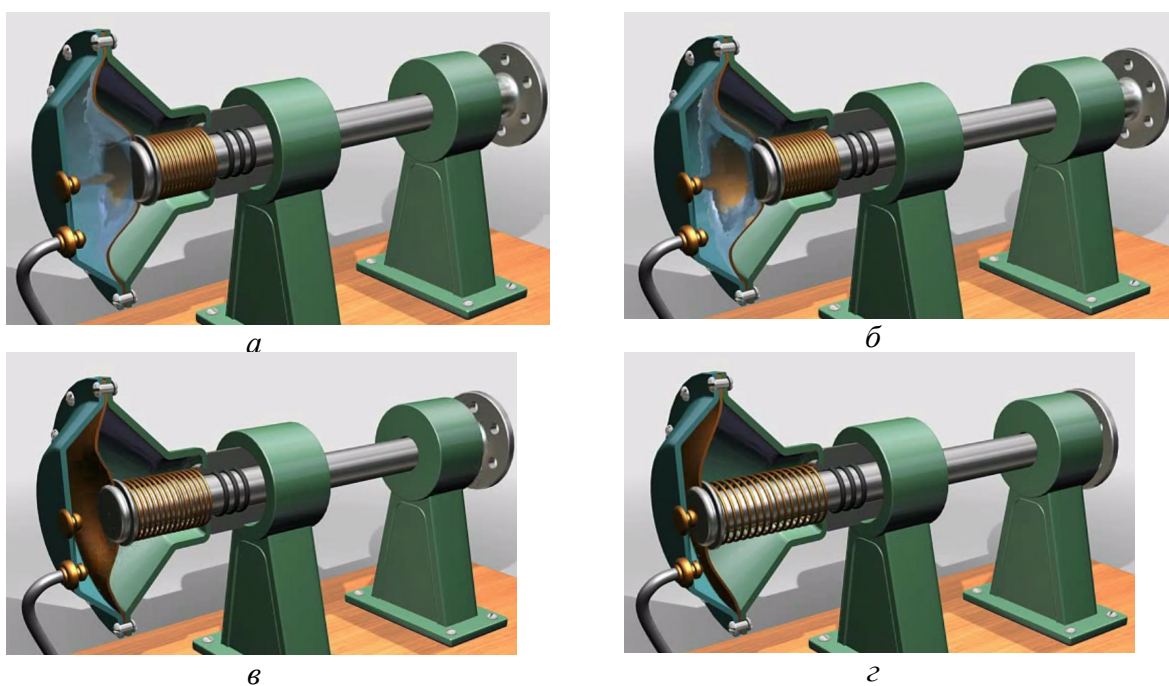


Рис. 7. 3D модель роботи пневмокамери при зворотному русі:
а – початкове положення; б, в – проміжні положення; г – кінцеве положення

Висновки і пропозиції. Розроблений програмний продукт може ефективно використовуватись при вивченні наступних дисциплін: “Гідравліка та гідро-пневмоавтоматика”, “Металообробне обладнання”, “Проектування та оснащення гаражного господарства”. На основі цих розробок можливо створювати аналогічні програмні анімаційні продукти й для інших дисциплін: “Гідравліка” – робота гідравлічних систем верстатів, автомобілів, “Теорія різання” – рух інструменту й утворення стружки та багато інших дисциплін.

УДК 621.326

Михайло Пилипець, д.т.н., проф.; Андрій Грабовський

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З НАВИВНИХ ЗАГОТОВОК

Анотація. Запропонована технологія виготовлення розрізних шайб, циліндричних секторів та інших, плоских циліндричних деталей з навивних заготовок.

Ключові слова: кільцеподібні, секторні, заготовки, виток.

Mykhailo Pylypets, Ph.D., Prof.; Andriy Grabovsky

TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURING PARTS FROM WINDING BILLETS

Abstract. The proposed technology for the production of split washers, cylindrical sectors and other flat cylindrical parts from winding blanks.

Keywords: forming, winding operation, helical spiral.

Кільцеві деталі (шайби, сектори, кронштейни) виготовляють штампуванням із листових заготовок, для чого використовують дороге устаткування, процес супроводжується великими витратами металу та енерговитратами. Тому для виготовлення заготовок з метою економії енергоносіїв, особливо металу, рекомендується виготовляти деталі даного типу із стрічки навиванням на ребро в спіраль з кроком T , що дорівнює товщині стрічки з наступним розрізуванням спіралі на окремі кільця (сектори).

Прогресивні методи ресурсощадних технологій виготовлення гвинтових і кільцевих деталей автомобільної, тракторної, сільськогосподарської галузей машинобудування забезпечують зменшення матеріаломісткості виробів, економію сировини та матеріалів, підвищення продуктивності праці.

Виготовлення секторних 1 і кільцеподібних 2 виробів (рис.1) здійснюється з мотка 1 (рис.2) у такій послідовності. Стрічку 3 навивають на ребро витка до витка 4 на оправу 2 й надають їй тарілчасту форму з кутом нахилу витків β до осі оправу.

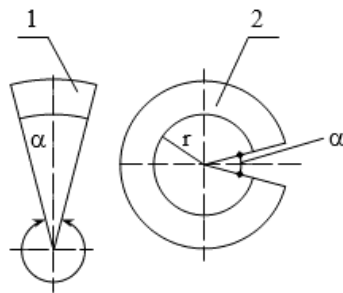


Рис. 1. Ескіз кільцеподібних і секторних заготовок

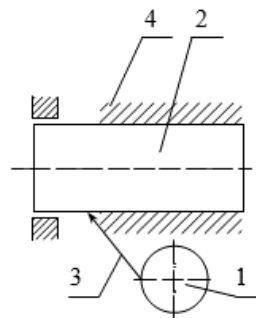


Рис. 2. Схема навивання стрічки

Діаметр витка спіралі залежить від радіуса необхідного сектора чи шайби та визначається із залежності

$$d_{\text{вм}} = 2R - R \frac{\alpha}{180} + \frac{t}{\pi} \quad (1)$$

де R – внутрішній радіус сектора (шайби);

α – кут сектора;

t – товщина різання.

Діаметр оправки d для шайби визначається із залежності

$$d_{on} = d - \frac{2B}{\pi}, \quad (2)$$

де d – внутрішній діаметр витого шнека;
 φ – коефіцієнт, $\varphi=2B/d$.

Для сектора

$$d_{on} = d \left(1 - \frac{\alpha}{360} \right)$$

(3)

Кут нахилу витка визначається за залежністю

$$\beta = \arccos \left[1 - \frac{\alpha}{360} + \frac{t}{2\pi R} \right] \quad (4)$$

Після навивання спіраль знімають з оправки та розрізають на фрезерному верстаті вздовж твірної на окремі деталі [160]. Далі їх правлять на вальцях 1 і 2 (Рис.3) або гідравлічних пресах, після чого вони набувають форму показану на рис. 1.

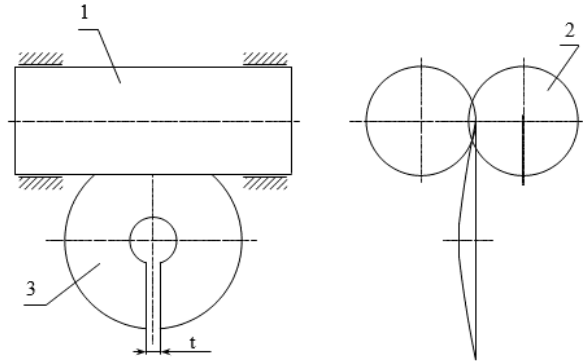


Рис. 3. Схема правлення деталей після розрізування

Для виготовлення секторів з кутом $\alpha < 120^\circ$ заготовку навивають на оправку, розраховану за формулою (3). Після розрізання навивної заготовки на окремі кільця їх розвальцьовують до діаметра сектора d_c , використовуючи спеціальний підкладний штамп.

Для секторів з кутом $\alpha > 120^\circ$ заготовку навивають на оправку діаметром d_{on} , розрахованим за формулою (2), і розрізають на сектори необхідних розмірів.

Момент формоутворення нахиленої спіралі на оправку залежить від поперечного перерізу стрічки, марки матеріалу і конструктивних особливостей пристрою для навивання.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що момент згину можна визначити за залежністю

$$M_{нав} = k_M P [l + (\mu_P + tg \gamma_P) \cos \beta R] \quad (5)$$

де P – вертикальна складова сили згину стрічки на ребро; k_M – коефіцієнт, який бере до уваги конструктивні особливості пристрою; l – плече прикладення сили P ; μ_P – коефіцієнт тертя в точці прикладення поперечної сили; γ_P – кут нахилу трапецевидного перерізу смуги.

Розходження теоретичних і експериментальних досліджень досягає 20...26 %.

Запропонована технологія виготовлення або відновлення кільцевих виробів сільськогосподарських машин забезпечує економію металу 25...36% за високої якості продукції і з мінімальною собівартістю виготовлення, особливо в майстернях агропромислового комплексу.

УДК 631.3

Максим Прядкін

Вінницький національний аграрний університет, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ПЛЮЩИЛЬНИХ АПАРАТІВ ДИНАМІЧНОЇ ДІЇ ДЛЯ ЗАГОТІВЛІ КОРМІВ ІЗ ТРАВ

Анотація. Вміст поживних речовин в кормах із трав в значній мірі залежить від тривалості польового сушіння скошених трав. Сіно є важливим кормом для тварин, а ефективність його заготівлі впливає на їхнє здоров'я та продуктивність. Попит на якісне сіно в сільському господарстві вимагає оптимізації процесів заготівлі та зберігання. При швидкому сушінні трави втрачаються поживні речовини за рахунок протікання біохімічних процесів виявляються порівняно невеликими та не перевищують 2...5 % сухої речовини. Ефективним способом скорочення тривалості сушіння є ворушення прокосів та перевертання валків скошених трав. Сучасні ротаційні косарки дискового та барабанного типу здатні якісно скошувати трави незалежно від стану стеблостою. Якість сіна в значній мірі залежить від швидкості сушіння вегетативних органів скошених рослин. З метою вирівнювання швидкості сушіння стебел і листків трав ротаційні косарки обладнують вальцьовими або бильними (кондиціонерами) плющильними апаратами. На якість плющення трави впливає матеріал, з якого виготовлені вальці і форма їх поверхні. Для зменшення втрат від обривання листків і суцвіть бобових трав рекомендується застосовувати плющильні апарати вальцьового типу, а плющильні апарати динамічної дії, які в меншій мірі чутливі до нерівномірності подачі маси, доцільно використовувати при скошуванні трав з нерівномірною густиною травостою та злакових трав.

Ключові слова: трава, плющення, апарат, вальці, била, кондиціонування, швидкість, сушіння.

Maksym Priadkin

APPLICATION OF ROTARY MOWERS - CONDITIONERS OF DYNAMIC ACTION FOR PROCUREMENT OF GRASS FORAGE

Abstract. The content of nutrients in forages from grasses largely depends on the duration of field drying of cut grasses. Hay is an important forage for animals, and the efficiency of its harvesting affects their health and productivity. The demand for high-quality hay in agriculture requires optimization of harvesting and storage processes. During rapid drying of grass, the loss of nutrients due to biochemical processes is relatively small and does not exceed 2...5% of dry matter. An effective way to reduce the drying time is to move the swaths and turn over the swaths of mowed grass. Modern rotary mowers of disc and drum type are able to cut grass with high quality, regardless of the state of the stem. The quality of hay largely depends on the drying speed of the vegetative organs of the mown plants. In order to equalize the drying speed of grass stems and leaves, rotary mowers are equipped with roller or impact (conditioners) flattening devices. The quality of grass flattening is affected by the material from which the rollers are made and the shape of their surface. To reduce losses from breaking off leaves and inflorescences of leguminous grasses, it is recommended to use roller-type devices, and dynamic devices, which are less sensitive to uneven mass supply, should be used when mowing grasses with uneven grass stalk density and grasses.

Key words: grass, flattening, apparatus, rollers, beaters, conditioning, speed, drying.

Першою і невід’ємною операцією будь якої технології заготівлі сіна є скошування трав, яке повинно бути здійснено в оптимальні терміни з дотриманням агротехнічних вимог.

У світовій практиці для скошування трав здебільшого використовують барабанні та дискові ротаційні косарки безпідпільного зрізу з обертовим рухом різальних елементів (ножів) навколо вертикальних осей, які обладнують вальцьовими або бильними (кондиціонерами) плющильними апаратами.

Сьогодні на ринку сільськогосподарської техніки України споживачам пропонуються ротаційні косарки багатьох зарубіжних фірм Krone, Claas, Deutz Fahr, Pöttinger, Niemeyer, Fella, John Deere та ін. виробників, а комбінації різних косарок дозволяють скошувати за один прохід смугу травостою шириною до 10 м.

Прагнення до підвищення продуктивності, якості та надійності виконання технологічного процесу, зменшення трудомісткості технічного обслуговування призвело до створення великої кількості машин для скошування трав.

При заготівлі сіна спостерігається нерівномірне висихання окремих частин рослин. Листя сохне значно швидше стебел. Це призводить до їх пересихання і втрачання внаслідок оббивання робочими органами машин під час ворущіння, згрібання та виконання інших операцій. Рівномірне сушіння всіх частин рослин може бути досягнуто за рахунок руйнування цілісності стебел і бокових пагонів, тобто плющення рослинної маси. Крім того, цей захід сприяє скороченню терміну сушіння трави при заготівлі сіна.

Завдяки плющенню швидкість вологовіддачі в стебел зростає на 25–30 % і практично зрівнюється з швидкістю вологовіддачі листків, забезпечуючи рівномірність сушіння всієї рослинної маси.

Ротаційні косарки обладнують вальцьовими або бильними (кондиціонерами) плющильними апаратами.

За конструктивним виконанням вальцеві плющильні апарати однотипні і мають пару вальців, які розміщені один над одним. Ступінь плющення трави регулюють зусиллям стискання пружин.

Геометрична форма і матеріал поверхні плющильних вальців різноманітні. Використовуються вальці сталеві і обгумовані, гладенькі, ребристі та рифлені з прямими і спіральними пазами. Глибина пазів і кут нахилу їх до твірної поверхні вальців різноманітні (рис. 1).



Рис. 1. Спіральні плющильні вальці косарки FC 202R фірми Kuhn та Disco 3000 TRC фірми Claas.

На якість плющення, а відтак і динаміку вологовіддачі крім навантаження на вальці та їх колової швидкості значний вплив чинять матеріал, з якого виготовлені вальці і форма їх поверхні.

При однаковому профілю поверхні вальців ефективність сталевих вища, ніж вкритих полімерним матеріалом. Проте, робота сталевих вальців супроводжується значними втратами листків. Тому з метою більш м’якого режиму роботи плющильних вальців, а відтак і зменшення втрат у косарках-плющилках здебільшого

використовують вальці, на поверхню яких нанесена гума або полімер. Рифлені та спіральні вальці інтенсивніше плющують траву, ніж гладенькі. Однак, обробіток ними бобових трав призводить до ковзання трави по поверхні вальців в момент затягування її у впадини, а відтак до збільшення втрат від обривання нижніх частин рослин.

Вальцеві плющильні апарати забезпечують якісну роботу в тому випадку, коли в зазор між вальцями подається рівномірний за товщиною шар трави. В протилежному – збільшується кількість неплющених стебел.

Косарки-плющилки з ротаційним ріжучим апаратом обладнують, як традиційними (вальцьовими) плющильними апаратами, так і плющильними апаратами динамічної дії, які являють собою горизонтальний вал (барабан) з встановленими на ньому билами.

Апарат динамічної дії складається із двох основних елементів: барабана (вала) із встановленими на ньому билами і направляючого кожуха, який охоплює передню частину барабана на певній віддалі. Технологічний процес роботи плющильного апарата динамічної дії показано на (рис. 2).

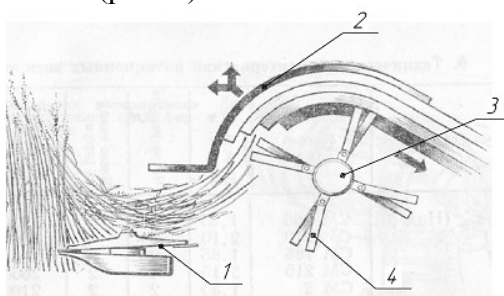


Рис. 2. Технологічна схема роботи плющильного апарата динамічної дії (кондиціонера): 1 - ріжучий апарат; 2 - направляючий кожух; 3 - вал (барабан); 4 - била.

В результаті динамічного впливу бил порушується цілісність стебел, і вони деформуються. Вважається, що поздовжня деформація стебел ефективна для їх інтенсивного сушіння. Цьому значною мірою сприяє і те, що після обробки скошеної сировини бильним барабаном утворюється спущений валок або прокіс, який легко продувається вітром. Використання таких косарок-кондиціонерів сприяє збільшенню швидкості підсушування бобово - злакових сумішей трав у 1,5-1,8 рази порівняно з необробленою травою.

В деяких конструкціях косарок, оснащених плющильними апаратами динамічної дії, зокрема модель FC 303GC фірми Kunh для поліпшення обробітку скошеної трави на направляючому кожусі встановлені додаткові гальмівні елементи, виконані у вигляді грабельної решітки (рис. 3). Била плющильних апаратів динамічної дії можуть бути жорстко прикріпленими до валу V-подібні (рис. 4) або циліндричного типу шарнірно підвішеними на осях підвісу бильного барабана (рис. 3), або виготовленими з відрізків штаби певної довжини (рис. 5).



Рис. 3. Плющильний апарат динамічної дії косарки FC 303GC, Kunh

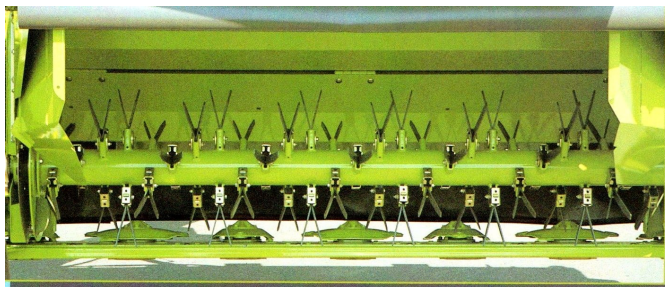


Рис. 4. Плющильний апарат косарки Disco 30004, Claas

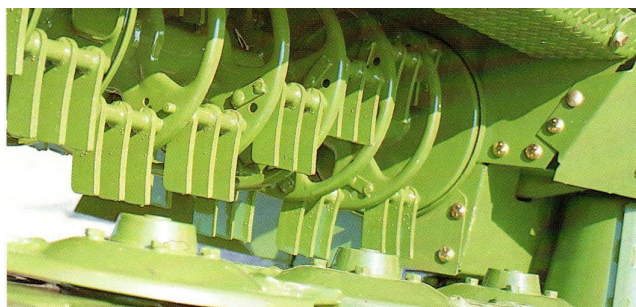


Рис. 5. Загальний вигляд плющильного апарату динамічної дії косарок AM 242C та AM 202C, Krone.

З метою зменшення металоємності відомі конструкції косарок, в яких була плющильних апаратів динамічної дії виконанні із полімерних матеріалів, зокрема модель ALTERNA 500R, FG 243 G II Lift-control фірми Kuhn.

Плющильні апарати динамічної дії в меншій мірі чутливі до нерівномірності подачі маси, ніж вальцеві плющильні апарати. Однак, при обробі цими апаратами бобових трав збільшуються механічні втрати за рахунок оббитих листків та суцвіть, що спонукало виробників (Kuhn, Claas) випускати косарки, які можуть комплектуватися вальцевими або плющильними апаратами динамічної дії (Easy Cut 2800 CV, Easy Cut 2800 CRi), які мають однакову ширину захвату, але модель типу CV обладнують кондиціонером з V-подібними металевими билами, а модель CRi плющильними вальцями спірального типу.

Плющильні робочі органи вальцевого типу менш жорстко діють на рослинну масу, ніж плющильні робочі органи барабанного типу, тому використовуються для роботи переважно з бобовими культурами, барабанного типу - зі злаковими.

Якість сіна в значній мірі залежить від швидкості сушіння вегетативних органів скошених рослин. З метою вирівнювання швидкості сушіння стебел і листків трав ротаційні косарки обладнують вальцевими або бильними (кондиціонерами) плющильними апаратами. На якість плющення трави впливає матеріал, з якого виготовлені вальці і форма їх поверхні. При однаковому профілю поверхні вальців ефективність плющення сталевими вальцями вища, ніж вкритих полімерними матеріалами.

Плющильні апарати вальцевого типу менш жорстко діють на траву, ніж плющильні апарати динамічної дії, тому з метою зменшення втрат від обривання листків і суцвіть їх рекомендують використовувати для роботи з бобовими травами. Оскільки плющильні апарати динамічної дії в меншій мірі чутливі до нерівномірності подачі маси, то їх доцільно використовувати при скошуванні трав з нерівномірною густиною травостою та злакових трав.

УДК 001:01:681.3

Андрій Сверстюк^{1, 2}, д.т.н., проф.; Дмитрій Радчук¹; Андрій Хемій¹; Віктор Гунька²

¹Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ НАУКОВОГО ПОШУКУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ З ПРОТЕЗУВАННЯ

Анотація. Наведено дані використання можливостей аналітичного пошуку для оптимізації аналізу літературних джерел у наукометричній базі даних Scopus при дослідженні сучасного стану питань протезування та проблеми підготовки сучасних фахівців протезистів-ортезистів.

Ключові слова: біомедична інженерія, технології медичної діагностики та лікування, протез, ортез, протезист, ортезист, протезування, ортезування

Andrii Sverstiuk, Ph.D., Prof.; Dmitriy Radchuk; Andrii Khemii; Viktor Hunka

OPTIMIZATION OF SCIENTIFIC SEARCH FOR RESEARCH PROBLEMS WITH PROSTHESIS

Abstract. The data on the use of mathematical learning methods in the optimization of the scientific search of literary sources in the scientometric database Scopus in the study of the current state of prosthetics issues and the problem of training modern prosthetists-orthetists are presented.

Keywords: biomedical engineering, technologies of medical diagnosis and treatment, prosthesis, orthosis, prosthetist, orthotist, prosthetics, orthotics

Війна в Україні поставила нагальне питання розвитку вітчизняного протезування, оскільки бойові поранення часто дають травматичні ампутації кінцівок. Значно зросла потреба у протезуванні, яка, відповідно, вимагає значного збільшення виробництва протезів та зростання потреби у підготовці фахівців з протезування [1]. Слід відмітити, що успішне протезування неможливе без детального вивчення основ інженерної механіки, принципів біомедичної інженерії, біоматеріалознавства та біомеханіки при вивченні структури й функцій опорно-рухового апарату людини з іншого боку. Процес протезування складний і досить тривалий. Він включає низку етапів, починаючи від проектування, етапів розробки складових частин протезу, створення технологічних ліній виробництва та інженерного супроводу як виготовлення протезів так і подальшого обслуговування [2]. На сьогодні в Україні питання реабілітації та протезування військових з ампутаціями та цивільних постраждалих громадян ставить завдання як перед практичною охороною здоров'я, так і перед медичною освітою. Підготовка фахівців із протезування стає однією із складових частин медичної допомоги населенню [3]. Для вирішення цієї проблеми зараз проводиться багато наукових досліджень, якісне виконання яких неможливе без наукового пошуку та огляду літературних джерел. Як правило, пошук наукової літератури є досить трудомісткий. Тому за останні роки почали активно використовувати методи машинного навчання для здійснення цього процесу в багатьох галузях науки, в тому числі й у медицині [4].

Наведено приклад використання наукометричної бази Scopus для релевантного пошуку наукової літератури з тематики протезування. Метою роботи була оптимізація аналітичного огляду літературних джерел при досліджуванні сучасного стану питань

протезування взагалі та проблеми підготовки сучасних фахівців протезистів-ортезистів з використанням наукометричної бази даних Scopus.

Для оцінювання актуальності досліджень методів машинного навчання та їх використання в дослідженні ланого питання в наукометричній базі Scopus було сформульовано аналітичний запит (ALL("Biomedical engineering") OR ALL("technologies of medical diagnosis and treatment") OR ALL("prosthesis") OR ALL("orthosis") OR ALL("prosthetist") OR ALL("orthotist") OR ALL("prosthetics") OR ALL("orthotics")) AND (ALL("Artificial Intelligence") OR ALL("forecasting methods") OR ALL("forecasting models") OR ALL("monitoring") OR ALL("decision trees ") OR ALL("predictive factors") OR ALL("predictive biomarkers") OR ALL("regression analysis")))

За результатами пошукового запиту по даній темі в наукометричній базі з 1955 до 2024 року знайдено 462784 наукових праць, з них з 2014 до 2024 року, тобто, за останнє десятиріччя - 320054. Найбільша кількість літературних джерел по досліджуваній тематиці припадає на останні 3 роки. Зокрема в 2021 році було опубліковано 44484 публікацій, 2022 – 50128, 2023 – 55054, що підтверджує актуальність дослідження даної проблеми та невпинне зростання інтересу до неї в усьому світі (рис.1).

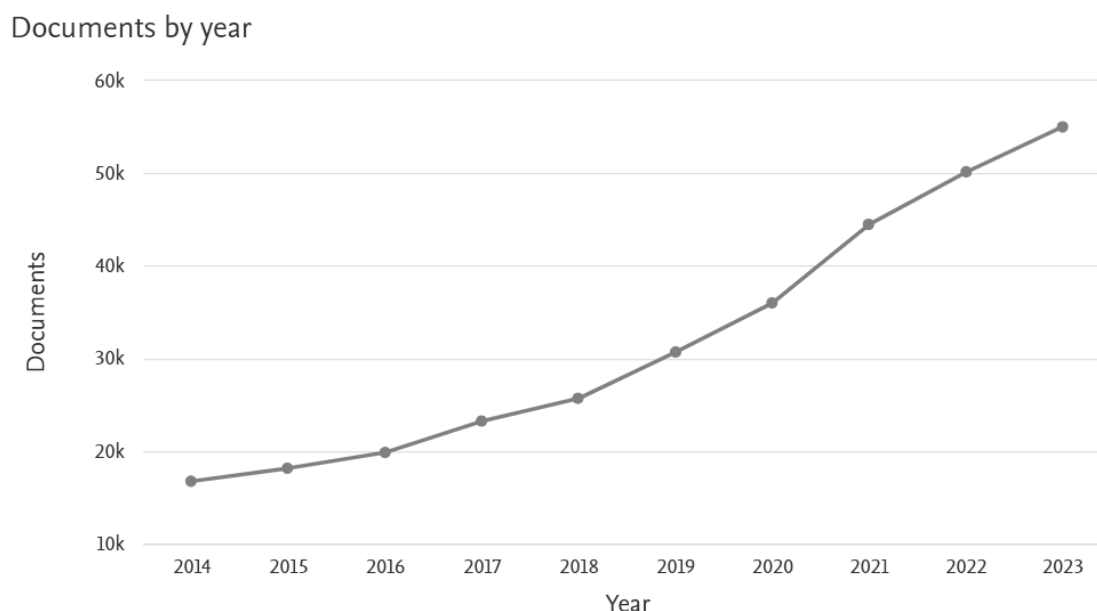


Рисунок 1. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (загальна кількість праць за роками).

Серед ресурсів наукових праць переважали публікації з галузі комп'ютерних наук, штучного інтелекту та біоінформатики – 7740, IEEE Access – 3943 та наукові доповіді – 3659.

Щодо основних авторів, то лідерство у вивченні даної проблеми мають такі науковці, як Shen D. – 415, Acharya U. R. – 403, Ourselin S. – 304. Rogers J.A. – 267, Lei B. – 242 та Martinek R. – 229 наукових праць.

В розрізі наукових закладів провідні позиції займають Китайська академія наук – 7000, Міністерство освіти КНР – 6528, Гарвардська медична школа – 4013, Шанхайський університет – 3407 наукових робіт.

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

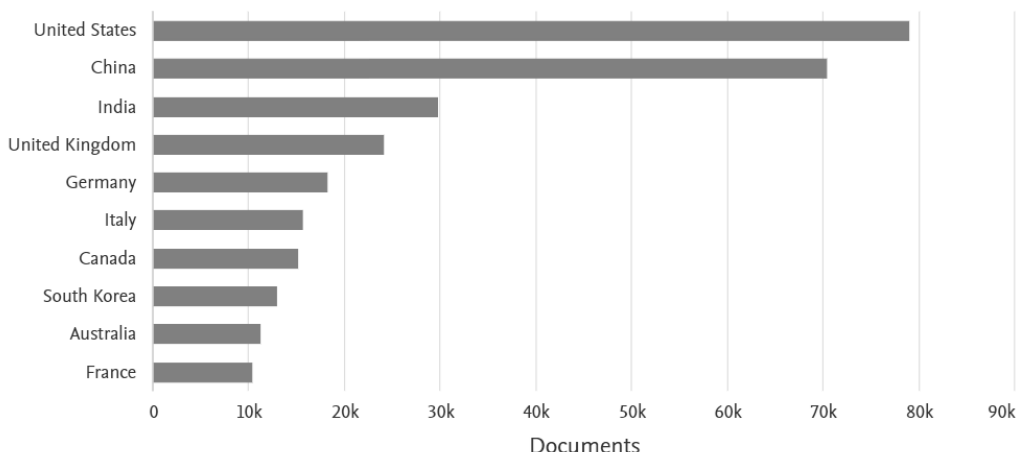


Рисунок 2. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (розподіл праць по країнах).

В розрізі країн, кількість публікацій найбільше у науковців США – 78983, Китаю – 70318, Індії – 29691, Англії – 24125, Німеччини – 18207, Італії – 15637 та Канади – 15052 (рис.2).

Серед наукових праць переважали дослідницькі статті в журналах – 195675, матеріали конференцій – 69843, оглядові статті – 36159 та розділи в книгах – 13179 (рис.3).

Documents by type

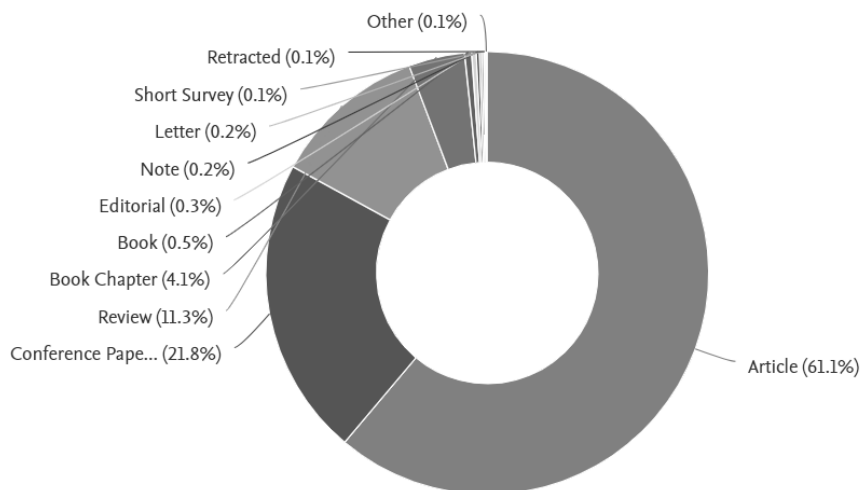


Рисунок 3. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (види публікацій).

Найбільше статей було видано у таких наукових рубриках, як інженерія – 19,2%, комп’ютерні науки – 17,7%, медицина – 15,2%, біохімія, генетика та молекулярна біологія – 7,6%, фізика – 6,9%, матеріалознавство – 6,2% та математика – 4,9% (рис.4).

Documents by subject area

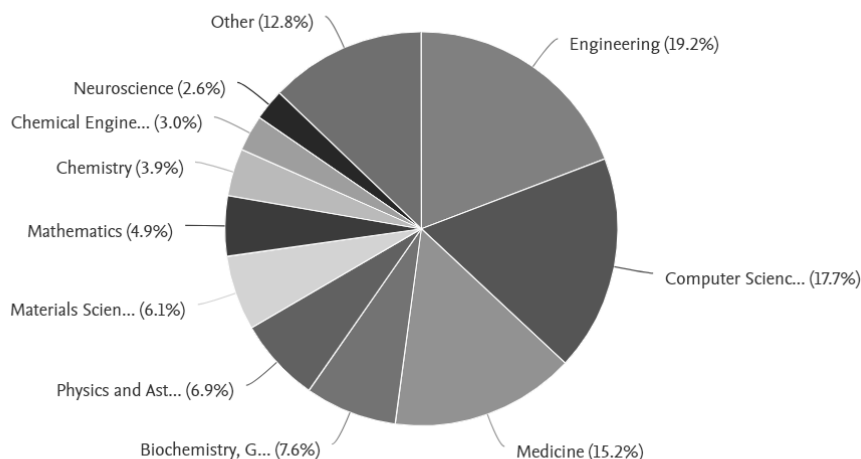


Рисунок 4. Результати пошукового запиту в наукометричній базі Scopus (наукові рубрики).

Висновки: У даній статті проведено аналітичний огляд публікацій у наукометричній базі Scopus при дослідженні сучасного стану питань протезування та проблеми підготовки сучасних фахівців протезистів-ортезистів. Проведено аналіз робіт по роках, країнах, журналах, категоріях. Окремо представлено авторів з найбільшою кількістю робіт з врахуванням країн та наукових закладів. На основі отриманих даних аналітичного огляду літературних джерел з допомогою програми Scopus можна зробити висновок про зростаючий науковий інтерес до проблеми дослідження сучасного стану питань протезування та проблеми підготовки сучасних фахівців протезистів-ортезистів, особливо враховуючи велику і нагальну проблему реабілітації військових з травматичними ампутаціями кінцівок.

Перелік посилань

1. Коробко, Л., Маркович, О. Чижишин, Б.. Фахова медична допомога фізичного терапевта з профілактики контрактур після ампутації нижніх кінцівок. *Physical Culture and Sport: Scientific Perspective*. – 2022, - 2 (Жов 2022), - С. 81–84. DOI:<https://doi.org/10.31891/pcs.2022.2.13>.

2. Протезування та штучні органи: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / І. Ю. Худецький, Ю. В. Антонова-Рафі, Г. В. Мельник, Є. В. Сніцар ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,124Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 184 с.

3. Одинець, Т., Белов, Є. І Ванюк, О. Фізична терапія військовослужбовців після ампутацій. *Physical Culture and Sport: Scientific Perspective*. 2023. - 4 (Груд 2023). – С. 46–49. DOI:<https://doi.org/10.31891/pcs.2023.4.6>.

4. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In *Computer systems and information technologies*. 2024. (Issue 1, pp. 6–16). Khmelnytskyi National University. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1>.

УДК 621.326

Лариса Сенік

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОСНОВНІ ЗАСАДИ ВИКОРИСТАННЯ 3D-ДРУКУ В СУЧАСНОМУ АВТОМОБІЛЕБУДУВАННІ

Анотація: У тексті досліджується значущість та переваги використання технології тривимірного друку у сучасному автомобілебудуванні. Описуються ключові аспекти використання 3D-принтерів на різних етапах виробництва автомобілів, таких як конструювання, серійне виробництво та реставрація вінтажних авто. Підкреслюється важливість цієї інноваційної технології для сучасної автопромисловості та її потенціал для подальшого розвитку.

Ключові слова: 3D-принтер, авто, 3D друк, автовиробники

Larysa Senyk

BASIC PRINCIPLES OF USING 3D PRINTING IN MODERN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Abstract: The text explores the significance and advantages of using three-dimensional printing technology in modern automobile manufacturing. Key aspects of the use of 3D printers at various stages of car production, such as design, serial production and restoration of vintage cars, are described. The importance of this innovative technology for the modern automotive industry and its potential for further development are emphasized.

Keywords: 3D printer, car, 3D printing, car manufacturers

Довгий час технологія тривимірного друку, що з'явилася ще в минулому столітті, не знаходила масштабного практичного застосування. З сучасної точки зору це виглядає дивно - адже сьогодні купити 3D-принтер прагнуть не тільки наукові лабораторії, а й великі промислові підприємства, в число яких входять і деякі автомобілебудівні корпорації. Розглянемо основні засади використання 3D-друку в сучасному автомобілебудуванні:

1. Використання 3d-принтера на етапі конструювання. Для автомобілебудування характерно масове виробництво. Всі деталі машин тиражуються в сотнях тисяч, а то й мільйонах примірників. "Друкувати" їх на тривимірному принтері було б занадто дорого-поки що традиційні методи (наприклад, лиття) більш практичні. Але не потрібно забувати про те, що етапу масового випуску завжди передує етап проектування – і ось тут-то адитивні технології показують себе з найкращої сторони.

Щоб досягти кінцевої мети, часто потрібно виготовити один за одним кілька прототипів, іноді відрізняються між собою лише в дрібницях. При використанні 3D-принтера це нескладне завдання – досить внести корективи в математичну модель. Водночас "звичайні" методи в подібних випадках стають не вигідними.

2. 3d-принтер на етапі серійного виробництва автомобілів. Застосування дорогих витратних матеріалів не дозволяє використовувати тривимірну друк для масового виробництва комплектуючих. Проте бувають випадки, коли до тих чи інших деталей автомобіля покупці пред'являють індивідуальні вимоги. Зокрема, для гоночних машин необхідна особливо міцна і при цьому легка крильчатка вентилятора охолодження двигуна. Особливого сенсу в крупносерійному виготовленні цієї деталі немає. Найпростіше замовити 3D-друк таких елементів – це дозволяє не вносити ніяких змін у вже утвердився технологічний цикл автомобілебудівного заводу.

3. 3D друк машин: як він впливає на розвиток автопромисловості.

Абсолютно першим авто, в якому використовуються 3D-друковані деталі у своїй конструкції, є екологічно чистий Urbee. У ньому використано пластикові панелі, створені за допомогою 3D-принтера та інші елементи, прикріплені до звичайної внутрішньої рами. Проте компанія Local Motors пішла далі, створивши проривний електромобіль Strati. Більшість його елементів (корпус) створена з використанням 3D друку.

4. Реставрація вінтажних авто. Розділ автомобільного 3D-друку, спрямований на реставрацію класичних автомобілів, розв'язує проблему недоступності оригінальних запчастин, які вже давно припинили виробництво. Компанії, такі як Porsche, стикаються з викликом у виготовленні запасних частин для своїх класичних моделей, оскільки процес виробництва був автоматизованим і спеціалізованим під кожену модель. Використання традиційних методів виробництва стає дорогим та тривалим. Проте, розв'язанням цієї проблеми стає 3D-друк деталей на замовлення, що дозволяє швидко та ефективно виготовляти запасні частини для класичних автомобілів.

Таким чином основні переваги 3d-друку у виробництві автомобільних деталей полягають у:

- Швидшому виході на ринок: однією з найбільших переваг 3D-друку є швидкість, з якою можна виготовляти деталі та компоненти.
- Покращеному налаштуванню: завдяки 3D-друку простіше та економічніше виготовляти нестандартні деталі та компоненти для окремих автомобілів.
- Кращому контролю якості: використовуючи 3D-друк для створення точних деталей і компонентів, виробники можуть покращити процеси контролю якості та гарантувати, що їхні продукти відповідають строгим стандартам.
- Зменшенні відходів і витрат: традиційні методи виробництва часто можуть призвести до значних відходів, оскільки матеріали ріжуться та обрізаються за розміром. Однак за допомогою 3D-друку деталі та компоненти можна виготовляти точно за розміром, зменшуючи кількість відходів і знижуючи витрати.
- Збільшенні доступності запасних частин: однією з найбільших проблем в автомобільній промисловості є наявність запасних частин, особливо для старих автомобілів. За допомогою 3D-друку виробники можуть легко створювати запасні частини та компоненти, покращуючи доступ до запасних частин і знижуючи вартість ремонту.

Перелік посилань

1. 3D4U.COM.UA. Як 3D-принтери використовуються в автомобілебудуванні? Режим доступу: <https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/64-kak-3d-printery-ispolzuyutsya-v-avtomobilestroenii>.

2. 3D принтер в Україні. 3D друк машин: як він впливає на розвиток автопромисловості, 2024. Режим доступу: <https://www.3dprinter.ua/3d-druk-mashyn-yak-vin-vplyvaye-na-rozvytok-avtopromyslovosti/>.

УДК 621.326

Богдан Товт, к.т.н.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Україна

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ

Анотація. Мета доповіді полягає у розвитку наукових основ теорії топологічної оптимізації конструкцій у частині розв'язання складних задач оптимізації механічних конструкцій. Математичне програмування й математичне моделювання використані, як інструменти постановки задач топологічної оптимізації механічних. Виконано огляд і аналіз сучасного стану теорії топологічної оптимізації конструкцій. Наведено класичну варіаційну та скінченно-елементну постановки задач топологічної оптимізації. Розглянуто ідею та особливості реалізації SIMP-методу для їх розв'язання. Виконано постановку задачі топологічної оптимізації у вигляді мінімізації маси конструкції з урахуванням обмежень на напруження.

Ключові слова: топологічна оптимізація, метод скінченних елементів, SIMP-метод, обмеження на напруження

Bohdan Tovt, Ph.D.

PROBLEM STATEMENT OF STRESS-CONSTRAINED TOPOLOGY OPTIMIZATION OF MECHANICAL STRUCTURE

Abstract. The purpose of the report is to develop the scientific foundations of the theory of topological optimization of structures in terms of solving complex problems of optimization of mechanical structures. Mathematical programming and mathematical modeling are used as tools for setting problems of mechanical topological optimization. A review and analysis of the current state of the theory of topological optimization of structures was performed. Classical variational and finite-element formulations of topological optimization problems are given. The idea and features of implementing the SIMP method for their solution are considered. The formulation of the problem of topological optimization in the form of minimizing the mass of the structure, taking into account stress restrictions, has been carried out.

Keywords: topological optimization, finite element method, SIMP method, stress constraints

Головна мета дослідження, представленого у доповіді, полягає в розвитку наукових основ теорії топологічної оптимізації механічних конструкцій у частині розв'язання складних задач оптимізації конструкцій. У доповіді розглядаються ключові етапи становлення топологічної оптимізації, як окремої області наукових досліджень. Топологічна оптимізація конструкцій є концептуальним інструментом проектування й удосконалення конструкцій, який потребує пост-обробки й детального аналізу отриманих результатів. Окреслено методи математичного програмування, що застосовуються для вирішення задач чисельної скінченно-елементної топологічної оптимізації, а саме градієнтні методи (послідовного лінійного програмування, послідовного квадратичного програмування, методи випуклої лінеаризації, метод рухомих асимптот), неградієнтні методи (генетичні, еволюційні тощо), а також методи, засновані на критеріях оптимальності (евристичні методи). Градієнтні методи мають найбільше поширення серед сучасного оптимізаційного програмного забезпечення (Altair HyperWorks OptiStruct, Dassault Systems Simulia ABAQUS, ANSYS та ін.).

Основна ідея топологічної оптимізації конструкцій полягає у отриманні оптимального розподілу матеріалу у наперед визначеній області. Класична постановка задачі полягає у мінімізації піддатливості (максимізації жорсткості) конструкції при

обмеженнях на її об'єм або вагу. У доповіді розглядаються класична варіаційна та скінченно-елементна постановки задачі топологічної оптимізації.

Найбільш широко вживаним методом, який застосовується для вирішення задач топологічної оптимізації конструкцій на теперішній час є SIMP-метод, у основу якого закладено поняття Твердої Ізотропної Мікроструктури (або Матеріалу) зі Штрафом (Solid Isotropic Microstructure (or Material) with Penalization). Ідея SIMP-методу полягає в заміні цілих дискретно змінюваних змінних проектування неперервними змінними, для яких, після означеної заміни, задається певна форма штрафу, що приводить оптимальний проект до дискретного, так званого 0–1 розв'язку, тобто оптимальний проект конструкції має містити лише області з матеріалом – «1» і без нього – «0». Значення штучної функції густини, які лежать всередині визначеного проміжку, штрафуються. Зокрема, у доповіді детально розглядається особливості реалізації SIMP-методу для скінченно-елементної постановки задачі топологічної оптимізації.

Для більшості задач оптимізації механічних конструкцій, класична постановка задачі топологічної оптимізації є неприйнятною, оскільки створення найбільш жорсткої конструкції при обмеженнях лише на її об'єм або вагу не є актуальним. Практично доцільною постановкою задачі слід вважати задачу мінімізації маси конструкції з урахуванням обмежень на напруження.

Введення обмежень на напруження породжує ряд труднощів, серед яких слід виділити велику розмірність оптимізаційних задач у такій постановці, а також проблеми зі збіжністю, обумовлені так званою сингулярністю напружень. У доповіді детально описується і аналізується проблема сингулярності напружень у задачах топологічної оптимізації конструкцій. Для вирішення проблеми сингулярності обмеження на напруження піддаються релаксації задля вилучення вироджених підпросторів із простору допустимих проектів і, як результат, для того, щоб методами нелінійного програмування можна було отримати глобальний оптимум задачі. Для задач топологічної оптимізації рамних і фермових конструкцій було запропоновано релаксаційні методи, зокрема метод ϵ -релаксації та гладких обвідних функцій (smooth envelope functions, SEF). Також розглядається ряд методів, що вирішують цю проблему.

Складність, яка виникає при введенні обмежень на напруження до задач топологічної оптимізації конструкцій, пов'язана з локальним характером обмежень на напруження. У континуальній постановці задачі обмеження на напруження мають розглядатися для кожної точки матеріалу. У дискретній постановці (наприклад, скінченно-елементній) число точок матеріалу є скінченним, проте все одно занадто великим, як для практичної реалізації. Існує декілька способів введення обмежень на напруження до задачі топологічної оптимізації конструкцій, зокрема метод локальних обмежень, метод глобального обмеження і метод блочно-об'єднаних обмежень.

Інший підхід полягає у зведенні всіх локальних обмежень на напруження до одного глобального обмеження. Цей підхід відомий під назвою метод глобального обмеження. Проведено аналіз, розглянуто переваги і недоліки описаних методів.

Обмеження на напруження суттєво нелінійно залежать від проекту. На рівень напружень надмірно впливає зміна відносної густини матеріалу у сусідніх областях, і це явище посилюється в критичних областях з великими градієнтами напружень (концентраціями напружень), наприклад у гострих кутах. Ця проблема отримала назву проблеми залежності розв'язку від скінченно-елементної сітки (mesh-dependency problem). Таким чином, постановка задачі топологічної оптимізації конструкцій та алгоритм її вирішення мають уникати проблем зі збіжністю.

Виконано постановку задачі топологічної оптимізації механічних конструкцій з урахуванням обмежень на міцність, зокрема за критеріями допустимих напружень та коефіцієнтів запасу утомної міцності.

УДК 622.673

Іван Бельмас, д.т.н., проф.; Ганна Танцура, к.т.н., доц.; Олена Білоус, к.т.н., доц.; Дмитро Часов, к.т.н., доц.; Ангеліна Швачка; Олександр Гумаров
Дніпровський державний технічний університет, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ В ГУМОВИХ ВАНТОВИХ СИСТЕМАХ З ДЕФЕКТАМИ З'ЄДНАННЯ

Анотація: У цьому дослідженні представлено комплексний аналіз міцності гумових вантових систем з дефектами з'єднань у конструкціях, що застосовуються в будівництві. Основна увага приділена моделюванню нелінійного деформування компонентів цих систем з урахуванням взаємодії дискретних тросів, з'єднаних гумою, і перерозподілу зусиль між тросами в вузлі з'єднання. Запропонований метод підвищує надійність розрахунків прогону шляхом врахування впливу відхилень у силах навантаження і дефектів у з'єднаннях, що в кінцевому підсумку підвищує загальну надійність вантових конструкцій.

Ключові слова: гумовий канат, напружений стан, математична модель, дефекти з'єднання, вантові споруди

Ivan Belmas, Ph.D., Prof.; Hanna Tantsura, Ph.D., Assoc. Prof.; Olena Bilous, Ph.D., Assoc. Prof.; Dmytro Chasov, Ph.D., Assoc. Prof.; Anhelina Shvachka, Oleksandr Humarov

MODELING NONLINEAR DEFORMATION IN RUBBER CABLE STAY SYSTEMS WITH CONNECTION DEFECTS

Annotation. This study presents a comprehensive analysis of the strength of rubber cable stay systems with connection defects in structural applications. The research focuses on modeling the nonlinear deformation of components in these systems, considering the interaction of discrete cables joined by rubber and the redistribution of forces between cables in the connection assembly. The proposed method enhances the reliability of stay calculations by accounting for the effects of deviations in load forces and defects in connections, ultimately improving the overall reliability of cable-stayed structures.

Keywords: rubber rope, stressed state, mathematical model, connection defects, cable structures

У даній роботі розглянуто метод розрахунку на міцність гумотросової ванти з дефектами приєднання до споруди, що сприймає значні навантаження. Гумотросова ванта складається з системи паралельних тягових елементів, таких як троси, які забезпечують необхідну міцність і стійкість споруди. Дефекти приєднання можуть виникнути внаслідок різних факторів, таких як неправильний монтаж, знос матеріалу або виробничі помилки.

Метод розрахунку враховує нелінійність деформування складових ванти та випадок розриву тросів у вузлі приєднання. При цьому враховується перерозподіл сил між тросами у разі дефектів приєднання, що відбувається через механізми розриву та перенапруження суміжних тросів.

Метод також враховує вплив навантаження на тягову спроможність ванти у випадку дефекту приєднання до споруди з урахуванням нелінійного деформування складових. Це дозволяє підвищити надійність споруди та забезпечити безпеку її експлуатації в умовах значних навантажень.

Отже, розроблений метод розрахунку на міцність гумотросової ванти з дефектами приєднання є важливим інструментом для інженерів та дослідників у галузі

будівельних конструкцій, який дозволяє ефективно враховувати різноманітні умови та фактори, що впливають на міцність і надійність споруди.

Основними висновками дослідження є те, що максимально можливий дефект приєднання будь-якого троса призводить до суттєвої зміни навантажень суміжних тросів. Навантаження тросів у разі пориву кутового троса зростає найбільше, а на центральний трос - найменше. Розроблений аналітичний метод розрахунку напружено-деформованого стану ванти з урахуванням конструкції та нелінійної залежності від навантажень та механічних властивостей складових з ушкодженими в перерізі приєднання ванти декількох довільно розташованих у перерізі каната. Цей метод дозволяє уточнити визначені показники напружено-деформованого стану ванти та може бути використаний для підвищення надійності експлуатації вантового каната з ушкодженням в перерізі приєднанням.

1. Вплив місця положення не закріпленого троса: Дослідження показало, що місце положення не закріпленого троса впливає на напружено-деформований стан ванти. Наприклад, дефект приєднання центрального троса призводить до більших деформацій зсуву, ніж інші випадки дефектів.
2. Вплив дефектів закріплення: Дефекти закріплення кутового троса та середнього троса, який найбільш віддалений від зовнішніх тросів ванти, є крайніми випадками впливу на показники напружено-деформованого стану.
3. Метод розрахунку напружено-деформованого стану: Розроблений аналітичний метод розрахунку напружено-деформованого стану ванти з урахуванням конструкції та нелінійної залежності від навантажень та механічних властивостей складових з ушкодженими в перерізі приєднання ванти декількох довільно розташованих у перерізі каната.
4. Вплив дефектів приєднання: Максимально можливий дефект приєднання (розрив неперервності) будь-якого троса ванти призводить до суттєвої зміни навантажень суміжних тросів. Навантаження тросів у разі пориву кутового троса зростає найбільше, а на центральний трос - найменше.
5. Застосування методу: Розроблений метод уточнює визначені показники напружено-деформованого стану ванти та може бути використаний для визначення напружено-деформованого стану вантового каната з ушкодженням в перерізі приєднанням та для підвищення надійності експлуатації ванти.

Ця робота присвячена дослідженню напружено-деформованого стану гумотросової ванти з урахуванням дефектів приєднання до споруди. Дослідження показало, що місце положення не закріпленого троса впливає на показники напружено-деформованого стану. Зокрема, встановлено, що випадок дефекту приєднання центрального троса призводить до більших відносних максимальних деформацій зсуву, ніж інші випадки дефектів. Дефекти закріплення кутового троса та середнього також мають значний вплив на показники напружено-деформованого стану.

Основні висновки дослідження полягають у тому, що максимально можливий дефект приєднання будь-якого троса призводить до суттєвої зміни навантажень суміжних тросів.

УДК 624.072.014.2

Денис Биків, Андрій Кос, Олег Підлужний, Іван Підгурський, к.т.н, доцент, Микола Підгурський, д.т.н., професор

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ПЕРФОРОВАНИХ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК З РЕГУЛЯРНОЮ ТА НЕРЕГУЛЯРНОЮ СТРУКТУРОЮ ОТВОРІВ

Анотація. Наведено переваги перфорованих балок та галузі їх застосування. Наведені методи безвідходного виконання симетричних і асиметричних перфорованих балок з регулярною та нерегулярною структурою отворів.

Ключові слова: двотавр, перфоровані балки, симетрична структура, асиметрична структура

Denys Bykiv, Andrii Kos, Oleh Pidluzhnyi, Ivan Pidgurskyi, Mykola Pidgurskyi MANUFACTURING METHODS OF PERFORATED STEEL I-BEAMS WITH REGULAR AND IRREGULAR HOLE STRUCTURE

Abstract. The advantages of perforated beams and their field of application are given. The methods of waste-free manufacturing of symmetric and asymmetric perforated beams with a regular and irregular openings structure are presented.

Keywords: I-beam, perforated beam, symmetrical structure, asymmetrical structure

Перфоровані балки широко застосовуються в будівництві (несучі конструкції покриття та перекриття), машинобудуванні (лонжерони автомобілів та ін.).

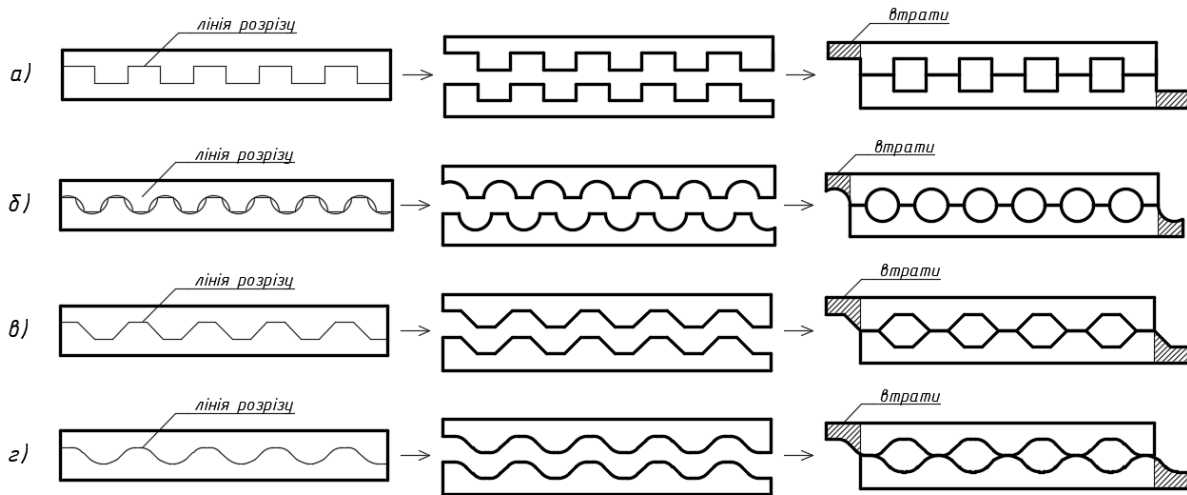
Перфоровану балку для будівель та споруд отримують з первісного прокатного двотавра після його зигзагоподібного розрізання і зварювання виступів стінки. Це дозволяє отримати балку з більшою висотою по відношенню до первісного профілю. Ефективність таких балок зумовлена, перш за все, збільшенням таких характеристик перетину як момент опору та момент інерції. Завдяки цьому, перфоровані балки є ефективнішими на 15-20%, ніж їх первісні двотаврові балки.

У загальному випадку перфоровані балки мають симетричну структуру і регулярний крок отворів у своїй стінці. Такий метод є найменш затратний, але не дає можливості повністю оптимізувати переріз балки по всій довжині. Для більшої ефективності ригеля можна з'єднувати балки з різних частин, з різних первісних перерізів і різних форм розрізу, також можна змінювати крок самих отворів або комбінувати їх в одній балці.

Для забезпечення таких потреб пропонуються різні методи безвідходного (або частково безвідходного) виробництва таких перфорованих балок.

Найпоширенішими вітчизняними балками з регулярною перфорацією є конструкції з шестикутними та восьмикутними отворами, за кордоном – з круглими та синусоїдальними отворами, що мають суттєво менші коефіцієнти концентрації на контурах отворів. Метод їх виготовлення полягає в тому, що стінка первісного прокатного двотавра розрізняється будь-яким видом різання металу, наприклад, газового, лазерного або плазмового. Потім розрізані частини, що з'єднуються у місцях примикання виступів за допомогою зварювання, утворюючи суцільні перемички.

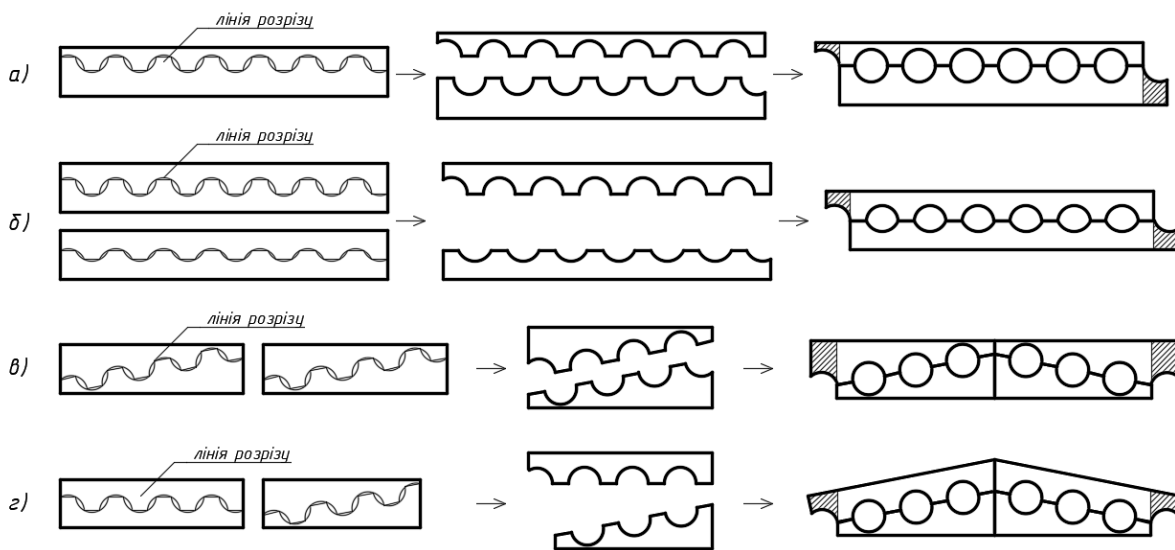
В звичайних перфорованих балках лінія зварювання знаходиться посередині стінки балки, де нормальні напруження згину близькі до нульових значень, тому додатковий розрахунок зварного з'єднання двох балок не виконують.



а) квадратна; б) кругла; в) шестикутна; г) синусоїдальна
Рисунок 1 – Перфоровані балки з регулярними отворами

Також можна виконувати перфоровані балки з регулярною перфорацією і асиметричними отворами відносно «нульової лінії». Такі балки можуть мати більшу стійкість або краще працювати при комбінованих видах навантажень. До таких балок зі зміщеними отворами (рис. 2, а), з видозміненою нижньою або верхньою частинами отвору (рис. 2, б), з отворами, що піднімаються або опускаються по довжині балки (рис. 2, в), трапецієвидні балки (рис. 2, г). Такий вид балок більш оптимізований до конкретних навантажень, але і більш трудомісткий. Для виконання такої конструкції потрібно розрізати дві балки з різною формою різіу.

Також при комбінованих видах навантажень або якщо ці навантаження прикладаються під певним кутом до балки, можна виконати балки з асиметричним перерізом (рис. 3). Така конструкція буде складатись з двох частин, які вирізані з двотаврів різних розмірів чи серій. Так, наприклад, можна поєднати балку з укосами полиць розміром 600 мм та рівнополичну балку з розміром 400 мм. Важливо, що при такому поєднанні, розмір отворів і перегородок повинен співпадати.



а) піднятими; б) різними в обох частинах; в) піднятими по довжині; г) трапецієвидна
Рисунок 2 – Перфоровані балки з асиметричними регулярними отворами

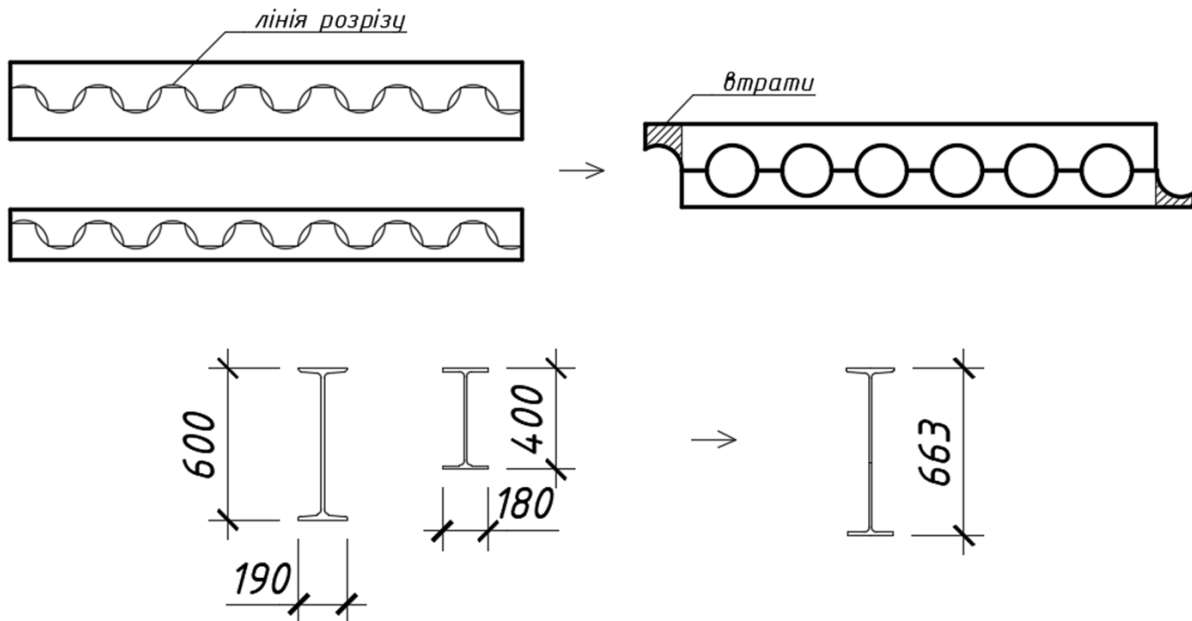


Рисунок 3 – Виготовлення асиметричної перфорованої балки

Наступним видом перфорованих балок, які є і найбільш перспективними, є конструкції з нерегулярною структурою по своїй довжині. Тобто такі конструкції мають різний крок, частоту, розмір і форму отворів, а також можуть змінювати свій поперечний переріз.

Такі балки є трудомісткими у виробництві, оскільки складаються з декількох частин. Чим більше змінних параметрів балки по довжині, тим більш трудомісткою вона буде при виготовленні. Їх виготовляють наступним чином: визначається кількість шаблонів, які будуть повторюватись, обирається їх місце розташування, далі з первісних двотаврів вирізаються частини, а потім вони накладаються та зварюються. Для таких конструкцій характерний вертикальний зварний шов в місці з'єднання частин. Такі шви є розрахунковими, для їх підсилення додатково можуть влаштовувати спеціальні накладки.

В залежності від навантажень, які діють на балку та граничних умов, можна розташовувати отвори там, де зусилля є меншими, та навпаки, де зусилля набагато більші – потрібно зменшити розмір отворів. Так для шарнірно обпертої балки можна використовувати види перфорації, зображені на рисунку 4.

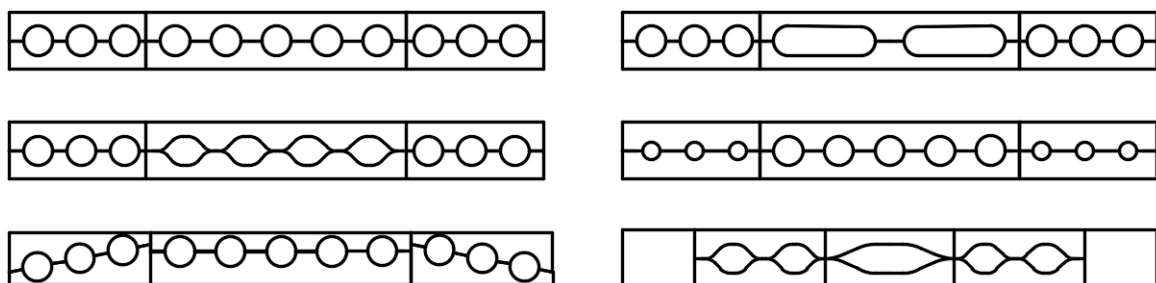


Рисунок 4 – Перфоровані балки з нерегулярними структурами і їх комбінації

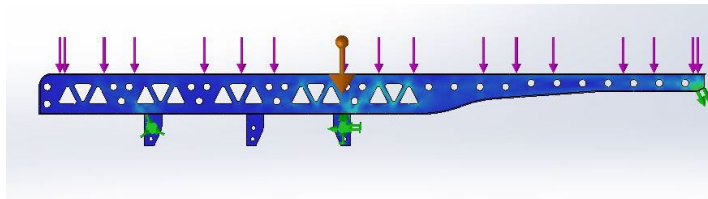
Зазначимо, що більшість перфорованих балок з нерегулярними структурами і асиметричним перерізом – мало досліджені, на відміну від балок з регулярною перфорацією.

Також з перфорованих балок можна виконувати різні розпірні конструкції – арки та рами, які не у всіх випадках є вигіднішими за суцільний переріз, оскільки крім згинальних моментів у конструкціях виникають поздовжні та поперечні зусилля, які змінюються по всій їх довжині.

Перфорація використовується також для зменшення ваги рамних конструкцій вантажних автомобілів (рис. 5). При цьому можуть вибиватись отвори як з однаковими геометричними обрисами (рис. 5, а), так і з різноманітними (рис. 5, б).



а)



б)

Рисунок 5 – Перфоровані рами вантажних автомобілів з регулярною (а) та нерегулярною (б) структурами отворів.

Зазначимо, що розробка методів розрахунку та виробництва сталевих перфорованих двотаврових балок призведе до подальшого покращення їх форм та способів виготовлення. При цьому конструкції з нерегулярною та асиметричною перфораціями є найбільш перспективними для збільшення міцнісних та жорсткісних характеристик конструкцій.

Література

1. Pidgurskyi I., Slobodian V., Bykiv D., Pidgurskyi M. (2021) Investigation of the stress-strain state of beams with different types of web perforation. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 103, no 3, pp. 79–87.
2. Підгурський І.М., Слободян В.В., Підлужний О.М., Биків Д.З., Підгурський М.І. Моделювання напружено-деформівного стану балок з різною перфорацією стінки / Збірник матеріалів тез доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2022» (м. Чернігів, 26–27 травня 2022 р.) – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 2. – С. 105.
3. Shaikh Ajim, Pawar Tejsvi, Wagh Vrushali, Jadhav Mrunal, Mujawar S. Shirin , Wagh Prakash (2019) Design and Analysis of Perforated I-Section Beam. JournalNX-ISSN No: 2581-4230. – 22-23 February 2019, pp. 25-28.

Секція: НОВІ МЕТОДИ ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ, НАПИЛЕННЯ

УДК 621.791.92

Анатолій Бабінець, к.т.н., с.досл.; Ігор Рябцев, д.т.н., проф.; Іван Лентюгов, к.т.н., с.досл.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

ЕФЕКТ СТРУКТУРНОЇ СПАДКОВОСТІ У СТАЛЯХ ТА СПЛАВАХ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ

Анотація. Описано сучасні погляди про поняття ефекту структурної спадковості в сталях та сплавах. Визначено основні фактори що приводять до отримання позитивного чи негативного ефекту структурної спадковості. Описано основні підходи до керування структурою та властивостями наплавленого металу за рахунок використання ефекту структурної спадковості.

Ключові слова: дугове наплавлення, наплавлений метал, структура металу, структурна спадковість, порошковий дріт

Anatoly Babinets, Ph.D.; Ihor Ryabtsev, Ph.D., Prof.; Ivan Lentuyhov, Ph.D.

THE EFFECT OF HEREDITY IN STEELS AND ALLOYS AND PROSPECTS FOR ITS USE IN ELECTRIC ARC SURFACING

Abstract. Modern views on the concept of the effect of structural heredity in steels and alloys are described. The main factors leading to a positive or negative effect of structural heredity have been determined. The main approaches to control the structure and properties of the deposited metal due to the use of the effect of structural heredity are described.

Keywords: arc surfacing, deposited metal, metal structure, structural heredity, flux-cored wire

Широко відомо, що властивості сталей та сплавів визначаються їх структурою та особливостями її зміни в наслідок дії зовнішніх факторів. У загальному випадку, відоме твердження, що чим дрібніше зерно у сталі (сплаві), тим кращі будуть їх фізичні та експлуатаційні властивості. Разом з тим, при вивченні закономірностей формування структури сталей та сплавів, отриманих різними методами наплавлення (зварювання) основна увага, як правило, приділяється їх хімічному складу та впливу термічного циклу наплавлення (зварювання) [1]. При цьому недостатньо дослідженою є проблема зв'язку між вихідною структурою присадних або електродних матеріалів та структурою отриманого наплавленого металу.

Ще академік Є.О. Патон звертав увагу на те, що якість та властивості зварного з'єднання залежать від якості як електродного (присадного), так і від основного металу. Чим якісніше і однорідніше за складом вихідні матеріали, тим вища ймовірність отримання якісної продукції. Тому технологіями-зварювальниками запропоновані такі методи підвищення якості металів та сплавів, як електрошлаковий, вакуумно-дуговий та електронно-променевий переплави [2].

У зварювальній технічній та науковій літературі практично відсутні публікації з проблеми зв'язку структури вихідних твердих матеріалів з аналогічними структурами зварювальної ванни та затверділого металу зварного шва або наплавленого металу, і термін «спадковість» стосовно системи «вихідний електродний або присадний матеріал - розплав зварювальної ванни - твердий метал», у наплавленні (зварюванні) використовується досить рідко [2].

Однак саме в такій системі, коли наплавлений метал як би успадковує структуру вихідних матеріалів для наплавлення за розміром зерна, складом, розмірами та розподілом зміцнюючих і/або неметалевих включень, на нашу думку, доцільно застосовувати термін «спадковість».

Спадковість, яка проявляється у вигляді збереження в металі після фазового чи структурного перетворення певних особливостей будови його вихідної структури на різних рівнях (макроскопічному, мікро- та субмікроскопічному), називають структурною. Одним із видів структурної спадковості після фазового або структурного перетворення є існування в сталі хімічної неоднорідності, яка проявляється у збереженні ліквідаційних ділянок, що виникають при кристалізації розплаву [3].

У металургії позитивний або негативний вплив вихідних шихтових матеріалів на будову розплаву, а через нього на структуру і фізико-механічні властивості твердого металу в системі «шихта - розплав - виливок» помічено давно. Прояви такої «металургійної спадковості» пов'язують із збереженням в розплаві неметалевих фаз, газів, домішок та елементів кристалічної будови вихідного металу, зумовлених технологічною передісторією виготовлення, підготовки, плавлення, розкислення і кристалізації металу шихти [4, 5]. Дослідженнями показано, що в металургії при формуванні структури і фізико-механічних властивостей твердого металу виливків, важливого значення набуває мікробудова металевого розплаву [4].

Відомо, що після початкового плавлення шихти в рідкому металі спостерігається мікронеоднорідний нерівноважний стан розплаву - в ньому є кристалоподібні угруповання атомів (кластери) та зона розпорошеного розташування атомів. Мікроструктура затверділих виливків та їх експлуатаційні властивості можуть залежати від вихідної структури шихтових матеріалів, а також умов теплових режимів нагріву, розплавлення, швидкостей охолодження і затвердіння розплаву [6].

При нагріванні металу вище за температуру розупорядкування кластерів розплав стає повністю мікрооднорідним і при його твердінні вихідна структура металеві шихти не відновлюється. При нагріванні металу до температури, меншої за температуру розупорядкування, в ньому ще є не зруйновані кластери розплаву, успадковані від вихідних матеріалів шихти. При затвердінні такого розплаву з цих кластерів зароджуються кристали і формується спадкова структура вихідної шихти [6].

Таким чином, в більшості випадків спадковість структури сталей пов'язують з нерівноважністю структурного стану розплаву, з наявністю в ньому динамічних угруповань атомів (кластерів) з певним типом просторового угруповання ближнього порядку та оточуючих їх розупорядкованих активізованих атомів [4, 7]. При цьому зміна агрегатного стану металів та сплавів не призводить до суттєвої перебудови структур ближнього порядку - тобто кластери структурно і генетично пов'язані з вихідним твердим металом [8].

Такі закономірності відкривають можливість управління структурою наплавленого металу за рахунок ефекту спадковості структури в системі «шихта – розплав - твердий метал», з метою підвищення його експлуатаційних властивостей. Проте дослідження структурної спадковості при наплавленні (зварюванні) порівняно з металургією ускладнюється такими факторами [2]:

- процеси нагрівання, плавлення та перенесення електродного (присадного) матеріалу при різних способах наплавлення (зварювання) по більшості фізико-металургійних параметрів мають значні відмінності;

- додатковий вплив складу та структури основного металу, який переплавляється та потрапляє у зварювальну ванну ускладнює встановлення закономірностей впливу вихідних електродних (присадних) матеріалів;

- температурно-часові параметри зварювальної ванни (на відміну від металургійної печі) не є стаціонарними і важко піддаються регулюванню, внаслідок чого структура розплаву зварювальної ванни, мабуть, буде далека від рівноважної.

Структурна спадковість у сталях та сплавах найчастіше пов'язана з їх вихідним хімічним складом, структурним станом і швидкістю нагрівання і проявляється як у вигляді відновлення розмірів зерен, так і у вигляді збереження орієнтації кристалітів. Це може супроводжуватися розпадом характерних структурних елементів [9], що особливо важливо в таких процесах високотемпературної обробки як наплавлення (зварювання).

Використати ефект структурної спадковості при різних методах наплавлення можна декількома шляхами, наприклад, змінюючи склад, структуру та форму вихідних шихтових матеріалів. Використання чистих матеріалів із мінімальним вмістом шкідливих домішок, однорідних за складом і будовою, повинно забезпечити отримання наплавленого металу з більш високими експлуатаційними властивостями. Наприклад, для широко застосовуваних при наплавленні високолегованих порошкових дротів і стрічок, а також спечених стрічок перспективним є використання в якості шихти лігатур, виготовлених із застосуванням рафінуючих переплавів, або гранульованих «чистих» матеріалів, отриманих методами газового розпилення.

Іншим способом керування структурою є зміна енергетичних та технологічних режимів наплавлення, впливаючи таким чином на процес кристалізації наплавленого металу. Особливо це стосується плазмового та електрошлакового способів наплавлення з присадкою порошку або інших некомпактних матеріалів, які є не струмопровідними і відсутній жорсткий зв'язок між струмом дуги та продуктивністю розплавлення наплавного матеріалу. Змінюючи технологічні параметри наплавлення, наприклад, швидкість подачі, можна в широких межах змінювати температуру зварювальної ванни, а також структуру та властивості наплавленого металу [1].

Щодо електродугового наплавлення, то використання ефекту структурної спадковості в наслідок підготовки вихідних шихтових матеріалів ускладнено. Відомо, що компоненти шихти порошкових дротів для дугового наплавлення (зварювання) повинні відповідати певним вимогам щодо грануляції. Розмір частинок порошоків, які входять до складу шихти, визначає сипкість останньої і, як наслідок, якість дозування при заповненні дроту. Тому в порошках, що використовуються для виготовлення дроту, небажано наявність пилоподібної фракції з розміром частинок менше 50 мкм і великих частинок з розміром, який перевищує 300 мкм [1].

Разом з тим, дані щодо впливу розміру частинок вихідних шихтових матеріалів на розмір кінцевої отриманої структури наплавленого металу досить розрізнені і неоднозначні. Це може бути пов'язано, в першу чергу, з високою температурою в зоні наплавлення (зварювання). Адже широко відомо, що температура в стовпі дуги, через яку проходить розплавлена крапля металу, може досягати 5000...6000 К, при цьому температура самої краплі досягає 2300...2700 К [10].

Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є використання у складі шихти порошкових дротів таких компонентів, які мають високу температуру плавлення (вище 2700 К), і можуть певною мірою зберегти при плавленні свою вихідну структуру. При охолодженні зварювальної ванни вони можуть стати центрами кристалізації і активно впливати на структуру утвореного металу. Наприклад у роботі [11] було показано, що введення мікродобавок бору або карбідів титану безпосередньо через шихту електродних порошкових дротів, суттєво впливає на структуру наплавленого металу, приводячи до її подрібнення, перерозподілу неметалічних включень і підвищення мікротвердості металу. Іншими способами є використання додаткового присадного

матеріалу, який може подаватись у хвостову частину зварювальної ванни у вигляді дроту або порошку.

Таким чином, виходячи із сучасних уявлень про взаємозв'язок рідкого та твердого станів сталей та сплавів, і про прояв ефекту структурної спадковості у них, одним з перспективних напрямів керування структурою та властивостями наплавленого металу, є використання ефекту структурної спадковості у системі «вихідний електродний або присадний матеріал - розплав зварювальної ванни - твердий метал». Цього можна досягти за рахунок застосування різних технологічних прийомів, спрямованих на певну попередню підготовку шихтових матеріалів, та/або керування тепловкладенням з метою контролю температури рідкого металу не вище за температуру розупорядкування кластерів.

Перелік посилань

1. Surfacing and additive technologies in welded fabrication / Ryabtsev Igor, Fomichov Serhii, Kuznetsov Valerii and others//Springer Nature Switzerland AG. 2023. ISBN 978-3-031-34390-2 (eBook).
2. Ryabtsev I.A. Structural heredity in the initial materials - metal melt - solid metal system (Review). The Paton Welding Journal. 2006. № 11. P. 8-12.
3. Тимофеев Г.В. Структурная наследственность в прокате больших сечений из непрерывнолитых заготовок / Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії: Зб. наук. пр. Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України, 2012. Вип. 25. С. 192-198.
4. Кондратюк С.Є., Примак І.Н., Щеглов В.М., Пляхтур О.О. Спадковість структури і прояви ліквації при переплавах сталі Р6М5 / Металознавство та обробка металів. 2009. № 3. С. 3-10.
5. Лучкин В.С. Металлургическая наследственность в жидкой стали / В.С. Лучкин, Л.Г. Тубольцев, В.П. Корченко и др. // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії: Зб. наук. пр. Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України, 2007. Вип. 15. С. 130-140.
6. Скребцов А.М. Затвердевание и свойства литейных сплавов. Мариуполь: ПГТУ, 2004. 204 с.
7. Скребцов А.М. Температура разрушения кластеров металлического расплава академика В.И. Архарова или только потеря наследственных признаков шихты / Процеси лиття, 2008. С. 9-15.
8. Кондратюк С.Е. Наследственное модифицирование сталей дисперсно-структурированными компонентами шихты / С.Е. Кондратюк, Е.Н. Стоянова, В.М. Щеглов и др. // Процеси лиття. 2013. № 2. С. 19-23.
9. Дяченко С.С. Спадковість і її роль при термічній обробці сталі (огляд) / Металознавство та обробка металів. 2004. № 2. С. 3-14.
10. Babinets A.A. and Ryabtsev I.O. Classification of methods of modification and microalloying of deposited metal (Review). The Paton Welding Journal. 2021. № 9. P. 2-8.
11. Ryabtsev I.O. Influence of different types of modifiers on the structure and properties of deposited metal of the type of 25KH5MFS tool steel / I.O. Ryabtsev, A.A. Babinets, M.O. Pashchyn and others // The Paton Welding Journal. 2023. № 5. P. 11-14.

УДК 621.326

Дмитро Васильєв; Сергій Максимов; Галина Фадєєва; Алла Радзівська
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

ВПЛИВ ГАЗО-ШЛАКОВИХ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА СТАБІЛЬНІСТЬ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ДУГИ ПРИ МОКРОМУ ПІДВОДНОМУ ЗВАРЮВАННІ

Анотація. Стаття присвячена питанню забезпечення стійкого горіння дуги при мокрому підводному зварюванні, що є ключовим для створення ефективних електродних матеріалів та вдосконалення технологічного процесу. Основна увага приділяється підбору оптимального складу шихти зварювальних матеріалів з використанням методів планування експериментів. Розглянуто три шлакові системи: $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaCO}_3\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-CaCO}_3$. За допомогою програмного забезпечення STATISTICA та симплекс-центроїдного плану досліджено вплив компонентів на зварювально-технологічні характеристики покриттів, такі як формування валиків, розбризкування, відділення шлакової кірки. Результати показали, що найкращими властивостями володіють склади системи $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$ зі співвідношенням $\text{CaF}_2/\text{TiO}_2$ близько 1/1. Додавання флюоритового концентрату та польового шпату до рутилової шихти покращило зовнішній вигляд швів, легкість відокремлення шлакової кірки та зменшило розбризкування. Досліджено також рутиловмісну систему $\text{TiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-K}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$, де компоненти $\text{K}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$ представлені польовим шпатом і слюдою. Підібрані склади покриттів доповнено нікелевим та марганцевим порошками для компенсації втрати легуючих елементів під час зварювання. Отримані результати допоможуть підібрати ефективні склади електродних покриттів для забезпечення стійкого горіння дуги при мокрому підводному зварюванні.

Ключові слова: дуплексні сталі, мокре підводне зварювання, стабільність процесу горіння дуги, газшлакова складова електродних матеріалів, система легування металу шва.

Dmytro Vasilyev; Serhii Maksimov; Galina Fadeyeva; Alla Radzievska

THE INFLUENCE OF GAS-SLAG COMPONENTS OF ELECTRODE MATERIALS ON THE STABILITY OF THE ARC BURNING PROCESS DURING UNDERWATER WELDING OF DUPLEX STEELS

Abstract. The article is dedicated to ensuring stable arc burning during underwater wet welding, which is crucial for developing effective electrode materials and improving the technological process. The main focus is on selecting the optimal composition of the welding material charge using experimental design methods. Three slag systems were considered: $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaCO}_3\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$, and $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-CaCO}_3$. With the help of STATISTICA software and a simplex-centroid design, the influence of components on the welding-technological characteristics of coatings, such as bead formation, spatter, and slag removal, was investigated. The results showed the best properties of the $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$ system compositions with a $\text{CaF}_2/\text{TiO}_2$ ratio of approximately 1/1. The addition of fluorite concentrate and feldspar to the rutile charge improved the appearance of the welds, ease of slag removal, and reduced spatter. A rutile-containing system, $\text{TiO}_2\text{-CaCO}_3\text{-K}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$, was also studied. The components $\text{K}_2\text{O-3Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$ were represented by feldspar and mica. The selected coating compositions were supplemented with nickel and manganese powders to compensate for the loss of alloying elements during welding. The significant findings of this research will play a crucial role in the selection of effective

electrode coating compositions, ensuring stable arc burning during the challenging process of underwater wet welding.

Keywords: duplex steels, wet underwater welding, stability of the arc burning process, gas slag component of electrode materials, weld metal alloying system.

Забезпечення стійкого горіння дуги – є одним із ключових питань при створенні електродних матеріалів, розробки або удосконалення технологічного процесу зварювання. Це особливо актуально для мокрого підводного зварювання, коли дуга горить безпосередньо у водному середовищі. Стійкість процесу зварювання визначається перш за все стійкістю горіння зварювальної дуги. Під стійкістю горіння дуги зазвичай розуміють сталість у часі її основних електричних параметрів: зварювального струму ($I_{зв}$) та напруги дуги ($U_{д}$). В свою чергу стійкість горіння дуги залежить як від зовнішніх факторів, так і від внутрішніх, тобто від складу самої плазми дуги. Стійкість горіння зварювальної дуги при інших рівних умовах значною мірою визначається видом статичних і динамічних характеристик джерела живлення дуги. Для стабільного горіння дуги потрібна рівність струму і напруги дуги струму і напрузі джерела живлення.

Для вибору складів покриттів, придатних для мокрого підводного зварювання з'єднань дуплексної сталі 2205, були досліджені три шлакових системи CaF_2 - TiO_2 - $KAlSi_3O_8$, $CaCO_3$ - TiO_2 - $KAlSi_3O_8$, CaF_2 - TiO_2 - $CaCO_3$.

Використання методів планування експериментів [1] дозволяє значно скоротити обсяг експериментів при вивченні багатокомпонентних систем, при цьому випадає нагода графічної інтерпретації результатів. У нашому випадку трикомпонентної суміші ми скористалися методом планування експериментів за програмою STATISTICA.

На стартовій панелі вибираємо Плани для сумішей і далі вибираємо Симплекс-центроїдний план з мінімальною кількістю дослідів, рівною 10. Як 10 відгуків служать отримані експериментальним шляхом значення зварювально-технологічних характеристик покриттів (рис. 1-2):

- формування зварних валиків (схильність до розбризкування).
- запис режимів зварювання і статистична обробка результатів вимірювань $I_{зв}$ і

$U_{д}$.

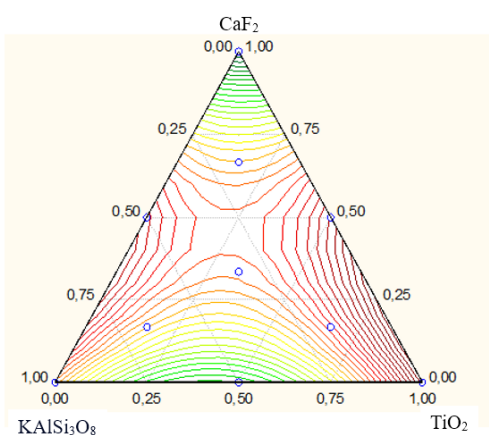


Рисунок 1 – Розбризкування при наплавленні

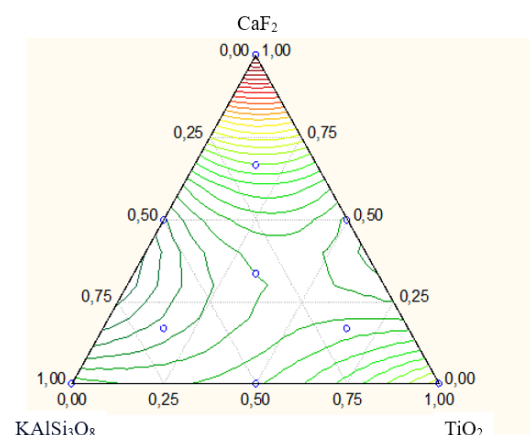


Рисунок 2 – Коефіцієнти варіації напруги дуги

Аналіз представлених досліджень показав, що найкращими інтегральними показниками володіють склади системи CaF_2 - TiO_2 - $KAlSi_3O_8$, а співвідношення CaF_2/TiO_2 наближається до 1/1.

Дослідні наплавлення виконувалися в лабораторному басейні на глибині 0,5 м. Джерело живлення – PS-5000. Струм зварювання – 200 А, полярність зворотна.

Запис режимів зварювання виконувався за допомогою комп'ютерної програми, яка дозволяла отримувати статистичні дані про електричні параметри процесу зварювання.

В процесі дослідження впливу газо-шлакових компонентів на властивості електродних матеріалів для підводного зварювання ми працювали над вирішенням наступних питань:

1. Підбір оптимального складу шихти зварювальних матеріалів, а саме:
 - вибір компонентів складу шихти (CaF_2 , CaO , SiO_2 , TiO_2 , MnO , Al_2O_3 та інших);
 - варіювання вмісту компонентів;
 - дослідження стійкості горіння дуги під водою.
2. Дослідження металургійних властивостей:
 - вплив складу флюсу на перенесення електродного металу в зварну ванну;
 - фазовий склад металу шва;
 - структуроутворення в зоні термічного впливу.

За результатами комплексного тестування був обраний оптимальний склад шлакової системи для електродів.

Метод планування досліджень дозволив скоротити обсяг експериментів при дослідженні багатокомпонентних систем. В даному випадку для трикомпонентної суміші було обрано симплекс-центроїдний план з 10 експериментами. Як 10 відгуків використані експериментально отримані значення зварюально-технологічних характеристик покриттів (рис. 3-4).

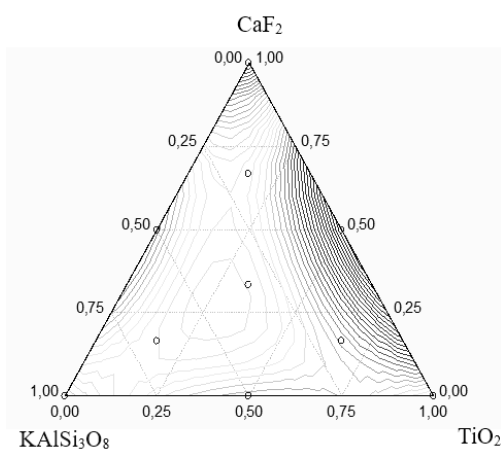


Рисунок 3 – Формування наплавлених валиків

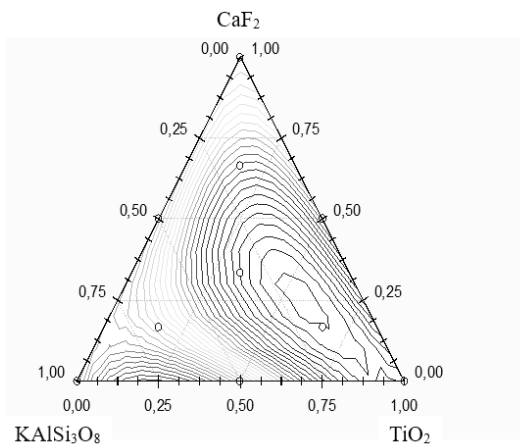


Рисунок 4 – Відділення шлакової кори

З описаних результатів попередніх дослідів можна зробити наступні висновки:

1. Високий вміст рутилу в покритті електродів призводить до поганого формування наплавлених валиків. Це може бути пов'язано зі збільшенням переходу рутилу з покриття в метал шва, що ускладнює управління формою валика.
2. Трикутна форма наплавлених швів вказує на недостатнє проплавлення основного металу по ширині. Можливо потрібно збільшити силу струму або зменшити швидкість зварювання.
3. Відсутність підрізів свідчить про адекватний об'єм перенесення електродного металу в зварювальну ванну.

4. Напруга дуги 25 В є оптимальною для отримання стабільного горіння. Але для покращення формування швів може знадобитися її збільшення.

Отже, для виправлення ситуації потрібно скорегувати режими зварювання та зменшити вміст рутилу в покритті. Це має покращити формування швів.

Додавання в рутилову шихту флюоритового концентрату у різних співвідношеннях з рутилом відразу дозволило покращити зовнішній вигляд швів, дрібнолускова поверхня швів забезпечувала досить легку відокремленість шлакової корки, розбризування зменшилось. Валики придбали більш полого форму. Підрізи були відсутні. Однак процес запалювання електродів погіршився. Напруга на дузі ~ 30В.

Подальше поліпшення зварювально-технологічних властивостей дослідних електродів пов'язано з введенням в шихту польового шпату, що дозволило покращити запалювання електродів, а також зовнішній вигляд валиків (дрібнолускова блискуча поверхня) і легке відділення шлакової корки. Валики пологі. Напруга на дузі ~ 30В.

Введення мармуру викликало досить сильне газове виділення, що супроводжувалося розбризуванням і зменшенням стабільності процесу.

Введення до складу шихти металевих компонентів, таких як хром, нікель, марганець, молібден, що дозволило компенсувати їх вигорання в процесі зварювання, показало, що нікель (у вигляді металевого порошку) при введенні його до 20% від ваги шихти не погіршує зварювально-технологічних властивостей дослідних електродів (теж саме і марганець), в той час, як хром і молібден впливають негативно на процес формування валиків, які наплавляються.

Після додаткових випробувань серії покриттів на базі $\text{CaF}_2\text{-TiO}_2\text{-KAlSi}_3\text{O}_8$ встановлений базовий варіант покриття.

Електроди з таким покриттям мають задовільні зварювально-технологічні властивості при підводному мокрому зварюванні в нижньому положенні.

Висновок

Представлено результати досліджень, спрямованих на вдосконалення технології мокрого підводного зварювання шляхом підбору оптимального складу шихти електродних покриттів. Основна увага приділена забезпеченню стійкого горіння зварювальної дуги під водою, що є ключовим фактором для якісного формування зварних з'єднань.

Отримані результати є важливими для розробки ефективних електродних матеріалів, здатних забезпечити стабільне горіння дуги та формування якісних зварних швів в умовах мокрого підводного зварювання. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення металургійних процесів у зварювальній ванні та структуроутворення в металі шва та зоні термічного впливу.

Перелік посилань

1. Толок В.А. Метод конечных элементов: теория, алгоритмы, реализация / В.А.Толок [и др.]. – К.: Наук. думка, 2003. – 316 с.
2. Игнатов В.А., Земзин В.Н., Петров Г.Л. Влияние никеля в аустенитных швах на миграцию углерода в сварных соединениях разнородных сталей. Автомат. сварка, 1964, № 4

УДК 621.326

Володимир Гаврилюк¹; Чеслав Пулька², д.т.н., проф.

¹ ВСП Тернопільський фаховий коледж ТНТУ імені Івана Пулюя, Україна

² Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ІНДУКЦІЙНЕ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДЦЕНТРОВОГО ОБЕРТАННЯ

Анотація. Індукційне нагрівання знайшло широке застосування в різних галузях промисловості. Особливо цікавим є процес наплавлення із використанням даної технології нагріву. Його особливістю є розігрів тільки поверхневих шарів металу, що значно зберігає його фізико-механічні властивості не погіршуючи їх. Крім цього додаткове застосування відцентрового обертання дозволяє покращити ці властивості.

Ключові слова: індукційне наплавлення, нагрівання, тонкий диск, стабільність, зносостійкість, відцентрове обертання.

Volodymyr Havryliuk; Cheslav Pulka, Ph.D., Prof.

INDUCTION SURFACING OF CYLINDRICAL THIN DETAILS USING THE CENTRIFUGAL ROTATION

Abstract. Induction surfacing have a wide application in industry. The increase physical and mechanical properties of details perform of this method. The additional improvement of details properties are possible with using the centrifugal rotation too.

Key words: induction surfacing, disk, centrifugal rotation.

Індукційне нагрівання знайшло своє широке застосування завдяки високим технологічним можливостям. Зокрема даний процес впроваджений в технологіях зварювання, наплавлення, паяння, термічної обробки та ін. Крім цього індукційне нагрівання використовується і в ремонті автомобілів, а саме для підігріву нарізних з'єднань з метою легкого їх розкручування та знімання. Істотні переваги даний процес має завдяки своїй високій продуктивності, так нагрівання металу до необхідної високої температури займає тільки декілька секунд порівняно з іншими джерелами нагрівання, де розігрівання може тривати хвилинами, а то і більше. Тому індукційне нагрівання знайшло своє місце і в металургії для виробництва чорних та кольорових металів високої якості.

Крім того що даний процес має широке коло свого застосування, але в цій роботі буде розглядатися саме технологічний процес індукційного наплавлення. Його суть полягає у нанесенні шару покриття на основний метал, який буде володіти підвищеними механічними властивостями. Набуття поверхні металу цих особливих властивостей дозволяє значно підвищити свої експлуатаційні показники.

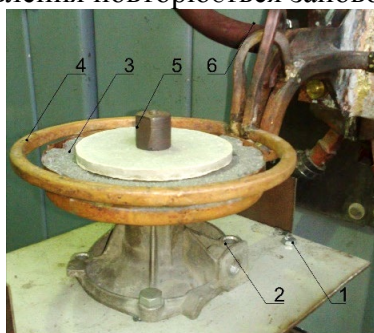
Дана технологія наплавлення буде розглядатися на прикладі тонких деталей циліндричної форми, а саме дисків. Їх основне місце застосування – це сільськогосподарська ґрунтообробна техніка, яка в процесі своєї роботи зазнає істотних навантажень і спрацювань за рахунок дії на неї абразивних частинок ґрунту. У випадку відсутності на деталі зміцнювального поверхневого шару є поганим наслідком для її експлуатаційних показників, оскільки ресурс скорочується в рази за рахунок малого спротиву до абразивного спрацювання, яке характерне для ґрунтів.

Індукційне наплавлення тонких деталей виконується, як правило в діапазоні високих частот. Це дозволяє розподілити дію нагрівання тільки в поверхневому шарі основного металу, який в подальшому буде контактувати і з'єднуватися вже безпосередньо з наплавленим металом. Якщо не використовувати високі частоти, то

нагрівання металу деталі відбуватиметься по всій глибині її перерізу, а оскільки вона є тонкою, то це може досить сильно її пошкодити. Для прикладу може відбутися її викривлення, що призведе до порушення геометричної форми і розмірів деталі, а це вже буде вважатися браком. Також надмірний інтенсивний вплив високих температур спричиняє вигорання корисних домішок з металу деталі, а це негативно відбивається на її фізико-механічних характеристиках.

Процес індукційного наплавлення може відбуватися по різних технологічних схемах та з поєднанням додаткових операцій, що мають позитивний вплив на формування поверхневого шару напавленого металу з наданням йому деяких особливих властивостей. Так існують схеми одночасного безперервного наплавлення та переривчастого, де даний процес відбувається на окремих ділянках металу з покроковим переміщенням-прокручуванням деталі. Перший варіант наплавлення дозволяє одержати більшу продуктивність процесу, однак другий варіант можливий для нанесення шару покриття по великому периметру деталі. Так як інколи потужності використовуваного устаткування не достатньо, щоб розплавити наплавлюваний шар металу одночасно по всьому периметру деталі без утворення дефектів.

Однією з таких схем, що представлена на рис. 1, є одночасне наплавлення диска із додатковим застосуванням операції відцентрового його обертання відносно вертикальної осі. Суть даного процесу полягає у нанесенні на поверхні деталі шару наплавлюваного матеріалу відповідної ширини і товщини. Потім відбувається встановлення підготовленої деталі у пристосуванні з механізмом обертання (див. рис. 1), яке розташоване в полі дії двовиткового кільцевого індуктора, що під'єднаний до джерела живлення – генератора високої частоти. Власне цей генератор є основним джерелом високочастотної енергії, яка направляється на деталь розігрівуючи її за допомогою робочого інструмента – індуктора. В момент плавлення нанесеного на деталь шару матеріалу вмикається обертальний механізм пристосування, який обертає її аж до моменту повного сплавлення з нанесеним матеріалом та частковим охолодженням. Після чого вже готовий напавлений диск знімається з пристосування, на його місце встановлюється підготовлений новий і так технологічний цикл наплавлення повторюється заново.



- 1 – пристосування;
- 2 – обертальний механізм;
- 3 – диск (деталь) з нанесеним матеріалом;
- 4 – двовитковий кільцевий індуктор;
- 5 – фіксатор;
- 6 – високочастотний генератор

Рис. 1. Схема одночасного індукційного наплавлення з обертанням деталі

Використання індукційного наплавлення дозволяє якісно покращити фізико-механічні властивості напавлених деталей. А додаткове застосування операції відцентрового обертання деталі, приводить до підвищення таких характеристик як стабільність та рівномірність товщини напавленого шару металу, при умові збереження високої його зносостійкості. Оскільки рівномірно розподілений шар металу по поверхні деталі правильно сприймає розподілене навантаження, що впливає на нього в процесі експлуатації, не викривлюючись та не відшаровуючись від основи при інтенсивному його використанні в полі дії абразивного спрацювання, яке притаманне грунтам.

УДК 621.791.019

Володимир Гаєвський, к.т.н., доц.; Олег Гаєвський, к.т.н., доц.; Антон Кушнір
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПІВ БЕРЕЖЛИВОГО ВИРОБНИЦТВА ДО ПЛАНУВАННЯ ДІЛЬНИЦІ СКЛАДАННЯ ТА ЗВАРЮВАННЯ

Анотація. По результатах досліджень кафедри зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського сформульовані пропозиції щодо застосування методології Бережливого виробництва з врахуванням специфіки процесів зварювання.

Ключові слова: бережливе виробництво, зварювання, KANBAN, FMEA.

Volodymyr Haievskiy, Ph.D., Assoc. Prof., Oleh Haievskiy, Ph.D., Assoc. Prof., Anton Kushnir

APPLICATION OF LEAN PRODUCTION PRINCIPLES TO ASSEMBLY AND WELDING SITE PLANNING

Abstract. According to the results of the research of the department of welding production of KPI named after Ihor Sikorsky formulated proposals for the application of Lean manufacturing methodology, taking into account the specifics of welding processes.

Keywords: lean production, welding, KANBAN, FMEA.

Застосування методології Бережливого виробництва дає можливість суттєвого підвищення ефективності виробничих процесів. Це призводить до поширення практичного застосування цієї методології. Проте, кожна виробнича сфера має свої особливості, які мають бути враховані при впровадженні методології. Відповідно до міжнародного стандарту ISO 14741 підготовка виробничої інфраструктури є складовою координації зварювальних робіт. Визначення можливостей застосування сучасної методології до підготовки виробничої інфраструктури у контексті планування виробничих площ є актуальною науково-технічною задачею.

В основі Бережливого виробництва покладено п'ять базових принципів, орієнтованих на усунення всього зайвого і такого, не додає цінності до продукту з точки зору користувача. До принципів Бережливого виробництва відносять: визначення цінності з точки зору споживача, планування потоку створення цінності, планування процесу створення цінності, побудова системи «витягування продукту», реалізація безперервного покращення.

Показано, що при плануванні виробничої ділянки складання та зварювання слід виходити, з того що з точки зору користувача зварного виробу, ключова цінність пов'язана з якістю виробу, тобто відповідністю встановленим вимогам власних функційних характеристик та характеристик безпеки виробу. Для кількісного визначення цінності характеристик з точки зору їх впливу на користувача виробу рекомендовано застосовувати показник пріоритетного числа ризиків (RPN - Risk Priority Number), знайденого за методикою аналізу можливості та впливу відмов (FMEA - Failure modes and effects analysis). Такий підхід дозволив провести ранжування показників якості зварного виробу відносно ризиків, пов'язаних з невиконанням вимог, визначити пріоритетні показники, розробити плани контролю, які комплексно враховують потенційну результативність заходів з попередження невиконання вимог та застосованих планів контролю якості, запропонувати технічні рішення, які забезпечують прийнятний рівень ризиків появи дефектів зварювання. Проведення аналізування потенційних відмов та можливих наслідків за методикою FMEA

дозволило оптимізувати сукупність заходів щодо забезпечення якості зварного виробу, включаючи застосовну оснастку та допоміжні засоби, застосовні методи контролю, контрольне обладнання та об'єми вибірки, необхідні для забезпечення якості з мінімальними витратами на якість та мінімальними ризиками невиконання вимог.

Картування потоку створення цінності в межах дільниці складання та зварювання дозволило визначити слабкі місця виробничого процесу. Такими є місця, в яких відбуваються зупинки, вимушені очікування внаслідок недостатнього балансування виробничого процесу, матеріальні затори або провали у виробничому циклі. При картуванні потоку створення цінності визначена оптимально необхідна кількість технологічного та допоміжного обладнання за всією номенклатурою, номенклатура та необхідна кількість тари, засобів переміщення місць складування матеріалів (в тому числі зварювальних матеріалів), вузлів та готових виробів. Планування дільниці цеху складання та зварювання, здійснене з використанням карти потоку створення цінності дозволило зменшити непродуктивні витрати у виробництві у 2-2,5 рази, в залежності від складності зварного виробу, який виготовляється на дільниці, що проектується. Карта потоку цінності складає основу для оптимізації розміщення елементів інфраструктури на плані дільниці цеху.

Результати аналізу потоку створення цінності дозволяють перейти до оптимізації самого виробничого процесу як сукупності взаємопов'язаних видів діяльності по перетворенню входів процесу у його виходи. При цьому визначені ділянки процесу з послідовним виконанням операцій, точки розділення процесу на окремі гілки за ознакою або/та, точки об'єднання процесу за ознакою або/та, побудовано потік виконання робіт (Workflow). Це дозволило визначити та оптимізувати час виконання робіт персоналом, машинний час, час виробничого циклу за процесом, час перебування матеріалів у виробничій системі. Зведення до мінімуму витрат часу є дуже важливим етапом впровадження методів Бережливого виробництва до робочої системи.

Відомо два ключові підходи до організації планування та диспетчеризації виробничого процесу на дільниці. Класичний підхід, на основі «виштовхування» продукту матеріалами. На цьому підході функціонують сучасні інформаційні модулі MRP. При такому підході вихідною є кількість зварних виробів, яку необхідно виготовити до встановленого часу. Таким чином плануються і формуються виробничі партії матеріалів, деталей, вузлів та партії готової продукції в напрямку від входу матеріалів до виходу готової продукції. Бережливе виробництво побудовано на «витягуванні» продукції. Тобто відбір одиниці або партії продукції є сигналом на необхідність виконання останньої операції, необхідної для появи виробу на виході, що дає сигнал на необхідність виконання попередньої операції. Так сигнал передається по ланцюжку до самої першої операції і відвантаження одиниці на виході процесу призводить до «витягування-переміщення» наступної одиниці по всьому ланцюжку. «Витягаюча» система дозволяє звести до мінімуму операційні запаси, проте потребує застосування диспетчеризації за допомогою карток KANBAN та створення проміжних «супермаркетів» в яких відбувається заміна відібраної матеріальної одиниці на картку KANBAN, що є сигналом на виробництво одиниці на заміну відібраної. Нами запропоновані підходи до врахування специфіки зварювального виробництва до розроблення супермаркетів та карток KANBAN.

Запропоновано процес безперервного поліпшення виробничої системи оснований на аналізуванні даних про невідповідності за діаграмою Парето, з пошуком кореневих причин 5W та статистичним контролем частоти появи дефектів за контрольною картою Шухарта.

УДК:621.891

Олександр Диха, д.т.н., проф.; Анатолій Вичавка; Максим Диха, к.т.н.; Володимир Дитинюк, Ph.D.

Хмельницький національний університет, Україна

РЕМОНТ КЛАПАНІВ ГРМ АВТОМОБІЛЬНОГО ДВИГУНА НАПИЛЕННЯМ ЗНОСОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ

Анотація. Запропонована технологія нанесення зносостійкого покриття на зношені поверхні клапана двигуна внутрішнього згорання, обґрунтований вибір ремонтних матеріалів. Досліджена мікроструктура покриття, рекомендовані експериментальні випробування зносостійкості відновлених клапанів

Ключові слова: клапан, покриття, напилення, мікроструктура, зносостійкість

Oleksandr Dykha, Ph.D., Prof.; Anatoliy Vychavka; Maksym Dykha, Ph.D.; Volodymyr Dytynyuk, Ph.D.

REPAIR OF CAR ENGINE TIMING VALVES BY SPRAYING A WEAR-RESISTANT COATING

Abstract. The proposed technology of applying a wear-resistant coating to the worn surfaces of an internal combustion engine valve, a justified choice of repair materials. The microstructure of the coating was studied, experimental tests of the wear resistance of restored valves were recommended

Keywords: valve, coating, spraying, microstructure, wear resistance

Розвиток технологічних процесів ремонту на даний момент передбачає різні методи [1-4] підвищення зносостійкості нових і відновлення зношених деталей, що дозволяють компенсувати знос поверхонь тертя, забезпечують зниження коефіцієнта тертя, зменшують гідроабразивний знос, корозію та ін. Клапана двигунів внутрішнього згорання в процесі експлуатації зношуються, що призводить до зменшення терміну служби та необхідності дорогого ремонту двигуна внутрішнього згорання. На рис. 1 показані основні експлуатаційні дефекти клапанів: знос робочих фасок і стрижнів, вигин стрижнів, викришування матеріалу від циклічних ударних навантажень та інші.



Рисунок 1 – Дефекти клапанів двигунів внутрішнього згорання.

Для зміцнення клапанів зазвичай наносять захисний шар покриття різними методами. До найбільш поширених способів відновлення клапанів можна віднести: газополум'яне напилення, електродугову наплавку в середовищі інертного газу електродом, що плавиться, електродугову наплавку в середовищі інертного газу вольфрамовим електродом, плазмову наплавку і напилення.

З існуючих способів застосування плазмового стовба дуги найбільшого поширення набула плазмово-порошкове напилення як найбільш універсальний метод. При плазмово-порошковому напиленні використовують гранульовані металеві

порошки, які подаються в плазмотрон транспортуючим газом за допомогою спеціального живильника. Метод порошкового плазмового напилення є найбільш оптимальним за продуктивністю, ціною та якістю. До переваг способу плазмового напилення відносять можливість отримання покриттів з більшості матеріалів, що плавляться без розкладання та обмеження температури плавлення. Продуктивність плазмового напилення досить висока: 5-10 кг/год для плазмотронів з потужністю 30-40 кВт та 60-70 кг/год для плазмотронів потужністю 100-150 кВт. Як плазмоутворюючі гази застосовують аргон, азот високої чистоти, водень, гелій, а також суміші цих та інших газів. В останні десятиліття успішно розвиваються процеси плазмового напилення з використанням як плазмоутворюючого газу суміші повітря з палим вуглеводневим газом (метаном, пропан-бутаном). Напилення клапанів проводили на установці плазмового напилення Київ-7. Плазмотрон (рис.2) використовувався для наплавлення зносостійких, фрикційних та інших спеціальних покриттів, що наносяться на поверхню клапанів методом напилення порошкових матеріалів. Плазмотрон є конструкцією, що складається з двох ізольованих вузлів, катодного (верхнього) і анодного (нижнього), вмонтованих в рукоятку. Дуговий канал цих плазмотронів утворений катодом з вольфрамовою вставкою, зароблений в обойму формуючим соплом, секціями міжелектродної вставки і мідним анодом.

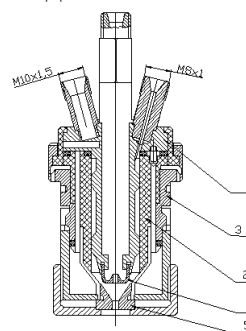
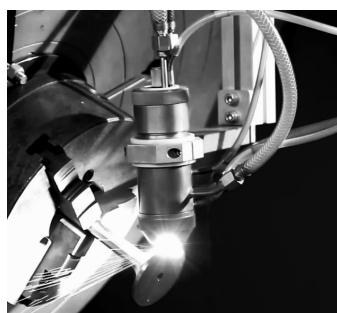


Рисунок 2 – Схема процесу напилення та плазмотрон для плазмового напилення клапанів

Напилення проводили з використанням порошку ПН55Т45. Це порошок на нікелевій основі з титаном фракції 50 ... 100 мкм, що застосовується для створення зносостійких, корозійностійких, жароміцних покриттів. Як матеріал також вибираються композиційні порошки на основі заліза (у тому числі і нержавіючі сталі), кобальту, нікелю (у тому числі і самофлюсуючі), що володіють властивостями, що забезпечують корозійну, ударну, теплову стійкість і стійкість до зносу.

Як плазмоутворюючий газ використовувалося повітря. Як захисний газ (завіса анода), транспортуючий і фокусуєчий газ використовували суміш повітря і пропан-бутану. Витрата плазмоутворюючого газу становила 2 г/с, захисного – 0,35 г/с, транспортуючого та фокусуєчого газів – по 0,8 г/с. Безпосередньо перед напиленням проводили піскоструминну обробку поверхні основного металу. Для зняття внутрішніх напружень у покриттях, після напилення виконували відпал при температурі 300 °С протягом 3 годин. Товщина нанесених покриттів складала 300-400 мкм.

Для проведення металографічних досліджень використовували растровий електронний мікроскоп EVO50 XVP (CarlZeiss) з використанням мікроаналізатора. Для визначення фазового складу покриттів використали рентгенівський дифрактометр. Пористість покриттів визначали мікроскопічним методом. В результаті досліджень встановлено, що сформовані покриття характеризуються складною структурою (рис. 3).

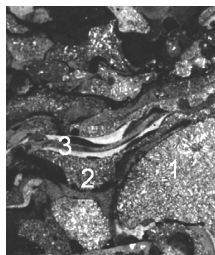


Рисунок 3 – Структура напшеного порошкового покриття

У структурі є нерозплавлені та недеформовані частинки (1); нерозплавлені, але пластично деформовані (2) та розплавлені частинки (3). Кількість нерозплавлених частинок у покритті відносно невелика (не більше 10%). Властивості плазмового покриття переважно визначаються частинками типу 3, оскільки саме вони формують при кристалізації твердість до 1000 НV. Також слід зауважити, що неправильно вибраний режим напшення може сприяти відшарування покриттів. Високі швидкості охолодження розплавлених частинок сприяють формуванню розтягуючих залишкових напружень у покриттях. Коли залишкові напруження перевищують міцність зчеплення, покриття відшарується. Зносостійкість покриттів при терті оцінювали за допомогою установки для випробувань на тертя та знос клапанів двигунів внутрішнього згоряння.(рис. 4).

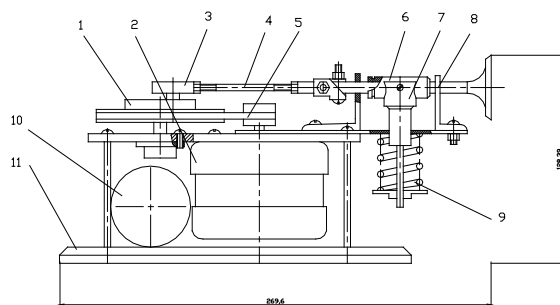


Рисунок 4 – Установка для випробувань на зношування клапанів ДВЗ

Результати порівняльних випробувань покриттів на зносостійкість показали, що триботехнічні властивості покриттів трохи знижуються зі збільшенням сили струму при напшенні, що добре корелює з результатами вимірювання пористості. Таким чином, технологія плазмового напшення клапанів двигунів внутрішнього згоряння дозволяє сформувати якісні покриття, що мають низьку пористість, високу зносостійкість, твердість і адгезію. Триботехнічні властивості покриттів трохи знижуються зі збільшенням струму дуги в процесі напшення, що добре корелює з результатами вимірювання пористості.

Перелік посилань

1. Moon, K. M., Lee, K. H., Cho, H. R., Lee, M. H., Kim, Y. H., & Kim, J. G. (2008). An electrochemical study on corrosion property of repair welding part for exhaust valve. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(3), 82-88.
2. Bogdanowicz, Z., & Grzelak, K. (2011). Laser rebuilding of engine exhaust valves. *Journal of KONES*, 18, 57-68.
3. Agyemang, S. (2014). Effects of Poor Engine Repairs and Maintenance by Mechanics Operating in Local Garages. *Industrial Engineering Letters*, 4, 74-82.
4. Halderman, J. D., & Mitchell, C. D. (2008). *Automotive Engines*. Pearson India.

УДК 621.791.753.014

Олександр Костін, к.т.н., доц.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

ВПЛИВ ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ КАТЕГОРІЇ E36

Анотація. Показано, що при збільшенні погонної енергії зварювання до 4,2 кДж/мм наплавлений метал категорії 4Y40 не забезпечує заявлені показники ударної в'язкості, що пов'язане з критичним, залежним від термічного впливу ростом дендритів. Інші показники міцності зварних з'єднань сталі категорії E36 залишаються прийнятними. У зв'язку з цим погонну енергію при автоматичному зварюванні під флюсом потрібно обмежувати до 3,0...3,5 кДж/мм.

Ключові слова: зварне з'єднання, погонна енергія, ударна в'язкість.

Oleksandr Kostin, Ph.D., Assoc. Prof.

IMPACT OF HEAT INPUT ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STEEL (E36) WELDED JOINTS

Abstract. Article shows that during the increase of heat input to 4.2 kJ/mm the weld metal of category 4Y40 does not meet the declared characteristics of impact toughness. In this regard, the heat input during the welding should be limited to 3,0...3,5 kJ/mm.

Keywords: welded joints, heat input, impact toughness.

Підвищення ефективності суднобудівного виробництва супроводжується впровадженням автоматичних способів зварювання та збільшенням погонних енергій при зварюванні, що не завжди є доцільним з точки зору забезпечення заявлених механічних характеристик зварних з'єднань [1].

Атестація технологічних процесів зварювання є обов'язковою в сучасному виробництві та регламентована стандартом ДСТУ EN ISO 15614-1, рівень 2. Призначення зварювальних матеріалів регламентоване Правилами Класифікаційних Товариств (LR, BV тощо) залежно від категорії сталі. Наприклад, для автоматичного зварювання під флюсом сталі категорії E36 оптимальною є комбінація дріт-флюс категорії 4Y40, виробництво якої регламентовано стандартом ДСТУ EN ISO 14171 з класифікацією А. Останній стандарт обмежує погонну енергію при сертифікації зварювальних матеріалів інтервалом 1,8...2,2 кДж/мм, що зазвичай не враховується фахівцями зварювального виробництва при розробці технологічних процесів для виготовлення суднобудівних конструкцій.

У зв'язку з цим нами було визначено за мету – дослідити вплив погонної енергії зварювання на механічні характеристики зварного з'єднання сталі категорії E36, з використанням комбінації дріт-флюс категорії 4Y40 (дріт ОК Autrod 12.22 (S) / флюс ОК Flux 10.71), в інтервалі погонної енергії 1,5...5,0 кДж/мм. Підготовка кромки відповідає з'єднанню 1/2V (2.4.9 за ДСТУ EN ISO 9692-2). Погонну енергію обчислювали відповідно до настанов ДСТУ ISO/TR 18491, номер формули (1), термічний коефіцієнт $k=1$ (ДСТУ ISO/TR 17671-1) та регулювали зміною параметрів режимів зварювання в межах: $I_{зв} = 400...800$ А; $U_{д} = 26...34$ В; $V_{зв} = 41,5...31,0$ см/хв. Міжвалікова температура у всіх випадках не перевищувала 150 °С. Зразки довжиною один метр зварювали за допомогою автоматичного комплексу АСТ 1000. Після зварювання виконували неруйнівні та механічні випробування відповідно вимог стандарту ДСТУ EN ISO 15614-1, рівень 2. Роботу проводили в лабораторії Об'єднання

«Суднобудівний учбовий центр зварювальної техніки» (м. Миколаїв), яка акредитована Bureau Veritas та має сертифікат відповідності SMS.LAB.320/134467/02/A.0.

Результати досліджень наведено в таблиці 1. Аналіз отриманих результатів показав, що міцність зварних з'єднань, у всіх випадках, знаходилась на рівні базових показників основного металу (руйнування за основним металом). Таким чином, було підтверджено стабільність характеристик міцності зварних з'єднань та наплавленого металу у наведеній комбінації в діапазоні погонних енергій 1,5...5,0 кДж/мм [2]. Випробування поперечних зразків на згин бокової поверхні шва, по два зразки вздовж та проти напрямку зварювання для кожного контрольного з'єднання, при співвідношенні діаметру оправки до товщини 4:1, показало, що всі зразки витримують згин на 180° без руйнування та утворення неприпустимих дефектів, що є задовільним результатом.

Таблиця 1. Механічні властивості зварних з'єднань

Категорія сталі (товщина, мм)	Категорія зварювальних матеріалів	Погонна енергія зварювання, $Q_{зв}$, кДж/мм	Міцність на розрив, R_m , Н/мм ²	Середні значення роботи удару, KV , Дж				
				Температура випробувань, °С	Метал шва	Лінія сплавлення (Л.С.)	Л.С. +2 мм	Л.С. +5 мм
E36 (30)	4Y40	1,5	507	-40	87	173	195	170
E36 (30)	4Y40	2,5	508	-40	51	143	201	155
E36 (30)	4Y40	4,2	505	-40	36	92	165	203
E36 (30)	4Y40	5,0	509	-40	16	68	188	175

Протилежний вплив надає збільшення погонної енергії на ударну в'язкість металу шва та ЗТВ, особливо її високотемпературної складової. В інтервалі погонних енергій до 2,5 кДж/мм середні показники роботи удару металу шва задовольняють категорійним вимогам, які складають 39 Дж при -40 °С, а при збільшенні погонної енергії демонструють показники ударної в'язкості значно нижче нормативних. Це пояснюється тим, що основним чинником, який впливає на показники ударної в'язкості металу шва, є його макро-мікроструктура, яка напряму залежить від погонної енергії (геометрії швів). На рис. 1 показана макроструктура металу швів залежно від впливу погонної енергії. У нашому випадку, при збільшенні погонної енергії до максимальних величин, висота зварювальних проходів збільшується в середньому в 2,6 рази, ширина – в 1,6 рази (див. рис. 1, зона А).

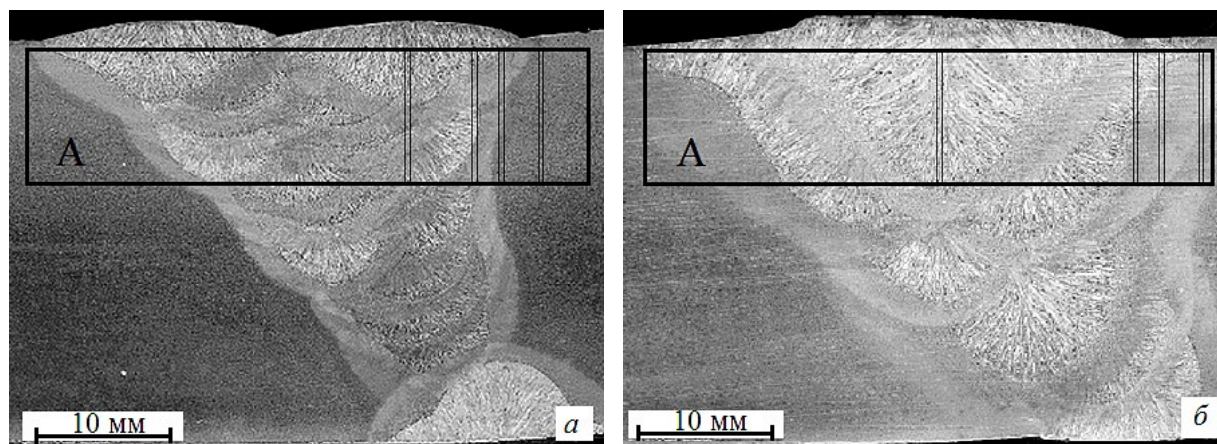


Рис. 1. Макроструктура зварних з'єднань: а – $Q_{зв} = 1,5$ кДж/мм; б – $Q_{зв} = 5,0$ кДж/мм

Аналіз макроструктури показав, що при збільшенні погонної енергії відбуваються класичні процеси: зменшується кількість проходів на умовну одиницю об'єму шва та кількість дрібнозернистої структури повторного нагріву, збільшується довжина дендритів та їх міжосьова відстань, змінюється розмір, склад, локальна концентрація включень тощо. Наведені процеси призводять до утворення грубої структури кристалізації, що викликає значну анізотропію властивостей в межах одного зварювального проходу та негативно впливає на ударну в'язкість металу шва. Незадовільні властивості металу шва також зменшують показники ударної в'язкості лінії сплавлення, але цей вплив не є критичним (див. табл. 1) [3].

Висновки

В результаті виконаних досліджень встановлено:

1. Міцність на розрив та пластичність зварних з'єднань суднобудівної сталі E36 не залежать від погонної енергії зварювання в інтервалі 1,5...5,0 кДж/мм.
2. Робота удару металу шва, при збільшенні погонної енергії зварювання в інтервалі 1,5...5,0 кДж/мм, зменшується, що пов'язане з утворенням грубої структури кристалізації. При погонній енергії більше 4,2 кДж/мм зварювальні матеріали категорії 4Y40 не забезпечують заявлені показники роботи удару.
3. Для забезпечення належної ударної в'язкості металу шва потрібно обмежувати погонну енергію при автоматичному зварюванні під флюсом до 3,0...3,5 кДж/мм.

Перелік посилань

1. Костін О.М. Рекомендації щодо випробувань зварюваності при сертифікації виробництва суднобудівних сталей. / «Автоматичне зварювання», № 2, 2023, с. 40-45.
2. Kostin A.M., Martynenko V.A. Analytical and practical assessment of higher strength hot-rolled plate weldability. / Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XII, Welding Equipment and Technology [this link is disabled](#), 2017, 28, pp. 45–50.
3. Kostin A.M., Martynenko V.O., Vakhonina L.V. Integrated assessment of weldability of steel with increased strength. / Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, Vol. 26, No. 2, 2022, p.9-15.

УДК 621.791: 621.785

Олег Кузін,¹ д.т.н., доц.; В'ячеслав Копилов,¹ д.т.н., проф.; Микола Кузін,^{2,3} д.т.н., проф.

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

² Національний університет «Львівська політехніка», Україна

³ Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, Україна

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ПОВЕРХОНЬ ПОДІЛУ СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ТЕРМІТНОГО ЗВАРЮВАННЯ РЕЙОК

Анотація. З використанням розроблених системних моделей проведено аналіз впливу параметрів стану поверхонь поділу структурних складових на утворення розсіяних і локалізованих пошкоджень в нероз'ємних з'єднаннях рейок при термітному зварюванні. Утворення дефектів в підшвах нероз'ємних з'єднань пов'язано із наявністю в потрійних стиках зерен фериту поверхонь поділу з великою різницею енергій, в яких формуються розсіяні пошкодження. Запропоновані технологічні рішення для зменшення частки потрійних стиків з високим градієнтом енергії, що забезпечують підвищення опору до утворення розсіяних пошкоджень і усунення дефектів при зварюванні.

Ключові слова: розсіяні пошкодження, інтеркристалітне руйнування, термітне зварювання, дефекти нероз'ємних з'єднань

Oleg Kuzin, Ph.D., Assoc. Prof.; Viacheslav Kopylov, Ph.D., Prof.; Mykola Kuzin, Ph.D., Prof.

USING MODELS OF INTERFACE SURFACES OF STRUCTURAL COMPONENTS TO OPTIMIZE THERMITE WELDING MODES OF RAILS

Annotation. Using the developed system models, the influence of the state parameters of the separation surfaces of structural components on the formation of scattered and localized damage in permanent rail joints during thermite welding was analyzed. The formation of defects in the soles of permanent joints is associated with the presence of separation surfaces with a large energy difference in the triple joints of ferrite grains, in which scattered damage is formed. Technological solutions have been proposed to reduce the proportion of triple joints with a high energy gradient, providing an increase in resistance before the formation of scattered damage and the elimination of defects during welding.

Keywords: scattered damage, intercrystalline destruction, thermite welding, defects in permanent joints

Вступ. Особливості утворення дефектів при термітному зварюванні.

Використання технології термітного зварювання на сучасному етапі пов'язано із розвитком швидкісного залізничного транспорту, будівництвом безстикової колії, отриманням довгомірних рейкових плітей безпосередньо в колії, потребою усунення болтових рейкових з'єднань в стрілочних переводах. Основною перевагою метода термітного зварювання є висока мобільність, відсутність необхідності в спеціальних джерелах енергопостачання.

Слід відмітити, що дослідження рейкових стиків, які отримані різними методами вказують на значну кількість дефектів в них після термітного зварювання. Така особливість пов'язана із значною чутливістю технологічного процесу від оптимальних режимів, які можуть викликати появу структурних та фізичних неоднорідностей металу

шва, що сприяють зародженню дефектів, частіше ніж при інших методах зварювання характерним є виникнення поперечних тріщин в підшвах нероз'ємних з'єднань рейок [1].

Формування поверхонь поділу структурних складових та їх роль в утворенні розсіяних і локалізованих пошкоджень.

Отримання з'єднань з підвищеним ресурсом за мінімальних енергетичних втрат вимагає аналізу в них структурної еволюції матеріалу. Характерною особливістю структури зон литого, основного металу та термічного впливу є формування фізичної, хімічної і структурно-фазової неоднорідностей [2].

При затвердінні в литій частині за фронтом кристалізації виникають границі поділу структурних складових між різноорієнтованими ґратками сусідів.

В зоні термічного впливу внаслідок міжкристалітної внутрішньої адсорбції домішок, точкових дефектів, легуючих елементів відбувається їх накопичення на поверхнях поділу. Більша неоднорідність у з'єднанні є характерною поблизу границі сплавлення внаслідок проникнення елементів з розплавленого в основний метал. В той же час дослідження зміни енергетичного стану поверхонь поділу структурних складових з'єднань в залежності від режимів зварювання до кінця не систематизовані.

Слід відмітити, що залишається відкритим питання про роль структури поверхонь поділу зерен з високим рівнем енергії та їх приграничних зон в процесах інтеркристалітного руйнування. Хоча перехід до руйнування по поверхнях поділу зерен супроводжується погіршенням механічних властивостей і надійності виробів [3].

Підвищення властивостей сплавів досягається за рахунок формування структурно-енергетичного стану внутрішніх поверхонь поділу, який забезпечує дисипацію енергії при дії зовнішнього навантаження без їх зміцнення. Такі поверхні поділу представляють собою зони з підвищеним опором утворенню пошкоджень і процесам руйнування сплавів. Для кожного конкретного випадку слід обирати специфічні засоби отримання структурно-енергетичного стану поверхонь поділу зерен, які адекватні конкретним умовам експлуатації виробів. Вирішення цих питань на основі методів обчислювального матеріалознавства обмежується відсутністю встановлених взаємозв'язків між пошкодженістю, що утворюється при технологічних обробках матеріалів деталей, її розвитком при експлуатації виробів та етапами життєвого циклу деталей та машин [4].

Роль параметрів структурно-енергетичного стану поверхонь поділу нероз'ємних з'єднань в утворенні дефектів при термічному зварюванні рейок.

Проводили дослідження нероз'ємних з'єднань рейок Р65 після термічного зварювання. Хімічний склад матеріалу з'єднання був наступний – вміст вуглецю 0.30%, марганцю 0.22%, кремнію 0.89%, хрому 0.90%. Ступінь забрудненості неметалевими включеннями є різною як за висотою, так і за довжиною зварного шва. Більшість включень відноситься до глобулярних оксидів. В підшві нероз'ємних з'єднань їх частка є вищою.

Кількість фериту і перліту в нероз'ємному з'єднанні залежить від умов кристалізації. Найбільше перліту знаходиться у верхній частині головки рейки, а найменше – у нижній частині – підшві.

Значну роль в поведінці литого металу зварних з'єднань при дії зовнішніх навантажень відіграє енергія потрійних стиків поверхонь поділу структурних складових. Ця енергія залежить від вільного об'єму потрійних стиків зерен, який утворюється внаслідок ізоляції рідкої фази при зустрічі трьох фронтів кристалізації. Розрахунок концентрації вакансій показав, що вільний об'єм в потрійних стиках зерен фериту є більшим, ніж в аустеніті, що вказує на можливість переважного зародження пошкоджень при навантаженнях у фериті.

Аналізом кутів між границями у потрійних стиках фериту виявлено, що при переході від головки через шийку до підшви рейки зростає частка поверхонь поділу зерен фериту з більшою величиною енергії, які здатні до утворення міжзеренних пошкоджень.

Дослідження зносотривкості підтвердили зміни структури, які суттєво впливають на інтенсивність зношування термітної сталі. Найбільше зношування спостерігається на зразках отриманих з підшови з'єднання. Різна інтенсивність зношування в значній мірі пов'язана із впливом характеристик великокутових границь і стиків на утворення розсіяних і локалізованих пошкоджень при терті. Затрати енергії на утворення міжзеренних пошкоджень є найменшими на поверхнях поділу, у яких значення енергії наближається до поверхневої. Наявність стиків з кутами між границями 160° - 180° в підшвах рейок вказує на суттєво різницю енергій границь, що формують стик. В зв'язку із цим для підшов нероз'ємних з'єднань характерним є поява дефектів у вигляді поперечних тріщин.

На основі проведених досліджень представлені технологічні рекомендації по зменшенню схильності до утворення міжзеренних пошкоджень та інтеркристалітних тріщин в нероз'ємних з'єднаннях рейок при термітному зварюванні (рис.1).

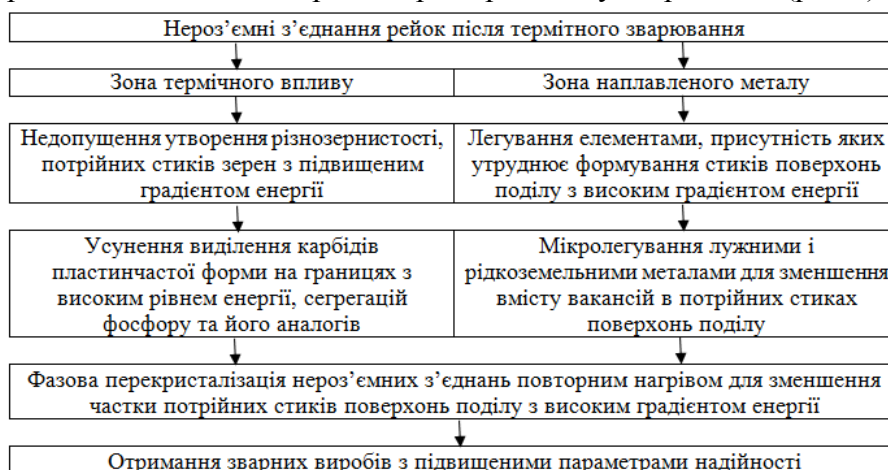


Рис.1. Фактори, що забезпечують підвищення опору до утворення міжзеренних пошкоджень і інтеркристалітних тріщин в нероз'ємних з'єднаннях рейок після термітного зварювання.

Висновки. Утворення поперечних тріщин в підшвах нероз'ємних з'єднань в значній мірі пов'язано із впливом енергетичних характеристик великокутових поверхонь поділу зерен і стиків на формування розсіяних і локалізованих пошкоджень. Наявність поверхонь поділу в потрійних стиках зерен з великою різницею енергій сприяє переходу від розсіяних пошкоджень до локалізованих поперечних тріщин і їх поширенню в пошкодженому середовищі нижньої частини нероз'ємного з'єднання рейок при термітному зварюванні.

Перелік посилань

1. Terashita Y. Analysis of Damaged Rail Weld/ Y. Terashita, M. Tatsumi //Quarterly Report of RTRI. – 2003. – № 44(2). –Р. 59-64.
2. Кузін М.О. Вплив мікроструктури на стійкість проти спрацювання нероз'ємних з'єднань рейок після термітного зварювання/ М.О. Кузін, О.А. Кузін, Т.М. Мещерякова// Наукові записки. Науково-технічний збірник Української академії друкарства. – 2006. – № 2(10). – С. 85 – 97.
3. Watanabe T. The potential for grain boundary design in materials development / T. Watanabe // Materials Forum, – 1988. – № 11. – Р. 284-303.
4. Копилов В.І. Застосування моделей структури поверхонь поділу в сталях під час отримання виробів із заданим життєвим циклом/ В.І. Копилов, О.А. Кузін, М.О. Кузін// Наукові вісті КПІ. – 2022. – № 1-4. – с. 76–81.

621.721.052.539.4.014

Одарка Прохоренко, к.т.н., доц.; Іван Лагодзінський

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

**ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ У ПРОСТОРОВИХ
ВИРОБАХ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ З КРЕМНІЄВОЇ БРОНЗИ
ПІД ЧАС АДИТИВНОГО WAAM ПРОЦЕСУ**

Анотація. Для моделі рівнобічної тригранної призми, яка виготовлена з кремнієвої бронзи CuSi3Mn1 за допомогою адитивної технології GMAW, методом скінченних елементів розв'язана нестационарна задача термопружнопластичності, результатом якої є розподіл еквівалентних напружень у призмі після кожного з 10 наплавлених шарів. Результати моделювання напруженого стану можуть бути використані для оцінки вірогідності утворення тріщин.

Ключові слова: GMAW, WAAM, напружений стан, адитивні технології, кремнієва бронза CuSi3Mn1, пошарове наплавлення

Odarka Prokhorenko, Ph.D, Assoc. Prof.; Ivan Lahodzinskyi

**NUMERICAL MODELING OF THE STRESSED STATE IN SPATIAL PRODUCTS
OF SPATIAL GEOMETRIC SHAPE MADE OF SILICON BRONZE DURING
THE WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING**

Abstract. For a model of an equilateral triangular prism made from silicon bronze CuSi3Mn1 with the use of additive GMAW technology, a nonstationary thermalelastoplasticity problem was solved by the finite element method, which resulted in the distribution of equivalent stresses in the prism after each of the 10 deposited layers. The results of the stress state modeling can be used to estimate the probability of crack occurrence.

Keywords: GMAW, WAAM, stress state, additive technologies, silicon bronze CuSi3Mn1, layer-by-layer deposition.

The widespread use of non-ferrous metals based on copper alloys, such as CuSi3Mn1 silicon bronzes, in industry, due to their high cost and high expenses for manufacturing of the final product, has led to a strong push and development of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technologies for the creation of print-welded metal products by the layer-by-layer arc deposition method.

Previous studies on the practical application of silicon bronze CuSi3Mn1 in additive manufacturing indicate problems associated with the occurrence of cracks during layer-by-layer deposition of samples.

First of all, this is related with the high heat input of one of the methods of applying WAAM technology - deposition using filler wire in shielding gases Gas Metal Arc Welding (GMAW).

In addition, such material as CuSi3Mn1 is characterized by fluidity, high coefficient of thermal expansion, and peculiarities of crystallization process that cause the formation of an anisotropic structure and heterogeneity of mechanical properties in the longitudinal and transverse directions of the deposited metal, which, together with shrinkage during crystallization and the stress level from the deposited layers in the product, can cause cracking.

Taking into account the above-mentioned problems, which are caused by thermodeformation processes and structural transformations in silicon bronze CuSi3Mn1

during additive deposition of bulk products, the study of the stress state is an actual scientific and practical task.

Since the study of the stress state of print-welded products by experimental methods is complicated due to the complex geometric shape of the finished products, it was decided to perform finite element modeling of layer-by-layer deposition and cooling process to solve this problem.

The experimental sample and the finite element model (FEM) that was created on its basis have the form of an equilateral triangular prism with a side length of 50 mm, the total number of deposited layers is 10, and the height of each layer is 1.3 mm. The layers were deposited by GMAW using a 3-axis CNC machine on a 6 mm thick triangular substrate made from stainless steel E304L. For deposition of the sample, filler wire ERCuSiA with a diameter of 1.2 mm was used. The parameters registered during the deposition of 10 layers were used for finite element modeling.

The verification of the developed FEM was performed by comparison of the thermal cycles obtained during the deposition of the sample and as a result of solving the temperature problem for the model by the finite element method.

Experimentally, thermal cycles were measured at three points of the substrate (one point on each of the three straight segments of the depositing trajectory). The deviation between the results of the temperature simulation and data registered during the experiment amounted to 10...15% for the maximum temperature values.

During the experiment, the formation of through going cracks was observed in the silicon bronze CuSi3Mn1 sample in 1...2 and 5...10 layers in the area of junction of the beginning and end of the deposited layer, as well as in the places of sharp change in the deposition trajectory, which necessitated further analysis of the stress fields in the sample model.

Fig. 1 shows the fields of equivalent stresses for the model of the test sample after deposition of each of the 10 layers, and in the residual state after complete cooling. Since the deposition of each layer occurred with a time delay, the stress fields presented correspond to the quasi-residual state of each layer (the state before the next layer was deposited).

From Fig. 1 it can be seen that the stress level in the deposited layers corresponds to the range of 164...187 MPa, which does not exceed the tensile strength of the material (Fig. 2) at the actual temperature of the layer at this point in time. Therefore, it can be concluded that the appearance of cracks in the sample during deposition does not occur in the quasi-residual state after deposition of each layer and not in the residual state after deposition of all layers. In this regard, the stress state of the prism will be analyzed at a specific time point – the completion of deposition of the selected layer.

Fig. 3 shows the distribution of temperatures and equivalent stresses at the time of completion of deposition of the 5th layer: in the cross-section of the deposited layers, it can be seen that at this point the equivalent stresses in the 1st layer reach 144 MPa, which is 0.96 of the tensile strength (~150 MPa) at the actual temperature of the 1st layer of 550 °C (Fig. 2), while the temperature in the other layers (2..5) exceeds 700 °C, and therefore the material is in a weakened state.

Since the determination of the stress state during the sequential deposition of each layer was performed without taking into account the material fracture model, the obtained numerical values of equivalent stresses cannot exceed the tensile strength of the material. At the same time, it can be seen from Fig. 2 and Fig. 3 that the values of the equivalent stresses in the corresponding layers of the model almost reached the tensile strength for the material under study, which suggests the possibility of crack formation in this particular location.

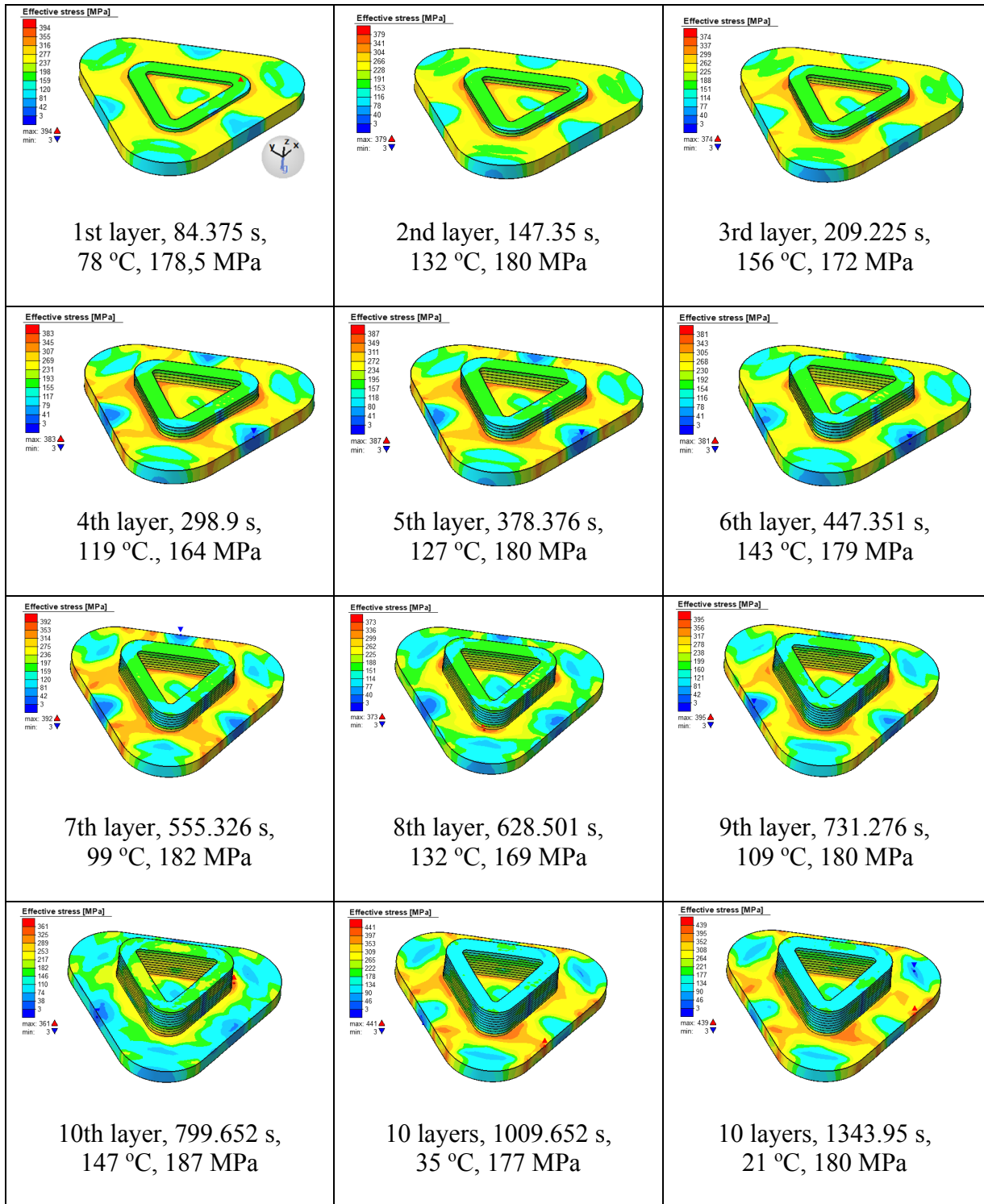


Fig. 1. Equivalent stress fields in the triangular prism model after deposition of each layer and after deposition of all 10 layers

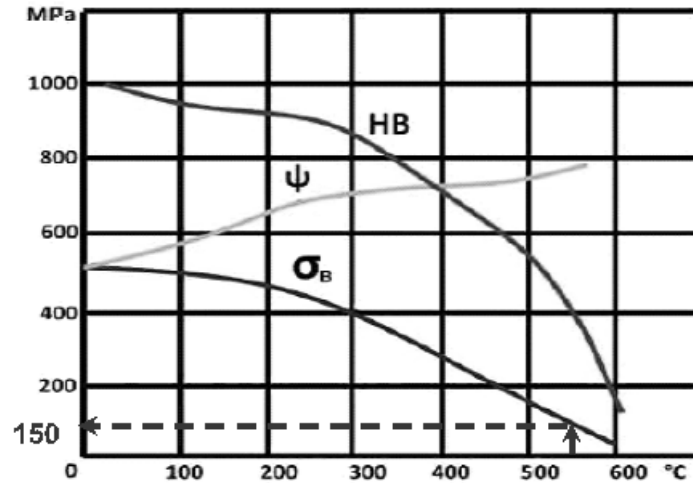


Fig. 2. Dependence of mechanical properties of CuSi3Mn1 on temperature

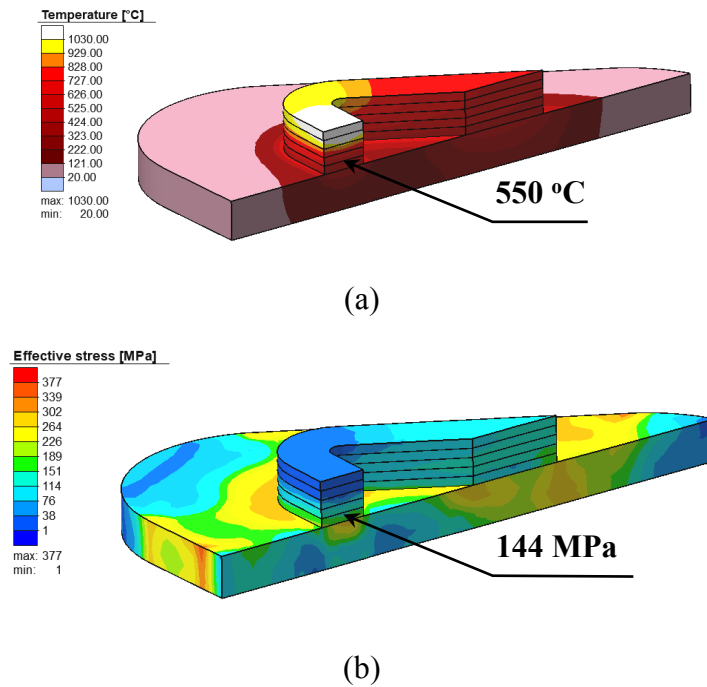


Fig. 3. Stress state in the triangular prism model during deposition of the 5th layer: temperature distribution - (a); equivalent stresses - (b)

Thus, the developed finite element model of a three-dimensional geometric shape that was layer-by-layer deposited by the GMAW method allows, based on a numerical solution of the coupled thermoelastoplasticity problem, to determine the stress state and the probability of crack formation at any moment of heating and cooling stages, with taking into account the chemical composition of the substrate and welding wire materials, changes in the thermal, physical and mechanical properties of materials with temperature, and the sequence of layers deposition.

УДК 621.791.048

Роман Мастенко; Владислав Коваленко, к.т.н, доц.; Наталія Стреленко к.т.н., доц.; Олексій Сливінський, к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

ПРОБЛЕМАТИКА КОРЕКТНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ІСНУВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДУГОВОГО РОЗРЯДУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ

Анотація. У статті розглядається використання комп'ютерного осцилографування для визначення стабільності зварювального дугового розряду в конвеєрному виробництві. Автори досліджують можливість миттєвого визначення стабільності зварювання шляхом аналізу осцилограм струму та напруги. Запропоновано розв'язання у вигляді безперервного розрахунку коефіцієнта стабільності з додаванням нових значень та використанням системи зворотного зв'язку. Для подальшого вдосконалення системи пропонується використання штучного. Висновки дослідження свідчать про перспективи використання визначення стабільності дугового розряду для покращення якості зварних швів у сучасному виробництві.

Ключові слова: зварювання під флюсом, стабільність дугового розряду, осцилографування, масив даних.

Roman Mastenko; Vladyslav Kovalenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Nataliya Strelenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Oleksiy Slivinsky, Ph.D., Assoc. Prof.

THE PROBLEM OF CORRECT DETERMINATION OF THE STABILITY OF THE EXISTENCE OF THE WELDING ARC DISCHARGE IN REAL TIME DURING WELDING UNDER A FLUX

Abstract. The article discusses the use of computer oscillography to determine the stability of the welding arc discharge in conveyor production. The authors explore the possibility of instantaneously determining welding stability by analyzing current and voltage oscillograms. A solution is proposed in the form of continuous stability coefficient calculation by adding new values and utilizing feedback systems. To further improve the system, the use of artificial intelligence is suggested. The research findings indicate the prospects of utilizing arc discharge stability determination to enhance the quality of weld seams in modern production.

Keywords: flux welding, arc discharge stability, oscillography, data array.

Технології з використанням комп'ютерного осцилографування можуть знайти широке застосування у зварюванні, особливо в сучасному конвеєрному виробництві, яке характеризується автоматизацією всіх процесів.

Для застосування методики з визначення стабільності існування зварювального дугового розряду в автоматизованому виробництві потрібно майже миттєво визначати стабільність зварювання, що на практиці стикається з масою проблем.

У процесі зварювання енергетичні параметри змінюються, що можна спостерігати при аналізі осцилограм струму та напруги. Методика визначення стабільності зварювального дугового розряду базується на обчисленні масиву цих даних. Постає питання, який мінімальний розмір масиву потрібен для коректного визначення стабільності, оскільки більший масив даних забезпечує точнішу оцінку, але практично не можна брати нескінченно великі масиви.

Для визначення мінімального розміру масиву даних було взято осцилограму зварного шва при зварюванні під флюсом, яка зображена на рисунку 1. Час зварювання

становив 20 секунд з частотою дискретизації 10^{-5} секунди що дало 200000 значень струму та напруги. Масив даних скорочували з кроком 10000 значень для обчислення коефіцієнта стабільності. Результати показали, що при скороченні масиву до 2-3 секунд значення коефіцієнта стабільності не змінюються суттєво, що свідчить про достатність даних за 2-3 секунди для коректного визначення стабільності процесу.

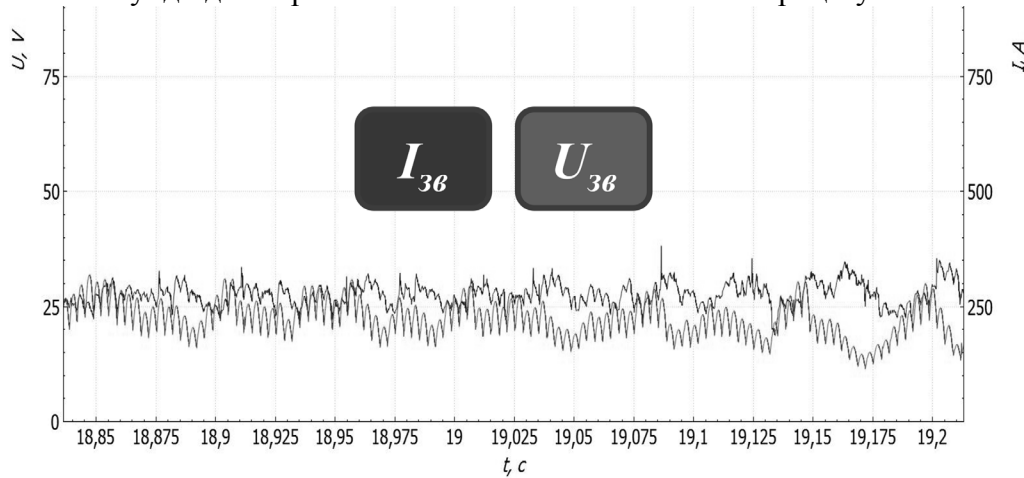


Рисунок 1. – Типова осцилограма при зварюванні під флюсом.

Проте 2-3 секунди затримки не дозволяють вчасно коригувати режим зварювання для забезпечення високої стабільності. Вирішенням може бути безперервний розрахунок коефіцієнта стабільності із додаванням нових значень, що дозволяє зменшити затримку практично до нуля і коригувати параметри зварювання при збуреннях. Для реалізації цього потрібно вдосконалити програмне забезпечення для розрахунку та впровадити систему зворотного зв'язку.

Можливою проблемою в режимі реального часу можуть бути похибки в обчисленнях через важкість фільтрації некоректних даних. Для боротьби з похибками пропонується впровадження аналізу даних із використанням штучного інтелекту. Це дозволить автоматично виявляти некоректні параметри і фільтрувати їх ще перед етапом обчислень. Реалізація цього вимагає формування великого масиву лабораторних даних і відбору даних із похибками для навчання штучного інтелекту.

Таким чином, визначення стабільності дугового розряду має перспективи у сучасному виробництві, і запропоновані методики можуть бути використані для покращення якості зварних швів.

Висновки:

Визначення стабільності існування зварювального дугового розряду має великі перспективи у розширенні та доповненні, щоб могли бути використані в сучасному конвеєрному виробництві при зварюванні під флюсом. Проведені дослідження дозволяють аналізувати та розвивати методику визначення стабільності, а також дають перспективи розширення й на інші способи зварювання.

УДК 621.326

**Святослав Мотруніч, к.т.н., с.д.; Джі Джунвень; Анатолій Завдовеев, к.т.н., с.д.;
Маріанна Димань, к.т.н., с.д.; Іван Волосатов; Віталій Книш, д.т.н., проф.**
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ, ОТРИМАНИХ 3D ДРУКОМ ДУГОВИМИ АДДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГІЯМИ З НИКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 625

Анотація. Дані дослідження показують вплив захисного газу на механічні та структурні властивості 3D надрукованих елементів, отриманих за технологією холодного перенесення металу при використанні дугового адитивного виробництва жароміцного сплаву Inconel 625, який має високу корозійну стійкість.

Ключові слова: дугове адитивне виробництво, Inconel 625, мікроструктура, електронна мікроскопія, механічні властивості.

**Sviatoslav Motrunich, Ph.D.; Ji Junwen; Anatoly Zavdovcev, Ph.D.; Marianna Dyman,
Ph.D.; Ivan Volosatov; Vitaliy Knysh, Ph.D., Prof.**

MECHANICAL PROPERTIES OF 3D PRINTED INCONEL 625 ELEMENTS OBTAINED BY WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract. Present study discusses influence of shield gas influence on mechanical and structural properties of 3D printed elements, obtained by cold metal transfer technology of wire arc additive manufacturing of refractory high corrosion resistant Inconel 625 alloy.

Keywords: wire arc additive manufacturing, Inconel 625, microstructure, electron microscopy, mechanical properties

Inconel 625 – це нікель-хром-молібденовий сплав із високим вмістом нікелю, в порівнянні з іншими сплавами Inconel. Він має високу температуру плавлення, міцність і стійкість до високих температур. Крім того, він має високими антикорозійним та антиокислювальними властивості. Це робить його широко використовуваним в ядерних реакторах, авіації та морській техніці. Форми більшості елементів та конструкцій в цих галузях мають складну форму, що робить їх виготовлення дуже дорогим традиційними методами, через необхідність інтенсивної механічної обробки. Наприклад, літературний огляд показав, що виготовлення ребер жорсткості шасі літаків за дуговими адитивними технологіями (WAAM) дозволяє зекономити до 78% вартості сировини порівняно з іншими традиційними процесами послідовної механічної обробки. Також показано, що показники міцності елементів конструкцій отриманих методом WAAM мають співставні з литими деталями з Inconel 625.

Мікроструктуру Inconel 625 можна додатково описати як двофазну структуру, що складається з матриці твердого розчину та дисперсії тонкодисперсних когерентних частинок інтерметалічної сполуки Ni₃Nb. Матриця твердого розчину складається в основному з нікелю та хрому з меншою кількістю молібдену, заліза та інших елементів, таких як ніобій, вуглець і кремній, залежно від конкретного складу. Наявність ніобію в сплаві сприяє стабілізації матриці та підвищенню її міцності та стійкості до деформації, тоді як дисперсія частинок Ni₃Nb забезпечує додаткове зміцнення та підвищує характеристики повзучості та опору втомі.

Для дугового адитивного 3D друку, використовували джерело живлення Fronius TPS 5000. Присадковий матеріал INCONEL Filler Metal 625 (UNS N06625, ISO 15156-3) діаметром 1,2 мм, для дугового зварювання в середовищі захисних газів, використовувався для WAAM. Процедура плавлення металу реалізувалася за

допомогою роботизованої руки ABB2600. Режим зварювання наплавленням було прийнято як оптимальний відповідно до специфікації Fronius для конкретних зварювальних витратних матеріалів і представлено в Таблиці 1. В ролі підкладки використовували катану пластину з низьковуглецевої сталі товщиною 20 мм. Кожен наступний шар накладався після охолодження попереднього до 100°C. Маршрут сканування та виготовлений елемент стіни схематично показані на Рис. 1а, товщина отриманого елемента стінки становить 15 мм. На Рис 1.б виділені місця вирізки зразків для дослідження механічних властивостей (№1-4) та металографічних досліджень (№5).

Таблиця 1 – Технологічні параметри 3Д друку сплаву Inconel 625

№	Швидкість зварювання, мм/с	Швидкість подачі дроту, м/хв	Захисний газ	Подача газу, л/хв	Зварювальний струм, А	Зварювальна напруга, V
1	10	4.3	Ar, 99,99%	15	107	15,9
2			Ar+2.5%CO		92	10,3

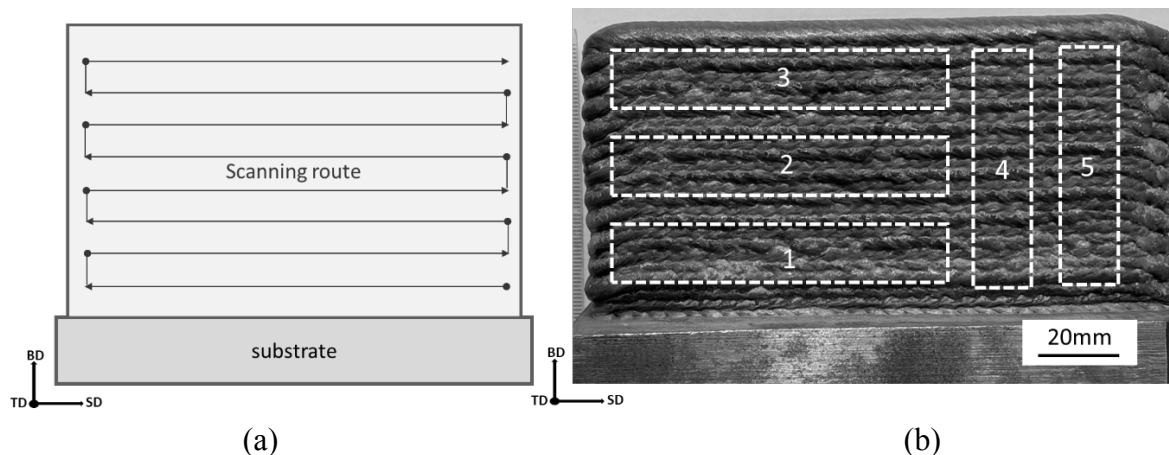


Рисунок 1. Схематичне зображення процесу 3Д друку (а) та виготовленого елемента стінки (б); BD – напрямок по висоті 3Д друку, SD - напрямок сканування, TD-поперечний напрямок.

Випробування на розтяг проводили при кімнатній температурі відповідно до ISO 6892-1 та визначали основні механічні властивості металу зразків: границю міцності (UTS), умовну границю плинності (YS) та характеристики пластичності (δ_5 - рівномірне видовження після розриву та ψ - відносне звуження). З заготовок виготовляли циліндричні зразки з діаметром робочої частини 6 мм (тип II відповідно до ISO 6892). Випробування на розтяг проводили на універсальному сервогідролічному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН. Додатково для встановлення температурного впливу технології на міцність матеріалу проводили дослідження твердості за Віккерсом з навантаженням 100 г протягом 10 с, по 3 вимірювання на точку.

Для структурного аналізу було використано декілька методів: електронної скануючої мікроскопії (SEM, використовуючи установку Tscan Mira 3 LMU) та енергодисперсійний рентгенівський аналіз (EDX, від Oxford Instruments). Підготовку металографічних зразків для мікроструктурних досліджень проводили за стандартними методиками з використанням шліфувальних паперів різної шорсткості (P240, P400, P600, P1200, P2000). Остаточне полірування проводили на алмазній суспензії з розміром полірувальних частинок 1 мкм. Для виявлення та ідентифікації морфології мікроструктури зразка використовували електрохімічне травлення 14% водним

розчином хромового ангідриду. Параметри травлення: анодна густина струму 1 A/cm^2 , напруга 23 В, час витримки 19 с з подальшим промиванням і сушінням.

Мікроструктура металу (Рис. 2), отримані з витравлених зразків, показали чіткі шари, типові для технологій адитивного виробництва, а також межі розплавленої ванни. Мікроструктура демонструє дендритний характер, орієнтований у тому самому напрямку, з відносно дрібною зернистістю на межах кожного шару. Хоча мікроструктура не комірчаста, вона схожа на зварну мікроструктуру.

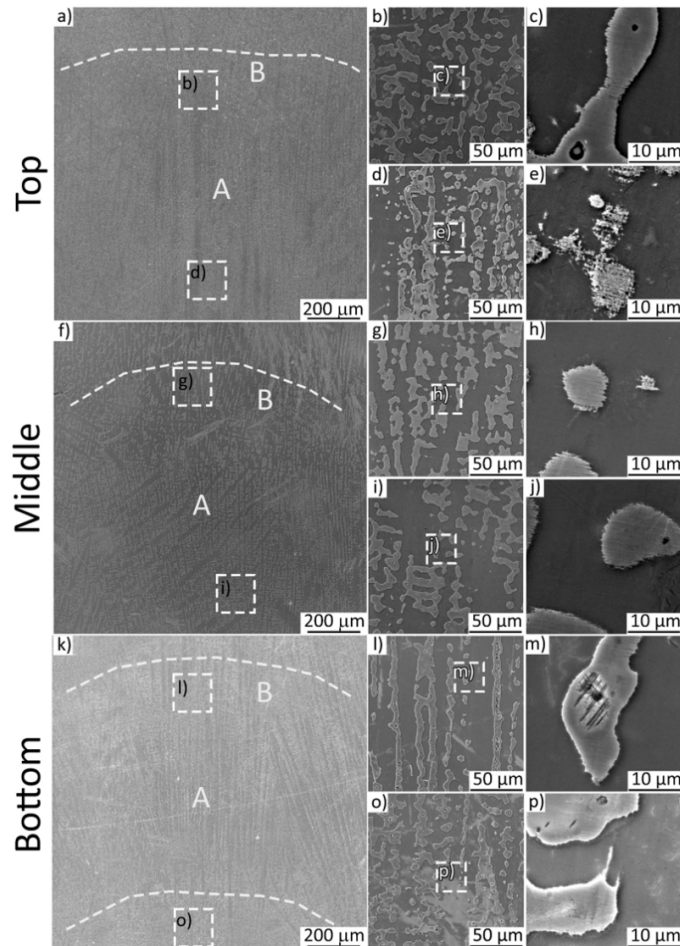


Рисунок 2. Мікроструктура елемента стінки Inconel 625. (a-e) – верхня частина, (f-j) – середня частина (k-p) – нижня частина заготовки. «А» - позначає середину наплавленого шару, «В» - перехід від шару до шару.

В основному мікроструктура складається зі стовпчастих дендритів, як зображено на малюнку 6. Існує тенденція до роздавнення дендритних гілок у точках переходу на сплавлені лінії між послідовними шарами. Крім того, при наближенні до верхньої частини отриманого елемента дендритні гілки стають більш видовженими і розгалуженими. Це пов'язано з тим, що при багат шаровому осадженні попередні шари зазнавали багаторазового термічного впливу і метал піддавався зварювальному відпуску, що, ймовірно, викликало додаткове дисперсійне зміцнення та модифікацію структури. При цьому верхні шари наплавлення мають характерну/близьку до литої структуру

Результати випробувань на розтягування при температурі навколишнього середовища приведені в Таблиці 2. Показано, що 1ий режим 3Д друку (Ar, 99,99%) має дещо нижчі показники пластичності чим 2ий технологічний режим (Ar+2.5%CO). Проте 1ий режим має дещо вищі показники міцності. Рівномірний розподіл значень

видовження спостерігається для всіх досліджуваних технологічних режимів, що свідчить про однорідну структуру зразків. Така закономірність механічних властивостей визначається особливостями структуроутворення при багатошаровому наплавленні.

Таблиця 2 – Механічні властивості досліджуваних зразків із сплаву Inconel 625

Технологія	Місце вирізки зразка	YS, МПа	UTS, МПа	δ_5 , %	ψ , %
1	Низ	383,1	712,1	27%	56%
	Середина	384,5	688,6	26%	59%
	Верх	370,5	671,4	25%	53%
	По висоті	371,9	661,5	28%	76%
2	Низ	400,7	701,1	31%	60%
	Середина	394,9	686,1	35%	59%
	Верх	390,2	679,3	34%	62%
	По висоті	399,6	677,4	34%	78%

Відповідні фрактограми для зразків на розтяг представлені на Рис. 3. Жовтими пунктирними лініями виділено положення дендритних плечей. Загальний характер руйнування пластичний зі змішаною морфологією для горизонтальних зразків (Рис. 3 а-б), а саме одночасне існування зон з ямками невеликого розміру, а також великими ямками, переважно міждендритними. Вертикальний (по висоті) зразок (Рис. 5 d) має різну морфологію, без явних слідів дендритної структури, а ямочки однорідні та розподілені однорідно. Це пояснюється підвищеним рівнем пластичності у вертикальному (поперечному) напрямку елемента стіни. Такий характер поверхонь зламу добре узгоджується з даними механічних випробувань.

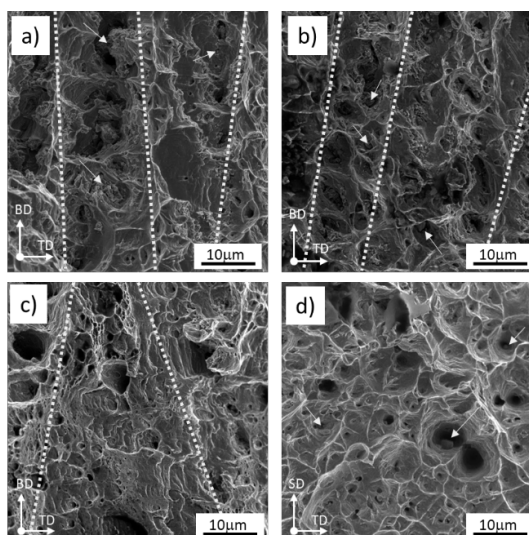


Рисунок 3. Поверхня зламів зразків елемента Inconel 625: нижня (а), середня (б), верхня (с) по висоті (д)

Acknowledgment. Дана робота виконана в рамках Гранту НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки 2024-2025 рр. (№ д/р 0124U0021749).

УДК 621.791

Сергій Мінаков, к.т.н., доц.; Євгенія Чвертко, к.т.н., доц.; Наталія Стреленко, к.т.н., доц.; Денис Степанов, к.т.н., доц.; Антон Мінаков, к.т.н.; Іван Вдовиченко; Дмитро Вдовиченко; Анатолій Кучик

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

3D НАПЛАВЛЕННЯ НА ВЕРСТАТАХ ІЗ ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ

Анотація. Представлені основні принципи компонування обладнання для 3D наплавлення із використанням модульних рішень для верстатів із ЧПК. Генерацію G-кодів для пошарового наплавлення запропоновано проводити на мові програмування Python під управлінням операційної системи LinuxCNC.

Ключові слова: 3D наплавлення, висота наплавленого шару, ширина наплавленого шару, операційна система LinuxCNC, мова програмування Python, верстати із ЧПК.

Serhii Minakov, Ph.D., Assoc. Prof.; Yevgenia Chvertko, Ph.D., Assoc. Prof.; Nataliia Strelenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Denys Stepanov, Ph.D., Assoc. Prof.; Anton Minakov, Ph.D., Assoc. Prof.; Ivan Vdovychenko, Dmytro Vdovychenko, Anatoly Kuchyik

3D SURFACING ON MACHINES WITH COMPUTER NUMERICAL CONTROL

Abstract. The principles of building equipment for 3D surfacing using modular solutions for CNC machines are presented. The generation of G-codes for layer-by-layer surfacing is proposed to be carried out in Python under the control of the LinuxCNC operating system. Keywords: 3D surfacing, deposited layer height, deposited layer width, LinuxCNC operating system, Python programming language, CNC machines.

Розробка та удосконалення засобів адитивного виробництва на разі є пріоритетним напрямком технологій з'єднання. Технології дугового зварювання (наплавлення) мають ряд переваг перед технологіями із застосуванням порошкових матеріалів (SLM та SLS). Це завдяки наявності великого парку зварювального обладнання та великої продуктивності процесів наплавлення порівняно із SLM та SLS. Однак необхідність програмного управління процесом переміщення пальника (або деталі) для пошарового наплавлення вимагає застосування спеціалізованого обладнання. За звичай для цього застосовуються роботизовані комплекси. Однак для багатьох завдань автоматизації процесів пошарового наплавлення економічно доцільніше використовувати технології, що застосовуються у верстатах із числовим програмним забезпеченням (ЧПК).

Сучасні модульні рішення для верстатів із ЧПК дають можливість варіації напрямних, кареток, трансмісії, приводів та відповідних до них контролерів. Це дозволяє гнучко автоматизувати необхідний процес. Наприклад, довжина стандартних напрямних складає 6 м, що на багато перевищує можливості роботів. Це дозволяє проектувати та виготовляти так звані лінійні роботизовані комплекси у яких переміщення відбувається вздовж заданих осей. Вказані модульні рішення дозволяють також створити системи обертання пальника (або деталі). Так для наплавлення методом MIG/MAG достатньо переміщувати тільки зварювальний пальник, який має невелику вагу. Це дозволяє застосовувати модульні рішення малої потужності.

Беручи до уваги зазначене вище та те, що необхідна точність для позиціонування пальника значно менша в порівнянні із обладнанням для металообробки доцільно

застосовувати у якості приводів крокові двигуни. Для створення спеціалізованого верстата із ЧПК для 3D наплавлення необхідно виготовити раму, виставити напрямні із каретками, встановити трансмісію (ланцюг, зубчастий пас, шарико-гвинтова передача (ШГП)), приводи та відповідні контролери для них.

Управління приводами як і для верстатів із ЧПК відбувається за допомогою G-кодів. 3D наплавлення відбувається пошарово, що вимагає використання великої кількості програмного коду. Виходом із цього положення є застосування операційної системи Linux CNC, яка дозволяє програмувати код із застосуванням мови Python. І саме це дозволяє оптимізувати генерацію необхідних G-кодів.

Для забезпечення якісного процесу 3D наплавлення потрібні уточнення параметрів процесу наплавлення. Найбільш критичним для процесу наплавлення є параметри наплавленого валику, а саме: висота та ширина. Ці параметри значно коливаються в залежності від розмірів та форми деталей, які наплавляються. Ці та інші параметри на різних етапах наплавлення уточнюються в процесі експериментальних досліджень. Відомо, що умови тепловідведення змінюються по мірі наплавлення шарів. Це вимагає корекції режимів наплавлення до настання квазістаціонарного стану. За звичай цей стан настає після наплавлення п'яти і більше шарів. Нові параметри вносяться в програму, що написана на мові Python і, яка в свою чергу генерує нову керуючу програму на G-кодів для керування ЧПК верстатом. Процес корекції параметрів наплавлення триває до задовільного результату. Програма написана на мові Python значно полегшує процес корекції параметрів.

Код мови Python для наплавлення на круглу трубу деталі типу фланець:

```
from math import *
import math
shift_pal = 10          # виліт дроту, мм
diametr = 133          # діаметр деталі, мм
speed = 24             # швидкість наплавлення, метри за годину
angle = 30            # кут зміщення пальника відносно центра циліндра
size_of_layer = 1.5   # висота величина наплавленого шару, мм
side_shift_angle = 45 # кут нахилу наплавлення
number_of_layers = 10 # кількість шарів
for t in range(number_of_layers):
    y_pal= cos(angle*(math.pi/180))*(diametr+size_of_layer*t)/2+shift_pal
    z_pal= sin(angle*(math.pi/180))*(diametr+size_of_layer*t)/2
    x_shift = size_of_layer*t / math.tan(side_shift_angle*(math.pi/180))
    time_1_rotete= ((diametr+size_of_layer*2*t)*math.pi)/(speed*1000/60)
    rotete_speed = 360.0/time_1_rotete
    u=360+360*t
    print ("G1 X%f Y%f Z%f F1000" % (x_shift,y_pal,z_pal))
    print ("G1 A%f F%f" % (u,rotete_speed))
    t+=1
```

Використання операційної системи LinuxCNC з певним апаратним забезпеченням може надавати зворотній зв'язок для корекції положення пальника перед кожним наступним шаром наплавлення. Поєднання можливостей операційної системи LinuxCNC та мови програмування Python дозволяє створити досить гнучку систему управління процесом 3D наплавлення.

УДК 537.8, 539.3

Олег Король; Ігор Окіпний, к.т.н., доц.; Богдан Береженко; Олег Гурик, к.т.н., доц.; Любов Цимбалюк, к.ф.-м.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВИВЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

Анотація. За допомогою розробленої математичної моделі проведено дослідження залежності температури від частоти і сили струму в індукторі та тривалості нагрівання.

Ключові слова: індуктор, відновлення, граничні умови, технологічний тигель.

Oleh Korol; Ihor Okipnyi, Ph.D., Assoc. Prof.; Bohdan Berezenko; Oleh Huryk, Ph.D., Assoc. Prof.; Lubov Tymbaliuk, Ph.D., Assoc. Prof.

STUDY AND RESEARCH OF THE TEMPERATURE FIELD DURING RESTORATION OF CYLINDRICAL PARTS

Abstract. With the help of the developed mathematical model, a study of the dependence of the temperature on the frequency and strength of the current in the inductor and the duration of heating was carried out.

Keywords: inductor, recovery, boundary conditions, technological crucible.

Розглянемо спочатку процес індукційного нагріву деталі для проміжку часу $0 \leq t \leq t_k$. Тоді питома потужність джерел джоулевого тепла описується функцією $W_0(x)$ і температурне поле в деталі описується диференціальним рівнянням [1]

$$\frac{\partial T^*}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} = \frac{a}{\lambda} W_0(x). \quad (1)$$

На поверхні деталі $x=0$ має місце конвективний теплообмін із зовнішнім середовищем, а границю шару $x=H$ вважаємо теплоізолюваною, тобто

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} - hT^* = 0 \quad \text{при } x = 0, \quad T^* = T - T_c, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = H. \quad (3)$$

Тут $h = \frac{\alpha}{\lambda}$, α - коефіцієнт тепловіддачі, $T_c = const$ - температура зовнішнього середовища.

В початковий момент часу температура в деталі дорівнює температурі зовнішнього середовища $T^* = 0$ при $t = 0$.

Розв'язок задачі шукаємо з використанням методу Фур'є. Подамо розв'язок однорідного рівняння у вигляді $T_1 = \theta(t) \cdot X(x)$.

Тепер розв'язок неоднорідного рівняння шукаємо у вигляді

$$T^* = \sum_{j=1}^{\infty} \theta_j(t) X_j(x). \quad (5)$$

Отримаємо:

$$\sum_{j=1}^{\infty} \frac{d\theta_j}{dt} X_j - a \sum_{j=1}^{\infty} \theta_j(t) \frac{d^2 X_j}{dx^2} = \frac{a}{\lambda} \sum_{j=1}^{\infty} w_j X_j.$$

Для знаходження $\theta_j(t)$ отримуємо рівняння

$$\frac{d\theta_j}{dt} + av_j^2\theta_j = \frac{a}{\lambda}w_j, \quad (6)$$

розв'язок якого, що задовольняє початкову умову, має вигляд

$$\theta_j(t) = \frac{w_j}{\lambda v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t}).$$

Таким чином, розв'язок задачі (4) - (7) такий

$$T^*(x, t) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{w_j}{v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t}) (\cos v_j x + tg v_j H \sin v_j x). \quad (7)$$

Розглянемо тепер процес нагріву на проміжку часу $t_k < t \leq \tau$. Тоді питома потужність джерел джоулевого тепла описується функцією $W(x) = W_1(x) \cdot U_-(x_k - x) + W_2(x) \cdot U_+(x - x_k)$ і температурне поле в деталі описується

$$\text{диференціальним рівнянням } \frac{\partial T_1^*}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T_1^*}{\partial x^2} = W(x). \quad (8)$$

Граничні умови на T_1^* залишаються такими ж, як і в попередній задачі, тобто

$$\frac{\partial T_1^*}{\partial x} - hT_1^* = 0 \quad \text{при } x = 0, \quad (T_1^* = T - T_c) \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_1^*}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = H, \quad (10)$$

а початкова умова прийме вигляд

$$T_1^* = T^*(x, t_k) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{w_j}{v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t_k}) (\cos v_j x + tg v_j H \sin v_j x), \quad \text{при } t = 0. \quad (11)$$

Тобто початкова температура в деталі на другому етапі нагріву дорівнює температурі, яка була досягнута на кінець попереднього етапу нагріву.

Загальний розв'язок задачі запишеться так

$$T_1^*(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{\bar{w}_j}{\lambda v_j^2} + D_j e^{-av_j^2 t} \right) (\cos v_j x + tg v_j H \sin v_j x).$$

В результаті для постійних інтегрування знайдемо $D_j = \frac{1}{\lambda v_j^2} \left[w_j (1 - e^{-av_j^2 t_k}) - \bar{w}_j \right]$

і остаточно шуканий розв'язок прийме вигляд

$$T_1^*(x, t) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{\bar{w}_j}{v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t}) + \frac{w_j}{v_j^2} (1 - e^{-av_j^2 t_k}) e^{-av_j^2 t} \right] (\cos v_j x + tg v_j H \sin v_j x). \quad (12)$$

З допомогою формули (12) знаходимо температуру в деталі в будь-який момент часу й у всіх точках деталі у випадку, коли температура в частині деталі перевищує температуру Кюрі, а також розв'язуємо цілу низку задач, пов'язаних з нагрівом деталі з метою створення температури, сприятливої для його нарощування.

Так з допомогою формули (12) досліджено температуру в деталі (рис. 1) при тривалості нагрівання $\tau = 600$ с, кількості витків індуктора $N = 7$ для різних значень частоти струму в процесі досягнення на поверхні циліндричної деталі температури 1450°C . З графіків видно, що в наведених випадках температура в деталі починає зростати при $x = 0,30$ м, а координата точки на стику деталі й осі дорівнює $x = 0,3675$ м, тобто в цій точці температура ще не збільшується, але вже потрібно вживати заходи для недопущення її зростання, бо після заливання розплавленого металу в утворений тигель температура в деталі може збільшуватися. З рисунка 2 видно, що температура на

поверхні деталі зростає при збільшенні тривалості нагрівання. Так, якщо в індукторі із частотою $f = 1000$ Гц та струмом $I_i = 1800$ А, $N = 7$ за час 100 с досягається температура 900°C на поверхні, тоді як при $x = 0,115$ м вона дорівнює тільки 50°C . Тоді як при $\tau = 700$ с найбільша температура $T = 1520^\circ\text{C}$, а $T = 50^\circ\text{C}$ досягається при $x = 0,245$ м.

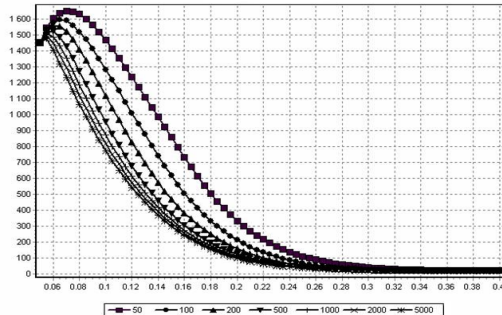


Рисунок 1 – Залежність температури в деталі T_4 від біжучої координати при тривалості нагрівання $\tau = 600$ с і при різних значеннях частоти струму f в процесі досягнення на ободі деталі температури $T_4 = 1450^\circ\text{C}$, коли індуктор має $N = 7$ витків

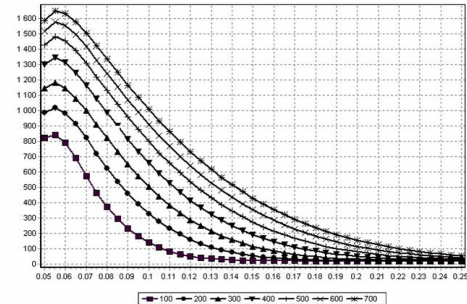


Рисунок 2 – Залежність температури в деталі T_4 від біжучої координати при різних значеннях тривалості нагрівання τ на частоті $f = 1000$ Гц при струмі $I = 2000$ А, коли індуктор має $N = 7$ витків

Проведено дослідження температурного поля у випадку, коли в усій області зношеної робочої поверхні деталі циліндричної форми, температура перевищує температуру Кюрі. Температура створюється в деталі з метою зменшення градієнта температури після заливання розплавленого металу в створений тигель з метою нарощування деталі та покращення дифузії розплавленого металу в матеріал тіла обертання. Знайдено алгоритм визначення температурного поля в деталі, що створюється індуктором, проведено його дослідження в процесі досягнення на поверхні температури 1450°C при різних часах нагрівання та різних частотах. Отримано формули для визначення потужності теплових джерел, що витрачається власне в деталі на її нагрівання. Та досліджено її залежно від частоти струму, сили струму й часу нагрівання. Показано, що зі зростанням частоти потужність і сила струму знижується, направляючись до якоїсь (знайденої) величини (тобто проходить насичення). Зі зменшенням часу нагрівання необхідна потужність і сила струму зростають. Установлено, що для розроблення технологій нарощування спрацьованих робочих поверхонь деталей циліндричної форми з метою ремонту необхідно нагріти його підготовлену торцеву частину до $1300\text{--}1450^\circ\text{C}$ з метою підготовки технологічного тигеля до заливання в нього розплавленого металу та подальшого остигання основного металу разом із залитим металом у тигель. Причому при $1450\text{--}1600^\circ\text{C}$ як залитий рідкий метал, так і підготовлений на границі між ними основний метал будуть у рідкому стані й у складі рідкого металу й аустеніту. Тобто будуть створені умови для їхнього взаємного перемішування та дифузії, що буде сприяти їхньому дійсному з'єднанню. Таке попереднє нагрівання необхідно використовувати для реалізації технології виготовлення бандажа з необхідним натягом.

Перелік посилань

1. Король О. І. Математична модель визначення температурного поля при відновленні деталей циліндричної форми / О. Король // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 75. — № 3. — С. 223-231.

УДК 621.791.754

Павло Онищенко¹, Сергій Козулін¹, к.т.н., с.н.с.; Сергій Мариненко² к.т.н., доц.; Сергій Резнік¹, Андрій Ганчук¹

¹ Інститут електрозварювання імені Є.О.Патона НАН України, Україна

² Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ СТАЛІ 09Г2 ДВОМА ЕЛЕКТРОДНИМИ ДРОТАМИ ДІАМЕТРОМ 2,0 ММ

Анотація. За результатами проведених досліджень оптимізовано параметри процесу електрошлакового зварювання сталі 09Г2 товщиною 45 мм двома електродними дротами діаметром 2,0 мм, які забезпечили якісне з'єднання без дефектів. Вибрано марки електродних дротів, застосування яких дозволило отримати покращені механічні властивості зварних швів.

Ключові слова: однопрохідне зварювання, сталь великої товщини, електрошлакове зварювання (ЕШЗ), механічні властивості, зона термічного впливу (ЗТВ), структура.

Pavlo Onyshchenko; Serhii Kozulin, Ph.D.; Serhii Marynenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Serhii Reznik, Andrii Hanchuk

RESEARCH OF THE FEATURES OF ELECTROSLAG WELDING OF STEEL 09G2 WITH TWO ELECTRODE WIRES WITH DIAMETER OF 2.0 MM

Abstract. According to the results of the research, the parameters of the electros slag welding of 09G2 steel with a thickness of 45 mm with two electrode wires with a diameter of 2.0 mm were optimized, which ensured a high-quality connection without defects. The usage of selected brands of electrodes made it possible to obtain improved mechanical properties of welds.

Keywords: single-pass welding, thick steel, electros slag welding (ESW), mechanical properties, heat affected zone (HAZ), structure.

Електрошлакове зварювання широко використовується для з'єднання деталей великої товщини. Одночасно з високою продуктивністю, ефективністю, стабільністю процесу, та якістю з'єднання (при дотриманні технології). Однак високе тепловкладення є причиною формування крупнозернистої структури металу ЗТВ, що впливає на показники механічних властивостей та ударної в'язкості металу в різних ділянках.

На основі тривалого промислового застосування метод ЕШЗ в діапазоні товщин 20-500 мм переважно виконується одним або кількома електродними дротами діаметром від 3,0 мм.

Метою роботи було дослідження особливостей ЕШЗ сталі товщиною 45мм двома дротами діаметром 2,0 мм для оцінки параметрів та характеру протікання процесу, рівня тепловкладення та їх впливу на механічні властивості та структуру металу шва та ЗТВ.

Методика та результати досліджень

Дослідження включали окремі експерименти зі зварювання аналогічних зразків з різною комбінацією електродних дротів:

- два дроти діаметром 2,0 мм марок Св08Г2СЮ+Св08Г2С.

- два дроти діаметром 2,0 мм марок Св10НМА+Св10ХГ2СМА

Для реєстрації параметрів режиму та термічного циклу використовувався програмно-апаратний комплекс на базі АЦП АДА-1406 та ПЗ Power Graph 3.03, та набір термопар типу К (хромель-алюмель).

Візуальна оцінка та аналіз осцилограм струму та напруги експериментів підтвердили стабільний та спокійний характер протікання процесу без коротких замикань, типовий для ЕШЗ (див. рис.1).

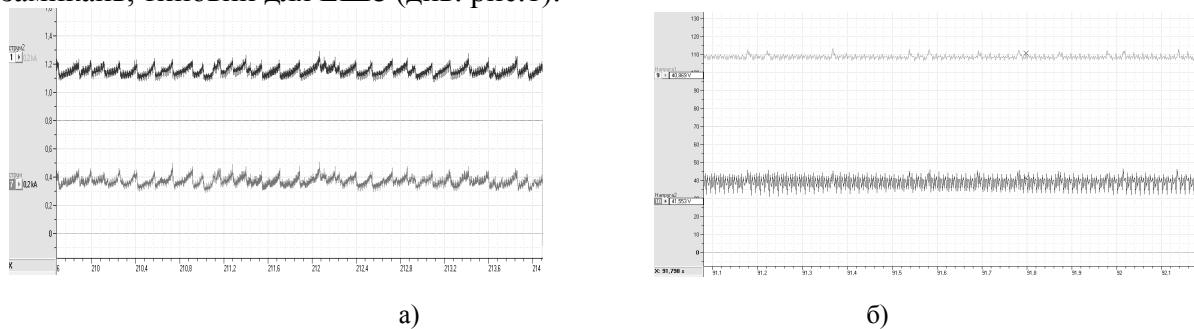


Рис. 1. Осцилограми струму та напруги проведених експериментів: а – осцилограма струмів на окремих дротах; б - осцилограма напруги на окремих дротах

Аналіз термоциклів в ЗТВ показав, що при збільшенні швидкості зварювання з 1,46 м/год до 2 м/год відбувається зниження температури на 300–500 °С до значень, близьких до температурного діапазону зони нормалізації 930–1100 °С. Отримані значення температур близькі до найбільш сприятливого діапазону температури в ЗТВ з точки зору формування структури металу та його механічних властивостей, в якій утворюється дрібнозерниста структура з найвищими механічними властивостями, що є бажаним результатом при ЕШЗ (див. рис. 2).

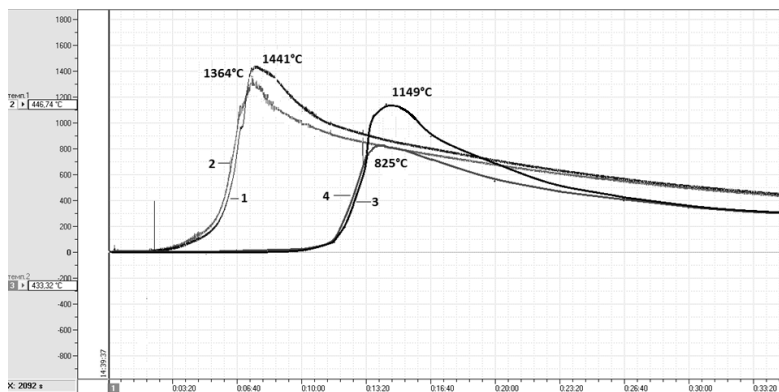


Рис. 2. Термічні цикли: криві 1,2 – на відстані 20 та 25 мм від кромки $V_{zv}=1,46$ м/год, дротами Св08Г2СЮ+Св08Г2С; криві 3,4 - на відстані 20 та 25 мм від кромки, $V_{zv}=2$ м/год дротами Св10НМА+Св10ХГ2СМА

Аналіз мікро- та макроструктур показав, що для зразків Експерименту 1 (дротами Св08Г2СЮ+Св08Г2С, швидкість зварювання 1,46 м/год) виявлена сприятлива структура металу шва і ЗТВ з відсутністю мартенситу:

Мікроструктура ферито-перлітна з розміром зерен 20-40 мкм. Твердість вздовж ЗТВ варіюється від 250 НV поблизу лінії сплавлення (і на цій ділянці наявна суміш голчастого фериту з феритом) до 176 НV на ділянці перекристалізації (така твердість характерна для мікроструктури відпаленого фериту).

Мікроструктура металу шва складається з суміші голчастого фериту (розмірами ділянок до 200 мкм) та фериту (з розмірами ділянок 100-150 мкм), в свою чергу феритні ділянки мають також зернисту структуру з розмірами зерен від 20 до 70 мкм. Твердість в даному випадку складає ~230 НV.

Для зразків Експерименту 2 (дротами Св10НМА+Св10ХГ2СМА, швидкість зварювання 2 м/год):

Для металу шва характерною є однорідна бейнітна мікроструктура з ділянками полігонального фериту з твердістю 208-195HV. На ділянці зони термічного впливу переважає ферито-перлітна структура з твердістю у діапазоні від 144 до 167 HV. Структура основного металу ферито-перлітна, та характеризується дрібнодисперсними рівноосними зернами що забезпечує показники твердості на рівні 190-210 HV.

Як показали результати досліджень зварних з'єднань механічні властивості майже у всіх випадках мають значення вище показників для основного металу (згідно ГОСТ 19281-73), за винятком межі текучості металу ЗТВ. При цьому застосування більш легованих дротів призводить до підвищення показників межі текучості на 15...20% та межі плинності на 18..24% металу швів і становить 446,5 МПа, 645 МПа відповідно.

Показники пластичності металу шва мають дещо нижчі значення показників основного металу і становлять δ - 18,46% дротами Св08Г2СЮ+Св08Г2С та 17,55% дротами Св10НМА+Св10ХГ2СМА, Ψ – 53,4% дротами Св10НМА+ Св10ХГ2СМА (згідно ГОСТ 19281-73 для Сталь 09Г2 значення $\delta \geq 21\%$, $\Psi \geq 65\%$).

Результати випробувань зварних з'єднань на ударний згин металу шва свідчать про суттєве підвищення (більше ніж у 2 рази) даного показника при застосуванні комбінації дротів Св10НМА+Св10ХГ2СМА та наблизились до значень основного металу і становлять 18 KCV, Дж/см²

Висновки

1. В результаті проведених експериментів виконано електрошлакове зварювання зразків зі сталі 09Г2 товщиною 45 мм з використанням комбінацій двох дротів діаметром 2,0 мм. В отриманих з'єднаннях відсутні непровари, шлакові включення, пори та тріщини, а поверхня металу шва має характерну для ЕШЗ чешуйчасту структуру.
2. Процес зварювання за візуальною оцінкою та аналізом осцилограм струму та напруги мав стабільний та спокійний характер протікання без коротких замикань та дугових розрядів.
3. Аналіз термоциклів в ЗТВ показав, що при збільшенні швидкості зварювання, відбувається зниження температури на 300–500 °С до значень, близьких до температурного діапазону зони нормалізації 930–1100 °С, в якій утворюється дрібнозерниста структура з найвищими механічними властивостями, що є бажаним при ЕШЗ.
4. Аналіз мікро- та макроструктур в обох експериментах показав відсутність мартенситу в металі шва і ЗТВ.
5. Механічні властивості металу шва та ЗТВ були покращенні при використанні більш легованих дротів. Також значно покращилась (в два рази) та наблизилась до значень основного металу ударна в'язкість металу шва.

Показана можливість отримання якісних зварних з'єднань двоелектродного ЕШЗ дротами діаметром 2,0 мм сталі товщиною 45 мм буде використана для розробки промислового обладнання та технології зварювання товщин в діапазоні від 20 до 60 мм.

УДК 621.791.92:669.018.25

Валерій Перемітько¹, д.т.н., проф.; Ігор Коломоєць¹, Ph.D.; Антон Євдокимов², Іван Кривда¹

¹ Дніпровський державний технічний університет, Україна

² ТОВ Стіл Ворк, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ОПІРНОСТІ ЗНОСУ МЕТАЛУ ЗА РАХУНОК ДОДАВАННЯ ВУГЛЕВОДНІВ ДО ШИХТИ НАПЛАВНОГО ДРОТУ

Анотація. Досліджувалася дієвість впливу додавання пластику до шихти наплавних дротів на опірність до зносу за схемою «метал-метал» без змащення. В якості вуглеводнів застосовували фторопласт Ф4 та поліуретан в аерозольній формі Unikast 10/14.

Ключові слова: дугове наплавлення, порошковий дріт, пластик у шихті, опірність зносу.

Valerii Peremit'ko, Ph.D., Prof.; Igor Kolomoyets, Ph.D.; Anton Yevdokymov, Ivan Kryvda

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE METAL DUE TO THE ADDITION OF HYDROCARBONS TO THE CHARGE OF FLOATING WIRE

Abstract. The effectiveness of the addition of plastic to the charge of floating wires on wear resistance according to the "metal-metal" scheme without lubrication was investigated. F4 fluoroplastic and Unikast 10/14 polyurethane in aerosol form were used as hydrocarbons.

Keywords: arc welding, powder wire, plastic in charge, wear resistance.

У випадку інтенсивного зношування важко навантажених деталей, що утворюють пари тертя, значення втрат початкових форми та розмірів часто зумовлюють вибір дугових способів відновлення. При цьому на значне підвищення експлуатаційних показників нагрітого сплаву варто очікувати за його дієвого модифікування, легування та мікролегування. За схемою електродугового наплавлення це реалізується регламентацією складу шихти порошкового дроту або стрічки. При цьому важко уникнути суттєвої втрати складників по причині їх розкладання, окиснення або випаровування під дією дугового розряду.

Експериментально досліджувався вплив покриття частинок компонентів шихти порошкового дроту шаром пластику на зміну опірності наплавленого металу до зносу.

Наплавлення шарів товщиною 4...5 мм виконували на зразки із сталі 09Г2С порошковими дровами, що мали склад шихти, наближений до марок ВЕЛТЕК-Н620 та ВЕЛТЕК-Н630-О. Особливістю було те, що частки порошкоподібних карбиду хрому (для дроту ВЕЛТЕК-Н630-О) та ферованадію (для дроту ВЕЛТЕК-Н620) покривали попередньо шаром пластику.

Для покриття часток ферованадію на базі шихти для дроту ВЕЛТЕК-Н620 застосовували фторопласт порошкоподібний марки Ф4 (5 г та 50 г пластику відповідно на 120 г ферованадію).

Карбід хрому для одного дослідного дроту покривався поліуретаном в аерозольній формі Unikast 10/14, для іншого – фторопластом (50 г на 1360 г карбиду хрому).

Наплавлення проводили також стандартними дровами ВЕЛТЕК-Н620 та ВЕЛТЕК-Н630-О.

Нанесення зносостійкого покриття проводили у два проходи дротами діаметром 2 мм на постійному режимі ($I_n=220\dots250$ А, $U_d=25\dots28$ В, $v_n= 220$ мм/хв.), застосовуючи порталну установку «Кристал ПНП-2,5».

Експериментальне дослідження зносостійкості наплавлених зразків виконували на установці МІ-1М за схемою «ролик-ролик». Випробування проводили при незмінному навантаженні 1 кН протягом 12 год. Кожні 2 години відбувалися заміри твердості та зважування зразків. Твердість вимірювалася за шкалою Бринелля твердоміром ТД-42.

Етап припрацювання зразків тривав протягом 4...6 годин, що підтверджується найвищими значеннями величини зносу у цей часовий проміжок.

Дослідження виявили позитивний вплив додавання пластиків на опірність поверхонь до зносу. Введення фторопласту сприяє зменшенню величини зносу на етапі припрацювання в середньому у 2 рази, а Unikast 10/14 – у 1,16 разів. Додавання фторопласту сприяє підвищенню пластичності (початкова твердість зменшується в середньому в 1,15 разів відносно наплавленого металу без додавання компоненту), а пластику Unikast 10/14 – навпаки – до окрихчування (початкова твердість зростає в 1,14 разів відносно немодифікованих зразків).

Впродовж випробувань на зносостійкість було виявлено, що в більш пластичних зразках спостерігається суттєвіше зростання твердості та зниження втрати маси. З точки зору триботехнічних процесів пояснити це можна фактором наклепу. Ймовірно, що в менш твердих шарах нанесеного металу за рахунок пластичного деформування можуть утворюватися нові дислокації, які взаємодіють одна з одною. Як наслідок, це спричиняє підвищення міцності поверхні.

З точки зору процесів, які відбуваються під час наплавлення, це може бути пояснене фактором вигорання вуглецю та марганцю, що спричиняє подовження існування зварювальної ванни. Як результат, знижується початкову твердість нанесеного шару.

Слід також відмітити вплив маси доданого фторопласту. В порівнянні зі зразками, наплавленими із 5 г зазначеного компоненту, збільшення маси до 50 г суттєво підвищує пластичність контактної поверхні (твердість знижується в 1,15 рази) та знижує абсолютну величину зносу майже у 2 рази. Втрата маси на етапі фактичного зносу зменшується в середньому в 1,07 рази. Як недолік, в порівнянні з 5 г, можна вважати подовження етапу припрацювання, та зростання величини зносу протягом перших 6 годин випробувань.

Для зразків, наплавлених із покриттям частинок шихти поліуретаном Unikast 10/14 також зафіксували триваліший – в порівнянні зі зразками наплавлених без його використання – етап припрацювання. Значення втрати маси на етапі фактичного зносу зростає в середньому у 3,5 рази. Даний факт може бути пов'язаний із утворенням твердих фаз за рахунок збільшення вмісту вуглецю у нанесеному шарі в 1,3 рази.

На підставі викладеного, більш ефективним матеріалом в контексті підвищення зносостійкості наплавлених шарів є фторопласт Ф4. При його додаванні до шихти фіксується зниження величини фактичного зносу на етапі припрацювання у 2 рази у порівнянні із зразками, наплавленими стандартними дротами.

Таким чином, експериментально доведено доцільність додаткового введення до складу шихти порошкових дротів пластику у вигляді окремого компонента та/або покриття ним компонентів, які найбільше впливають на структуроутворення металу, що наплавляється. Зазначена зміна сприяє підвищенню опірності нагрітих шарів до абразивного зносу та терміну експлуатації відновлених або виготовлених деталей контактних пар тертя.

УДК 621.791.925

Юрій Попіль, к.т.н., доц.; Денис Степанов, к.т.н.; Ярослав Богуш

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

РОЗРОБКА ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВОДНЕВО - КИСНЕВОЇ ПЛАЗМИ

Анотація. Використання екологічно чистих джерел енергії стає все більш популярним та необхідним. Було проведено дослідження використання воднево-кисневої плазми в технологіях газотермічної обробки та розроблено елементи вузлів та обладнання для реалізації в плазмових процесах.

Ключові слова: воднево-киснева суміш, електролізно-водяний генератор, воднево-киснева плазма, плазмотрон.

Yurii Popil, Ph.D., Assoc. Prof.; Denys Stepanov, Ph.D.; Yaroslav Bohush

DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF HYDROGEN-OXYGEN PLASMA EQUIPMENT

Abstract. The use of environmentally friendly energy sources is becoming more popular and necessary. A study of the use of hydrogen-oxygen plasma for application in gas thermal treatment technologies was carried out, and elements of components and equipment for implementation in plasma processes were developed.

Keywords: hydrogen-oxygen mixture, electrolysis water generator, hydrogen-oxygen plasma, plasmatron.

Перспективний стратегічний вибір промисловості України - це перехід до екологічно чистої енергетики. Враховуючи розмір та очікуване зростання існуючого водневого ринку, розробка проєктів з відновлюваного водню може представити значні інвестиційні можливості для України. Україна є не тільки однією з найбагатших на відновлювані ресурси країн в Європі, але і країною, яка найбільше потребує нових та чистих форм енергії для підтримки економічного розвитку. Щоб здійснити цей перехід є багато проблем, застосування водню не є таким простим. Відомо, що водень – це газ, який складно зберігати. Він має такі властивості, які необхідно враховувати і бути обережним для забезпечення його безпечного використання. Різноманітність способів отримання водню є одним з головних переваг водневої енергетики, так як підвищує енергетичну безпеку, знижує залежність від окремих видів сировини, особливо в даний час. Основні способи отримання водню це: 1 - парова конверсія метану і природного газу; 2 - газифікація вугілля; 3 - електроліз води; 4 - піроліз; 5 - часткове окиснення; 6 - біотехнології; 7 - хімічні реакції. Отримання водню методом електролізу, який досягається за рахунок застосування електролізно-водяних генераторів (ЕВГ) безпосередньо на робочому місці, знижує використання балонного господарства та транспортних витрат. Відомо, що суміш, яка виробляється ЕВГ в пропорції 2:1, містить два об'єми водню та один кисню і може бути пальним газом, при застосуванні такої суміші, як полум'яутворюючої, факел полум'я має низький тепловміст, порівняно з іншими газовими сумішами. Але при іонізації воднево-кисневої суміші (ВКС) в плазмовому генераторі теплові властивості такої плазми значно підвищуються, що є перспективою для широкого застосування в процесах газотермічної обробки матеріалу (ГТОМ) [1].

На кафедрі зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського розробляються технології ГТОМ та елементи вузлів та деталей обладнання для

застосування в плазмових процесах, де в якості плазмоутворюючого газу використовується ВКС.

На першому етапі, метою роботи було визначити та розрахувати конструкцію, геометричні розміри анодного та катодного вузлів плазмотрону, враховуючи теплофізичні властивості газової суміші. Визначитись з джерелом живлення. Дослідити стійкість та ресурс роботи електродів [2]. Розробити технологію послідовності безпечного початку і закінчення ГТОМ з застосуванням ВКС [3].

Для проведення досліджень в якості обладнання використовувались, електролізно-водяний генератор монополярного типу А1803УХЛЧ, з максимальною продуктивністю по виробленню воднево-кисневої суміші – 1,6 м³/год., джерело живлення інверторного типу для плазмового різання СUT-40, з напругою холостого ходу 300 В і максимальним струмом 40 А. За основу конструкції плазмотрону було обрано катодний вузол мікроплазмового пальника ОБ-1160А, який використовується для мікроплазмового зварювання, перероблений на мідний електродотримач з гафнієвою вставкою, який водоохолоджувався. Подача газу в сопло плазмотрону здійснювалось аксіально. Діаметр водоохолоджувального мідного електроду 7 мм, гафнієвої вставки 2 мм, діаметр сопла-анода 3 мм.

Отримання воднево-кисневої плазми здійснювалось, за допомогою пускових газових сумішей, таких, як повітря, при стабільній роботі плазмотрону на ВКС робоча напруга становила 100 В. Схема дослідної установки і її склад представлено на рис. 1.

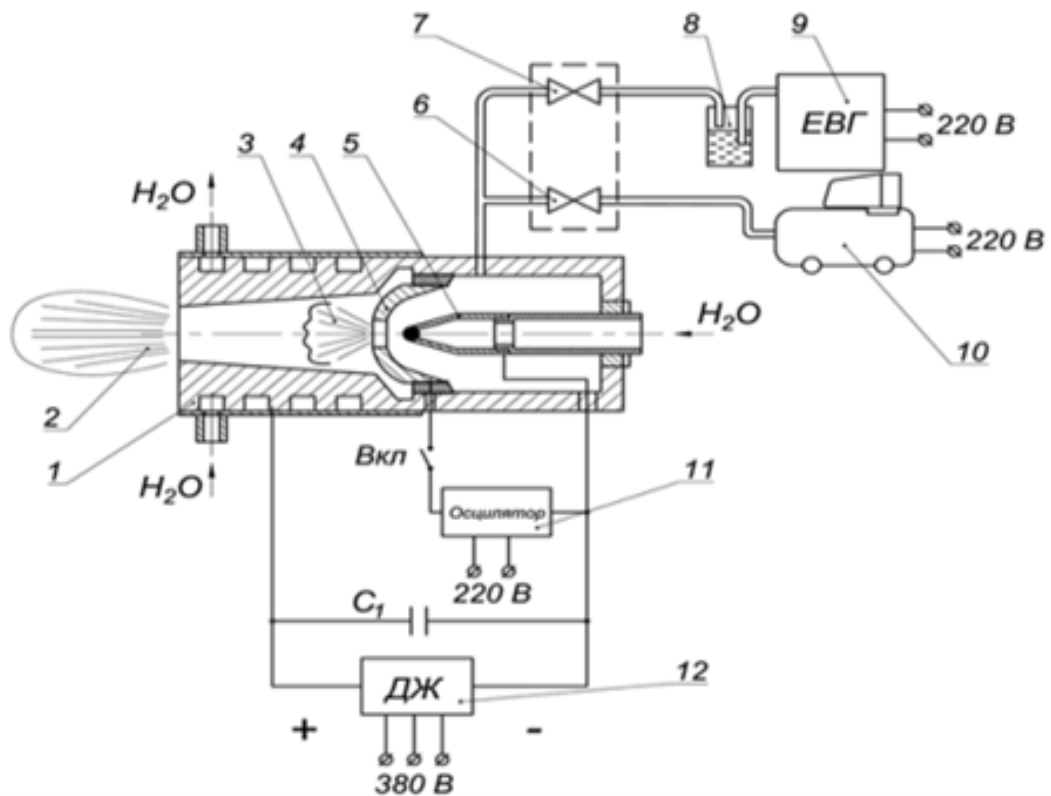


Рисунок 1 – Схема дослідної установки для отримання воднево-кисневого плазмового струменя.

1 – плазмотрон; 2 – плазмовий струмінь; 3-чергова дуга; 4 – міжелектродна вставка; 5 – мідний катод з гафнієвою вставкою; 6,7 - вентилі 8 – запобіжний пристрій (водяний затвор); 9 – ЕВГ; 10-повітряний компресор; 11 – осцилятор; 12 – джерело живлення.

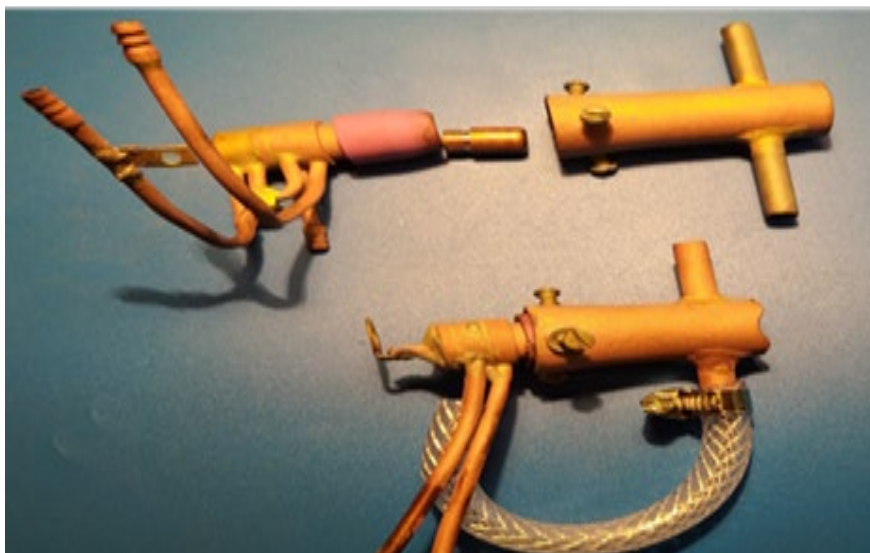


Рисунок 2 – Плазмотрони

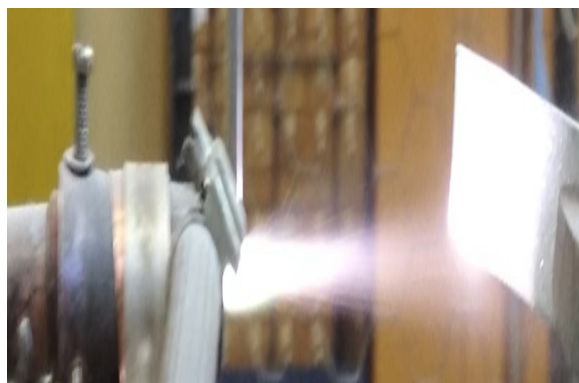


Рисунок 3 – Процес напilenня.

Висновки

1. Для безпечного запуску плазмотрона на ВКС, повинен використовуватись пусковий газ.
2. Для підвищення ресурсу роботи катодно-анодного вузла в плазмотроні, який працює на ВКС, треба збільшувати площу охолоджувальних елементів та кількість охолоджувальної рідини.

Перелік посилань

1. Ю.С.Попіль, В.М.Корж, В.Я.Черняк, Є.А. Захаров. Діагностика воднево-кисневого плазмового струменя для застосування в газотермічному напilenні //Автомат. зварювання.-2020.-№11.-С.41-45.
2. M Klochok, Y. Popil V Chernyak, V Iukhymenko . On the Issue of the Thermal Emission Cathode Resource on the Oxide Films of Hafnium and Zirconium. Plasma Physics and Technology, 2019. 6 (3), 247-250 P.
3. Патент на корисну модель „Спосіб спалювання водовугільного палива в воднево-кисневому плазмовому струмені”. Патент України №153012 /опубл.10.05.2023. Бюл.№19. Попіль Ю.С., Чорний А.В., Клочок М.В., Захаров Є.А.

УДК 621.326

Ігор Протоковілов¹, д.т.н., с.н.с.; Віталій Порохонько¹, к.т.н., с. досл.; Музаффар Абралов², к.т.н.

¹ Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

² Ташкентський державний технічний університет, Узбекистан

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНУ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВПЛИВОМ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ МЕТАЛУ ШВА

Анотація. Розглянуто метод впливу на процес електрошлакового зварювання, спрямований на оптимізацію структури металу шва. Показано, що ефективним інструментом керування кристалізацією металу при ЕШЗ є зовнішні магнітні поля, які дозволяють здійснювати безконтактний силовий вплив на зварювальну ванну. Наведено експериментальні дані щодо структуроутворення металу шва при ЕШЗ титанових плит товщиною 120 мм під впливом постійного та імпульсного поперечного магнітного поля. Встановлено, що імпульсне магнітне поле індукцією 0,06 Тл дозволяє гомогенізувати і подрібнювати структуру металу шва при зменшенні в 2,6 рази середнього розміру зерен металу.

Ключові слова: електрошлакове зварювання; титан; магнітне поле; зварний шов; макроструктура

Igor Protokovilov, Ph.D.; Vitalii Porokhonko, Ph.D.; Muzaffar Abralov, Ph.D.

ELECTROSLAG WELDING OF TITANIUM WITH ELECTROMAGNETIC INFLUENCE ON WELD METAL CRYSTALLIZATION

Abstract. The method of influence on the process of electroslag welding, aimed at optimizing the structure of the weld metal, is considered. It is shown that external magnetic fields, which allow non-contact force influence on the welding pool, are an effective tool for controlling metal crystallization during welding. Experimental data on the structuring of the weld metal during the ESW of titanium plates with a thickness of 120 mm under the influence of a DC and pulsed transverse magnetic field are given. It was established that a pulsed magnetic field by induction of 0.06 T allows to homogenize and refine the metal structure of the weld while reducing the average size of the metal grains by 2,6 times.

Keywords: electroslag welding; titanium; magnetic field; weld seam; macrostructure

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) є ефективним способом з'єднання товстостінних виробів та конструкцій, який дозволяє з'єднувати за один прохід без розроблення кромки елементи з товщиною стінки від 30 до 350 мм і більше [1-3]. При товщині стінки понад 120 мм це практично єдиний спосіб, яким можна зварити конструкції зі сталі, титанових сплавів та інших матеріалів.

Основними конкурентними перевагами ЕШЗ є: висока продуктивність процесу зварювання (наприклад швидкість зварювання плит завтовшки 120 мм становить 2...2,5 м/год); надійність та відносно низька вартість обладнання, що використовується (процес не потребує використання громіздких та дорогих вакуумних камер, як, наприклад, при електронно-променевому зварюванні); щільна структура металу шва без пор, шлакових включень, несплавлень та інших дефектів; відсутність випаровувань в процесі зварювання легуючих компонентів сплаву; можливість використання присаджувального матеріалу аналогічного за хімічним складом металу, що зварюється.

Попри зазначені переваги ЕШЗ має і певні недоліки, які пов'язані з погіршенням механічних властивостей зварного з'єднання через крупнозернисту структуру металу

шва, перегрів основного металу та несприятливі структурні перетворення в зоні термічного впливу.

У зв'язку з цим актуальним завданням є розроблення методів впливу на формування металу шва ЕШЗ з метою подрібнення і гомогенізації його кристалічної будови.

Одним з ефективних інструментів впливу на кристалізацію металу при ЕШЗ є застосування зовнішніх магнітних полів. Фізичний механізм впливу зовнішнього магнітного поля на процес ЕШЗ полягає в його взаємодії зі зварювальним струмом. Внаслідок такої взаємодії в розплавах шлакової і металевої ванн утворюється об'ємна електромагнітна сила \vec{F}_e , яка призводить до силової дії на розплав зварювальної ванни. Величина та напрямок дії зазначеної сили визначаються векторним добутком щільності струму в розплаві \vec{j} та індукції зовнішнього магнітного поля \vec{B} : $\vec{F}_e = \vec{j} \times \vec{B}$.

В роботі [4] розглянуті різні варіанти створення зовнішніх магнітних полів у зварювальному зазорі при ЕШЗ. Показано, що найбільш технологічним варіантом є використання поперечного магнітного поля, силові лінії якого орієнтовані в площині поперечного перерізу зварювальної ванни. Таке поле можна створити при розташуванні полюсів електромагніту з протилежних боків зварювальних кромок біля планок, що формують бокову поверхню шва (рис. 1).

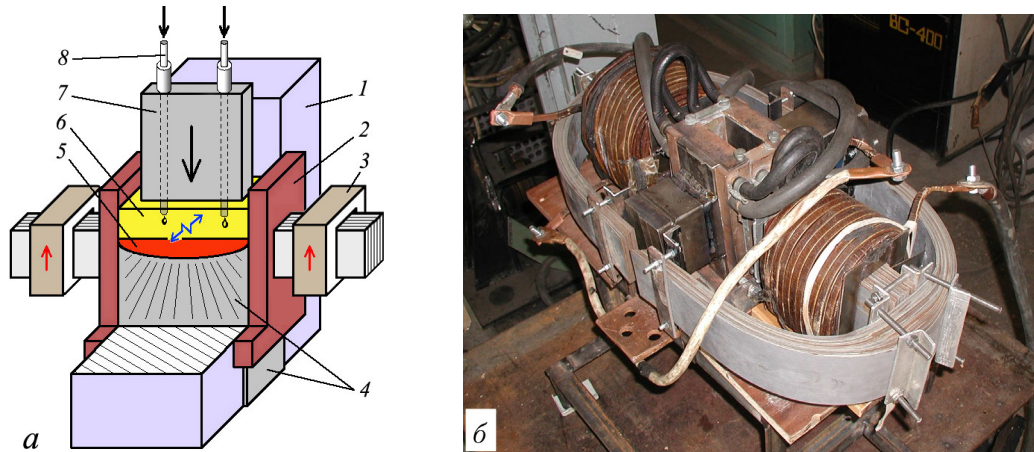


Рис. 1. Схема електрошлакового зварювання плавким мундштуком в поперечному магнітному полі (а) і зовнішній вигляд електромагнітного пристрою (б): 1 – плита, яку зварюють; 2 – формуючі планки; 3 – електромагнітний пристрій; 4 – зварний шов; 5 – металева ванна; 6 – шлакова ванна; 7 – плавкий мундштук; 8 – електродний дріт

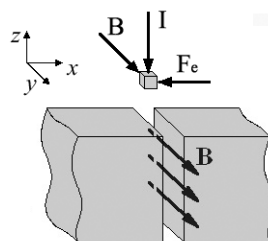


Рис. 2. Напрямок векторів індукції магнітного поля B , сили струму I і електромагнітної сили F_e при ЕШЗ в поперечному магнітному полі

Достатньо компактними є електромагніти з однострижневими сердечниками рис. 1. Такий пристрій створює магнітне поле, силові лінії якого перпендикулярні зварювальним крокам. В даному випадку, в декартовій системі координат (x, y, z)

електромагнітна сила матиме складові $\vec{F}e = (-j_z B_y, 0, j_x B_y)$ (рис.2). Тобто, з урахуванням того, що осьова z -складова сили струму значно більше ніж поперечна x -складова $j_z > j_x$, основна компонента електромагнітної сили буде спрямована впоперек кромки, що зварюються (вздовж осі x , рис. 2). У разі використання постійного магнітного поля і змінного струму зварювання це призведе до утворення вібрації розплаву ванни впоперек зварювальних кромки з частотою струму зварювання (50 Гц). Такі зворотно-поступальні рухи розплаву сприяють подрібненню структури металу шва. Поперечна вібрація в зварювальному зазорі також збільшує проплавлення кромки основного металу, що дозволяє знижувати погонну енергію зварювання.

Експериментальні дослідження проводили при зварюванні покровок товщиною 120 мм з технічного титану ВТ1-0. ЕШЗ здійснювали з використанням плавкого мундштука з титану ВТ1-0 з двома каналами для зварювальних дротів діаметром 5 мм. Використовували фторидно-хлоридний флюс АН-Т4. Експерименти проводили без застосування зовнішнього магнітного поля (експ. №1), а також з використанням постійного і імпульсного поперечного магнітного поля (експ. №2, 3). В усіх випадках зварювальний зазор становив 30 мм. Режими проведених експериментів наведені в таблиці. З отриманих зварних з'єднань виготовляли поздовжні темплети для аналізу структури металу.

Таблиця. Режими ЕШЗ титанових заготовок $\delta_{0.м.}=120$ мм

№	U _{зв} , В	I _{зв} , А	V _{дроту} , м/год	V _{зв} , м/год	Зовнішнє магнітне поле	
					тип поля	B, Тл
1	22-24	3600	100	2,0	-	-
2	18-19	3800	140	2,4	постійне	0,04
3	22-23	3550	150	2,2	імпульсне t _{імп} =1,5 с, t _{паузи} =10 с	0,06

На рис. 3 наведено макроструктури отриманих зварних з'єднань. В усіх випадках структура металу щільна, без пор, шлакових включень та інших дефектів. Добре помітні структурні зони зварного з'єднання: основний метал, зона термічного впливу, метал шва.

Метал шва, отриманого без електромагнітного впливу, характеризується стовпчастою структурою з крупними кристалітами витягнутими в напрямку відведення тепла (рис. 3 а). Така структура є типовою для литого металу і формується в умовах великого об'єму металеві ванни і відносно низької швидкості охолодження рідкого металу, які характерні процесу ЕШЗ.

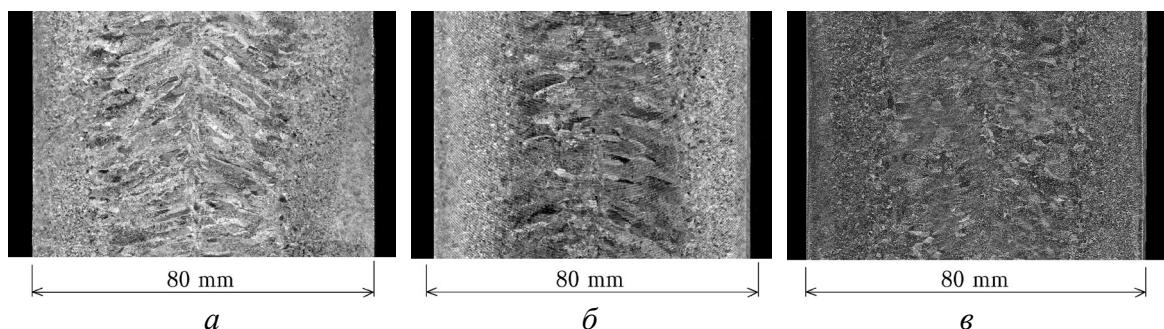


Рис. 3. Макроструктура зварних з'єднань, отриманих традиційним ЕШЗ (а) і ЕШЗ в постійному (б) і імпульсному (в) поперечному магнітному полі

На рис. 4 представлені результати аналізу макроструктури металу, отримані за допомогою програмного забезпечення MIPAR. Аналіз отриманих даних свідчить, що метал шва, отриманого під впливом імпульсного магнітного поля індукцією 0,06 Тл характеризується більш дрібнозернистою структурою, у порівнянні з металом шва традиційного ЕШП. Так, середній розмір зерна (еквівалентний діаметр) в полі макрошліфа традиційного ЕШЗ становить 1,91 мм в той час як при застосуванні імпульсного магнітного поля – 0,74 мм, тобто в 2,6 рази менший. В разі застосування постійного поля індукцією 0,04 Тл подрібнення структури відбулось меншою мірою. В цьому випадку середній розмір зерна становив 0,86 мм.

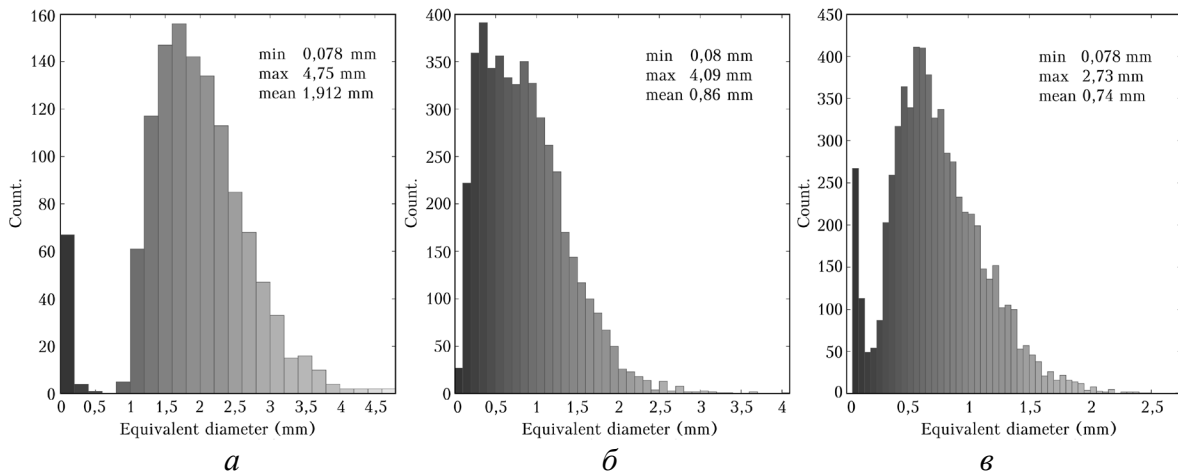


Рис. 4. Розподіл зерен в полі макрошліфа зварного з'єднання по їх розміру: а – традиційне ЕШЗ; б – ЕШЗ в поперечному постійному магнітному полі; в – ЕШЗ в поперечному імпульсному магнітному полі

Менший вплив постійного магнітного поля на структуроутворення металу пояснюється перш за все меншим значенням індукції магнітного поля, через що зменшується електромагнітна сила, що діє на рідкий метал. Крім того, при імпульсній дії магнітного поля відбуваються гідродинамічні "удари" на фронт кристалізації в момент включення і відключення магнітного поля, які сприяють подрібненню структури шва.

Загалом, механізм подрібнення структури металу шва під впливом магнітного поля пов'язаний з руйнуванням або частковим оплавленням/розчиненням гілок зростаючих дендритів під впливом електромагнітної вібрації і потоків рідкого металу. Інтенсивність подрібнення металу залежить від величини індукції магнітного поля, частоти і тривалості імпульсів його дії.

Таким чином експериментально доведена можливість гомогенізації і подрібнення структури металу шва при ЕШЗ титану шляхом застосування імпульсного поперечного магнітного поля.

1. В. Paton, К. Yushchenko, S. Kozulin, I. Lychko. 2019. Electrosag welding process. Analysis of the state and tendencies of development. The Paton Welding Journal 10, 33–40.
2. К. Yushchenko, I. Lychko, S. Kozulin et al. 2018. Application of welding in construction. The Paton Welding Journal 9, 23–27. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.09.05>
3. E. Kaluc, E. Taban, A. Dhooge. 2006. Electrosag welding process and industrial applications. Metal Duniyasi 152 (13), 100–104.
4. Протоковиллов И.В., Порохонько В.Б., Назарчук А.Т. и др. 2013. Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки. Автоматическая сварка. №12. С.45-50.

621.721.052.539.4.014

Одарка Прохоренко¹, к.т.н., доц.; Володимир Прохоренко¹, д.т.н., проф.; Чеслав Пулька², д.т.н. проф.; Віктор Сенчишин², к.т.н.

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

² Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОДНОБІЧНОГО І ДВОБІЧНОГО СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ

Анотація. Для моделі стикового з'єднання зі сталі DC04 розмірами 600x600x10 мм методом скінченних елементів розв'язана нестационарна задача термопружнопластичності з урахуванням фазових перетворень для двох варіантів зварювання стикового шва під флюсом: шов заварений за один прохід і шов заварений з обох боків з'єднання. Для вказаних варіантів зварювання представлені результати дослідження залишкового напруженого стану, які мають науково-практичну цінність для прогнозування безпечної роботи зварних конструкцій.

Ключові слова: напружено-деформований стан, скінченно-елементна модель, стикове зварне з'єднання, сталь DC04

Odarka Prokhorenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Volodymyr Prokhorenko, Ph.D., Prof.; Cheslav Pulka, Ph.D., Prof.; Viktor Senchyn, Ph.D.

NUMERICAL MODELING OF THE RESIDUAL STRESS-STRAIN STATE OF A SINGLE AND DOUBLE-SIDED BUTT JOINTS DURING SUBMERGED ARC WELDING

Abstract. For a model of a butt joint made from DC04 steel with dimensions of 600x600x10 mm, a non-stationary thermoelastoplasticity problem which takes into account phase transformations during single and double-sided submerged arc welding, was solved by means of the finite element method. For both variants of welding, the results of the study of the residual stress-strain state are presented, which have important scientific and practical interest in terms of predicting the safe operation of the welded structures.

Key words: stress-strain state, finite element model, butt welded joint, DC04 steel

Single and double-sided butt welded joints made by arc welding are commonly used for the manufacture of leak-proof and durable structures in the oil and gas industries, shipbuilding, bridge construction, industrial and civil engineering: pipelines, bottom sections of welded tanks, side sections of ship hulls, etc. To ensure the stable weld quality and high productivity of welded joints, automatic submerged arc welding is used, which is characterized by high heat generation and allows, if necessary, to perform welds in a single pass.

However, high heat input causes structural changes during welding and cooling, as well as volumetric changes in the metal due to the development of significant plastic strains. All of this causes welding stresses to form.

The high-gradient effect of the welding arc on the peculiarities of thermo-deformation processes should also be taken into account, as this can lead to the formation of residual stresses of a critical level, that will be dangerous for the operation of the welded structure, since they will lead to an excess of the allowable load.

For a model of a symmetrical butt joint with dimensions of 600x600x10, made of low-carbon steel DC04, the paper presents the results of solving the coupled thermoelastoplasticity

problem by the finite element method for single and double-sided submerged arc welding: variant 1 - the joint is welded from one side in a single pass; variant 2 - the welds on the front and back sides of the joint are welded with a time interval of 1200 s.

A comparison of the received parameters of the residual stress-strain state (SSS), which takes into account the distribution of phase composition in the weld in the residual state, is of scientific and practical value for optimizing welding technology and predicting the safe operation of welded structures.

For two variants of the butt joints welding, Figs. 1-6 show the distribution of residual shear, longitudinal, transverse and equivalent stresses, and equivalent plastic strain in the welded joint and the distribution of structural phases along the weld axis.

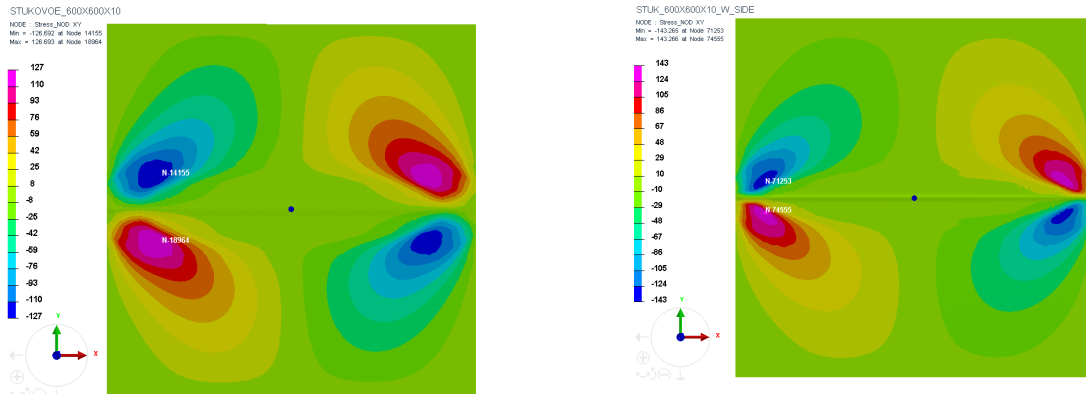


Fig. 1. Fields of residual shear stresses for different variants of welding of the butt joint: (a) - variant 1; (b) - variant 2

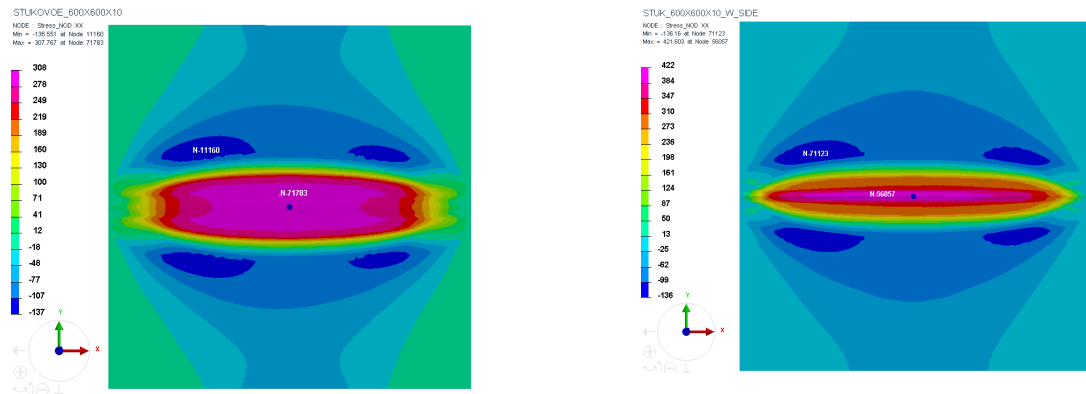


Fig. 2. Fields of residual longitudinal stresses for different variants of welding of the butt joint: (a) - variant 1; (b) - variant 2

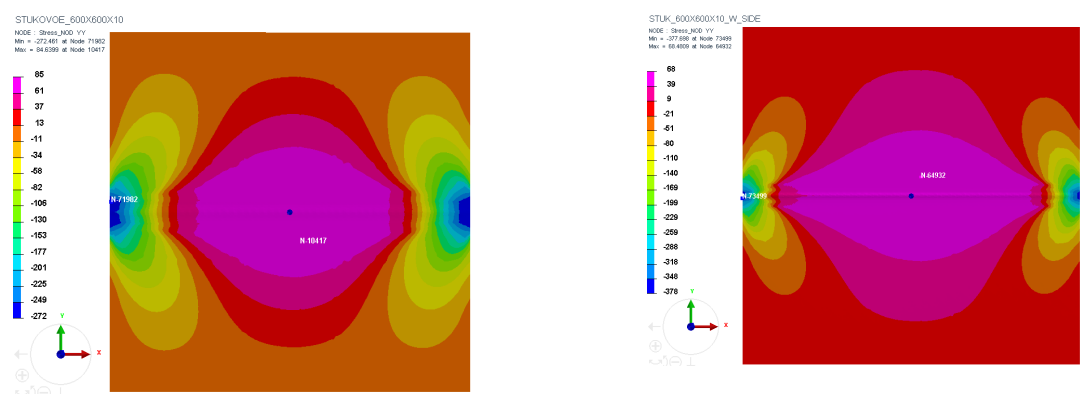


Fig. 3. Fields of residual transverse stresses for different variants of welding of the butt joint: (a) - variant 1; (b) - variant 2

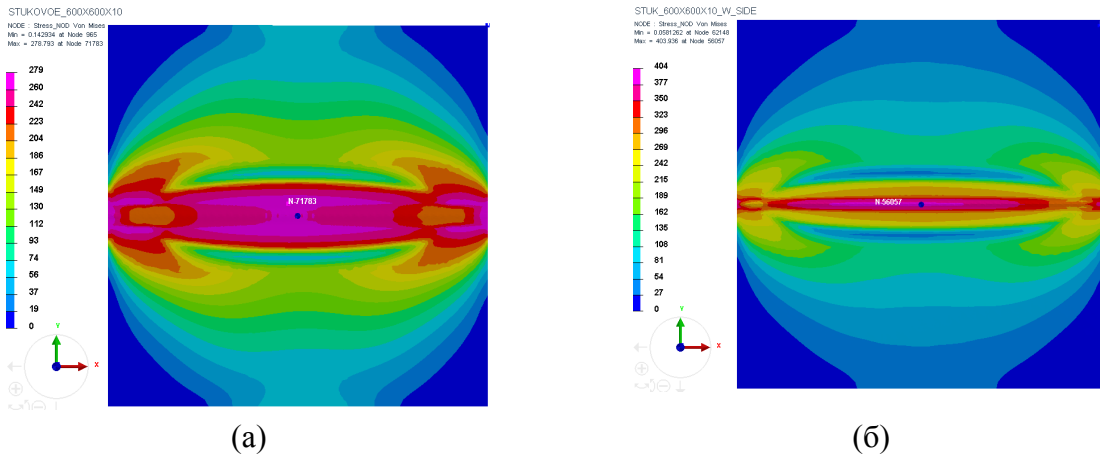


Fig. 4. Fields of residual equivalent stresses for different variants of welding of the butt joint: (a) - variant 1; (b) - variant 2

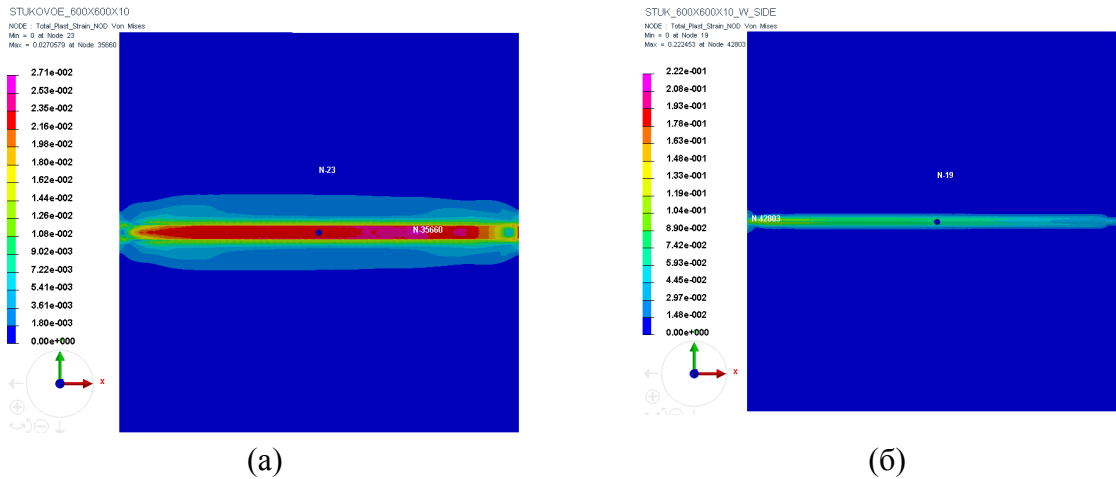


Fig. 5. Fields of residual equivalent plastic strains for different variants of welding of the butt joint: (a) - variant 1; (b) - variant 2

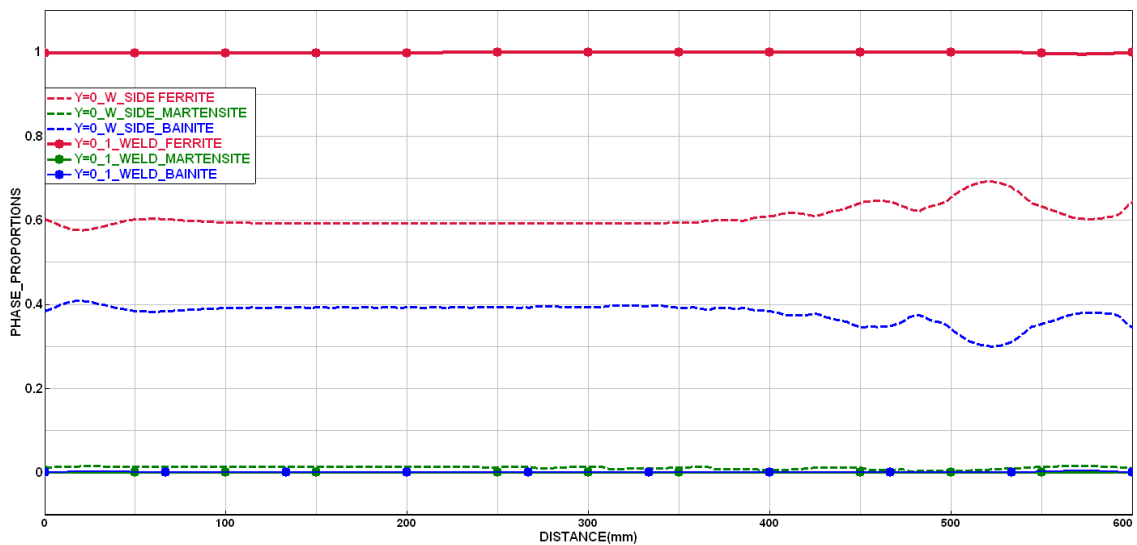


Fig. 6. Distribution of ferrite, martensite and bainite structural phases on the weld axis for different variants of butt joint welding

Table 1 represents the maximum calculated values of the parameters of the residual SSS in the butt joint and the phase proportion on the weld axis.

Table 1 - Parameters of the residual SSS and phase proportions on the weld axis for a symmetrical butt welded joint after welding by different variants

Parameter	Variant1 «single-pass»	Variant2 «double-side»
Width of plastic zone $2b_n$	~174 mm	~139 mm
Equivalent plastic strain at weld axis	$\sim 22,9 \cdot 10^{-3}$	$\sim 69,3 \cdot 10^{-3}$
Longitudinal stresses at weld axis	~308 MPa	~422 MPa
Transverse stresses along weld axis	~85 MPa	~68 MPa
Shear stresses	127 MPa	143 MPa
Equivalent stresses	~279 MPa	~404 MPa
Average phase proportion at weld axis: Ferrite	~99,8%	~60,8%
Average phase proportion at weld axis: Martensite	~0,08%	~1,2%
Average phase proportion at weld axis: Bainite	~0,08%	~38%

A comparison analysis of the residual stress-strain state parameters has showed that for butt joints welded per variant 1, the equivalent stresses on the weld axis are ~31% lower than for that welded per variant 2, which is due to a wider (~20%) zone of plastic strains of contraction; the proportion of bainite on the weld axis for variant 1 is ~38% lower than for variant 2, which indicates greater plasticity of the weld metal and its ability to resist fracture; the maximum values of residual longitudinal stresses on the weld axis for variant 1 are ~27% lower than for variant 2, which contributes to the durability of the welded joint; shear residual stresses on the weld axis for variant 1 are ~11% lower than for variant 2, which reduces the probability of development of deformations and cracking.

Thus, welding of the butt joint per variant 1 is optimal in terms of reducing residual stresses, improving ductility and fracture resistance, which is important for ensuring the durability of welded structures.

УДК 621.791.927.7

Чеслав Пулька, д.т.н., проф.; Михайло Пулька; Віталій Сенчишин; Сергій Окіпний; Мирослав Шарик

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ФАСОННИХ ДИСКІВ ІЗ ЗНЯТТЯМ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Анотація. Запропоновано конструкцію пристрою для індукційного наплавлення тонких дисків із зняттям залишкових напружень. Описано будову і принцип дії, сферу застосування і переваги конструкції пристрою. Показано що створення температурних режимів за допомогою декількох індукторів і двох охолоджуючих трубопроводів які розташовані над поверхнею диска і створюють сприятливі умови для забезпечення її заданої форми і розмірів. Застосування даного пристрою дозволить підвищити якість наплавлених деталей та знизити рівень залишкових напружень, що призводять до короблення деталей після наплавлення і тим самим усунути операцію рихтування. За рахунок конструкції даного пристрою досягається значна економія електроенергії та скорочується час виготовлення однієї деталі.

Ключові слова: індукційне наплавлення, диск, порошкоподібний сплав, індуктор.

Cheslav Pulka, Ph.D., Prof.; Mykhailo Pulka; Vitaly Senchyshyn; Serhii Okipnyi; Myroslav Sharyk

DEVICE FOR INDUCTION SURFACING OF THIN-WALLED SHAPED DISKS WITH THE REMOVING OF RESIDUAL STRESSES

Abstract. The design of the device for induction surfacing of thin disks with removal of residual stresses is proposed. The structure and principle of action, scope of application and advantages of the device design are described. It is shown that the creation of temperature regimes with the help of several inductors and two cooling pipelines that are located above the surface of the disk and create favorable conditions for ensuring its given shape and dimensions. The use of this device will improve the quality of surfacing parts and reduce the level of residual stresses that lead to warping of parts after surfacing and thereby eliminate the straightening operation. Due to the design of this device, a significant saving of electricity is achieved and the time of manufacturing one part is reduced.

Keywords: induction surfacing, disk, powder alloy, inductor.

В сільськогосподарській техніці і в інших галузях народного господарства використовують тонкі сталеві диски товщиною 2..6 мм, які працюють в абразивному середовищі і піддаються значному зношуванню. З метою підвищення їх зносостійкості і забезпечення самозагострювання в процесі експлуатації, їх робочі поверхні зміцнюють різними методами наплавлення. Найбільш широкого застосування отримав метод індукційного наплавлення порошкоподібними твердими сплавами, який дозволяє здійснювати одночасне наплавлення всієї зміцнюючої зони. Однак, внаслідок реалізації процесу наплавлення виникають залишкові напруження від термічного циклу наплавлення, що зумовлює деформування деталей (дисків), а отже і зміну їх геометричних розмірів. Тому, одним із важливих завдань залишається питання зняття залишкових напружень і забезпечення необхідних форм і розмірів зміцнюючих деталей.

З цією метою було розроблено пристрій [1] який представлено на рис. 1.

Він складається з нерухомого стола 1 і напрямної 2, в робочу поверхню якого вмонтовано три (може бути і більше, залежно від розмірів деталі) кільцевих індукторів

3, 4, 5 загальна ширина яких відповідає ширині наплавляючій і нагрівуючій поверхням деталі 6 Індуктори 3, 4 та 5 за допомогою водоохолоджувальних гнучких шлангів 7 через блок перемикачів 8 з'єднані з джерелом струму 9.

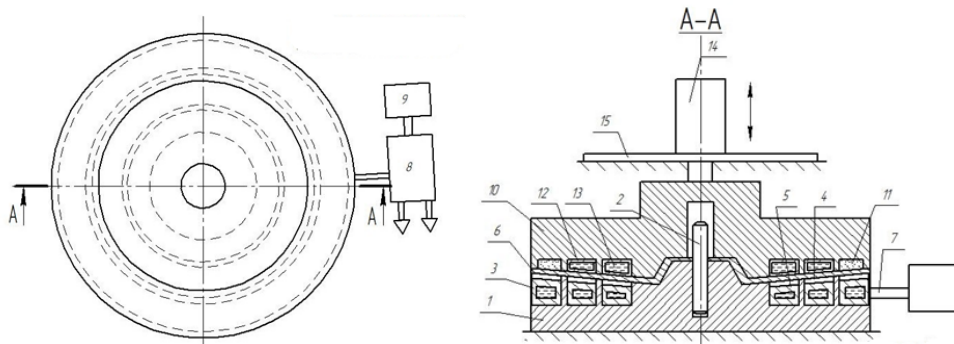


Рис. 1 - Пристрій для одночасного індукційного наплавлення дисків із зняттям залишкових напружень

Притискання деталі 6 до робочої поверхні стола 1 здійснюється за допомогою вертикально- рухомої плити 10, в нижньому торці якої є кільцевий паз 11, для подачі сплаву, а також вмонтовані прямокутні трубопроводи 12 і 13, які з'єднані також гнучкими шлангами 7 через блок перемикачів 8, поверхні яких дотикаються з поверхнею деталі 6 які служать для її охолодження після наплавлення. Плита 10 має привід 14, який встановлений жорстко на опорі 15. Нижній торець плити 10, як і робоча поверхня стола 1 мають конфігурацію оброблювальної поверхні.

Пристрій працює наступним чином. Деталь 6 встановлюється на нерухомий стіл 1. Після цього здійснюється засипання сплаву на наплавляючу поверхню деталі 6. Верхня плита 10 під дією приводу 14 переміщується вниз, притискаючись до верхньої частини деталі 6, і фіксується по напрямній 2. Вмиканням джерела струму 9 подають напругу на індуктори 3, 4 та 5, після цього здійснюється наплавлення з одночасним прогріванням по всій периферії і ширині наплавляючої і нагрівуючої поверхні. Прогрівання деталі з допомогою індукторів 4 та 5 здійснюється при більш низьких і різних температурах (зниження її в сторону зменшення радіуса деталі) в порівнянні з температурою наплавлення індуктором 3. Після наплавлення здійснюється охолодження деталі за допомогою прямокутних трубопроводів 12 і 13, поверхні яких безпосередньо дотикаються до поверхні деталі 6 і в яких періодично циркулює вода, яка регулюється через блок перемикачів 8.

Необхідно зазначити, що в трубопроводах 12 і 13 постійно знаходиться вода яка не циркулює і нагрівається під час наплавлення за рахунок теплопередачі до температури поверхні деталі, яка створюється трьома індукторами 3, 4 та 5, оскільки поверхні трубопроводів 12 і 13 знаходяться безпосередньо в контакті з поверхнею деталі 6. Після наплавлення вимикається джерело струму 9 і за допомогою блока перемикачів 8 вода подається в трубопроводи 12 і 13 з температурою, рівною температурі води в індукторах для охолодження деталі після наплавлення.

Створення температурних режимів за допомогою декількох індукторів (в даному випадку трьох) і двох охолоджуючих трубопроводів створюють сприятливі умови для забезпечення заданої форми, розмірів, якості напавленої поверхні, а також підвищення продуктивності за рахунок усунення додаткових операцій.

Перелік посилань

1. Пулька Ч.В., Пулька М.Т. ПРИСТРІЙ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ФАСОННИХ ДИСКІВ. Патент на корисну модель МПК (2006) В23К 13/00 В23К 101/00 № 152210 від 04.01.2023, бюл. № 1 по заявці u202200783.

УДК 621.791.927.7

**Чеслав Пулька, д.т.н., проф.; Віктор Сенчишин, к.т.н.; Ігор Окіпний, к.т.н., доц.;
Юрій Капаціла, к.т.н., доц.; Михайло Пулька**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВДОСКОНАЛЕНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Анотація. Вдосконалено технологію індукційного наплавлення тонких елементів конструкцій за зміною питомою потужності в часі з прикладанням обертово-поступального переміщення диска з швидкістю 10-60 циклів за хвилину і кутом повороту 0-90 градусів відносно вертикальної осі. Запропонована технологія дозволить досягти значного економічного ефекту за рахунок економії електроенергії та підвищення експлуатаційних характеристик наплавленого шару металу.

Ключові слова: індукційне наплавлення, зносостійкість, порошкоподібний сплав, індуктор.

Cheslav Pulka, Ph.D., Prof.; Viktor Senchyshyn, Ph.D.; Ihor Okipnyi, Ph.D., Assoc. Prof.; Yuriy Kapatsila, Ph.D., Assoc. Prof.; Mykhailo Pulka

ADVANCED INDUCTION SOLDERING TECHNOLOGY

Abstract. The technology of induction welding of thin structural elements has been improved by changing the specific power over time with the application of rotary-progressive movement of the disc at a speed of 10-60 cycles per minute and a rotation angle of 0-90 degrees relatively to the vertical axis. The proposed technology will make it possible to achieve a significant economic effect by saving electricity and improving the operational characteristics of the deposited metal layer.

Keywords: induction surfacing, wear resistance, powder alloy, inductor.

Процес індукційного наплавлення постійно вдосконалюється в напрямках продуктивності процесу, якості наплавленого шару металу та економії електроенергії. Для цього були розроблені конструкції індукторів, нагрівальні системи та способи із застосуванням додаткових технологічних операцій в процесі наплавлення, а саме використанням горизонтальної та вертикальної механічної вібрації. Дані технології дозволяють застосуванням обертово-поступального переміщення деталей.

Запропонована технологія реалізується наступним чином. Тонкий диск 1 встановлюють на стіл 2 з відповідним кутом повороту в межах 0-90 градусів за допомогою механізму 3 і насипають порошкоподібний твердий сплав 4 спеціальним дозатором на рисунку не показано на відповідну товщину і ширину, для отримання наплавленого металу товщиною 0,8-1,5 мм, і шириною 15мм відповідно (рис. 1). Далі встановлюють швидкість обертово-поступального переміщення диска 1 механізмом 5 в межах 10-60 циклів за хвилину в залежності від типу використання порошкоподібного твердого сплаву 4. При подачі струму високої частоти (СВЧ) на індуктор 6 здійснюється нагрівання диска 1 питомою потужністю в часі (крива лінія 7) з відповідною температурою 8 (рис. 2) і здійснюють наплавлення по всій робочій поверхні.

При досягненні початкового розплавлення порошкоподібного твердого сплаву до моменту його повного розплавлення, диску надають обертово-поступальне переміщення механізмом 5 в горизонтальній площині відносно його вертикальної осі з швидкістю 10-60 циклів за хвилину і кутом повороту 0-90 градусів механізмом 3. Коли порошкоподібний твердий сплав 4 розплавився, вимикають механізм переміщення

диска 5 і отриманий біметал вільно остигає. Після цього наплавлений виріб знімають та встановлюють інший, і таким чином цикл повторюється.

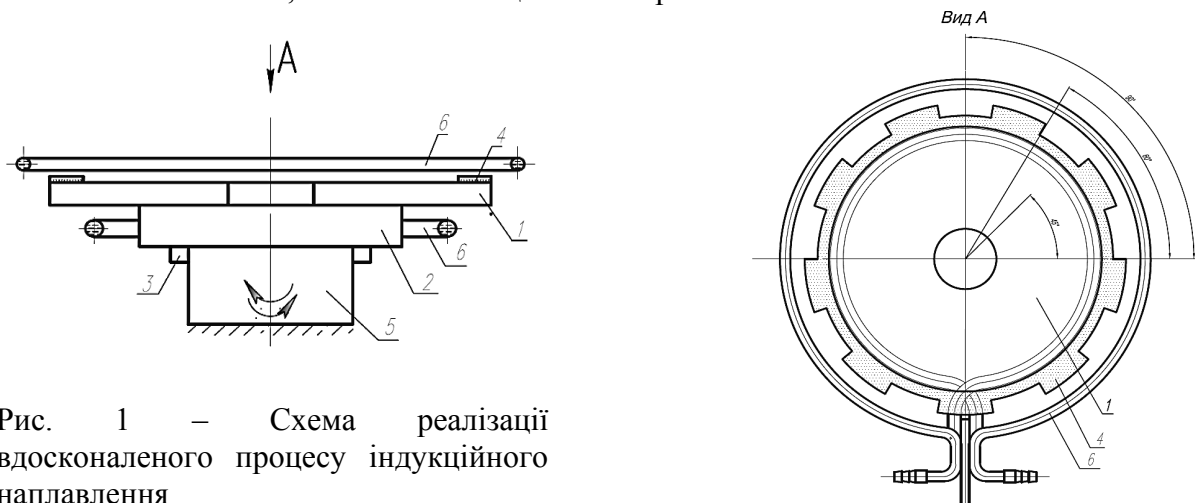


Рис. 1 – Схема реалізації вдосконаленого процесу індукційного наплавлення

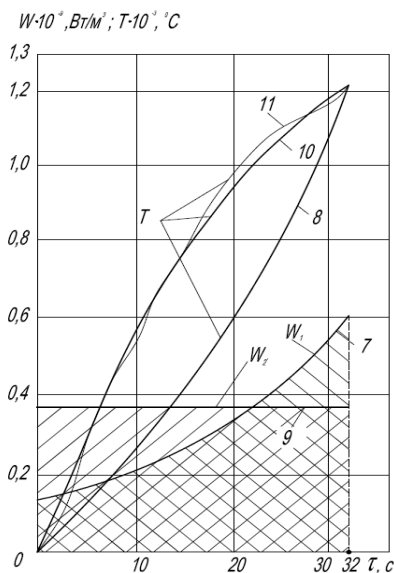


Рис. 2 – Зміна питомої потужності

З метою економії електроенергії подають питому потужність на індуктор 6, яка змінюється в часі (крива 7) з температурою нагрівання (крива 8), яку регулюють за допомогою додаткового електромеханічного пристрою. При цьому досягається економія електроенергії з використанням нового режиму нагрівання (крива 7, рис.2) на 15-23%, в залежності від типу використання порошкоподібних твердих сплавів, які мають різну температуру плавлення і час нагрівання. Це здійснюється за рахунок зменшення теплових втрат конвекцією в оточуюче середовище.

Застосування даного способу в техніці при використанні режиму нагрівання робочої поверхні дисків за змінною питомою потужністю в часі з прикладанням обертово-поступального переміщення з швидкістю 10-60 циклів за хвилину і кутом повороту 0-90 градусів відносно від температури нагрівання вертикальної осі дасть значний зносостійкості та подрібнення

структури наплавленого економічний ефект для народного господарства за рахунок економії електроенергії, підвищення металу. Були проведені дослідження наплавленого металу порошковим сплавом на нікелевій основі ПГ-АН9 за змінною питомою потужністю в часі. Економія електроенергії складала в цьому випадку 23%. Час наплавлення становив 20 с.

Слід зазначити, що наплавлення за змінною потужністю в часі здійснювалося за допомогою спеціально розробленого пристрою, тобто зміною анодної напруги на генераторній лампі по вище згаданому закону за заданий час.

Перелік посилань

1. Патент на корисну модель №152203. Спосіб наплавлення сталевих дисків. Номер заявки: u202107360 . Дата подання заявки: 17.12.2021 . Дата, з якої є чинними права: 05.01.2023. Винахідник: Пулька Ч. В. ; Сенчишин В. С. ; Шарик М. В. ; Окіпний І. Б.; Пулька М. Т.. Бюл. № 1/2023.

2. Патент на корисну модель № 154635. Спосіб наплавлення сталевих фасонних дисків / Номер заявки: u 202301424. Дата подання заявки: 03.04.2023. Дата, з якої є чинними права: 30.11.2023. Винахідник: Пулька Ч. В.; Сенчишин В. С.; Окіпний І. Б.; Пулька М. Т.. Бюл. № 48/2023.

УДК 621.791.927.7

Чеслав Пулька¹, д.т.н., проф.; Віктор Сенчишин¹, к.т.н., Ігор Окіпний¹, к.т.н., доц.; Микола Підгурський¹, д.т.н., проф.; Одарка Прохоренко², к.т.н., доц.

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ІНДУКЦІЙНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКИХ ДИСКІВ

Анотація. Технологічний розвиток способу індукційного наплавлення здійснюється із застосуванням різних технологічних та конструкторських прийомів. Застосування яких дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики наплавлених деталей та знизити енергоємність самого процесу наплавлення. Розглядувані в роботі технології показують ефективність застосування даного методу наплавлення, а також демонструють напрямки і шляхи його подальшого розвитку.

Ключові слова: індукційне наплавлення, порошкоподібний сплав, індуктор, енергоефективність.

Cheslav Pulka¹, Ph.D., Prof.; Viktor Senchyshyn¹, Ph.D.; Ihor Okipnyi¹, Ph.D., Assoc. Prof.; Mykola Pidgurskyi¹, Ph.D., Prof.; Odarka Prokhorenko², Ph.D., Assoc. Prof.

PROGRESS OF TECHNOLOGIES OF INDUCTION SURFACING OF THIN DISCS

Abstract. The technological development of the induction surfacing method is carried out using various technological and design methods. The use of which makes it possible to increase the operational characteristics of welded parts and reduce the energy consumption of the surfacing process itself. The technologies considered in the work show the effectiveness of the application of this surfacing method, as well as demonstrate the directions and ways of its further development.

Keywords: induction surfacing, powder alloy, inductor, energy efficiency.

В даний час в ґрунтообробній і збиральній сільськогосподарській техніці використовують робочі органи у вигляді тонких плоских деталей (лемехи плугів, диски луцильників, лапи культиваторів, ножі-гичкорізи і ін.), які експлуатуються в умовах абразивного спрацювання. Такий тип деталей повинен володіти високою стійкістю проти спрацювання, оскільки даний процес протікає при неперервній взаємодії металу з ґрунтом і рослинами. Крім цього, для забезпечення різальних властивостей вони повинні бути схильні до самозагострювання. Досвід показує, що найкращим чином цим вимогам задовольняють біметалеві (двошарові) робочі органи. При використанні такого типу деталей міцність забезпечується основним металом із якого виготовлена деталь, а стійкість проти спрацювання нанесеним плакуючим шаром. Співвідношення товщини основного і плакуючого шару, а також їх стійкість до зношування забезпечують ефект самозагострювання.

При виготовленні такого типу деталей найбільш широко застосовують способи наплавлення. Одним із найбільш ефективним способом із врахуванням ряду особливостей, таких як можливість наплавлення шарів невеликої товщини; високу продуктивність; високий рівень механізації й автоматизації процесу (що важливо в умовах серійного виробництва) отримав спосіб індукційного наплавлення. Основними недоліками даного способу є: висока енергоємність процесу, перегрівання основного металу, присаджувальний матеріал повинен бути більш легкоплавким, ніж основний. Незважаючи на недоліки даний спосіб залишається одним із найбільш ефективним при виготовленні деталей ґрунтообробних машин.

Розвиток та вдосконалення технологій індукційного наплавлення здійснюється в напрямках підвищення продуктивності процесу і зносостійкості наплавленого металу та економії електроенергії.

Для наплавлення тонких дисків складної конфігурації і відносно великих розмірів з суцільною і переривистою робочою поверхнею (різальною частиною) використовувався спосіб неперервно-послідовне наплавлення [1]. Він реалізовується за рахунок переміщення деталі із нанесеною попередньо зносостійкою порошкоподібною шихтою в сегментному індукторі, який під'єднаний до високочастотного генератора. Перевагою даного способу є технологічна гнучкість, тобто можливість здійснювати наплавлення деталей різних розмірів при відносно невеликій потужності високочастотних генераторів. Однак даний спосіб має ряд недоліків пов'язаних із порівняно низькою продуктивністю, великою енергоємністю та коробленням деталей, що відображається на стабільності товщини наплавлюваного шару. Деталі наплавленні цим способом потребують додаткової операції рихтування з метою усунення деформацій які виникли після наплавлення. З метою усунення недоліків неперервно-послідовного способу індукційного наплавлення була розроблена технологія, яка полягає в одночасному нагріванні всієї зміцнювальної зони (одночасне нагрівання всієї зони нанесення зносостійкого металу) [1,2]. Її реалізація дозволяє підвищити продуктивність процесу індукційного наплавлення в 4-5 разів, досягти економії електроенергії на 15-25%, зменшити деформації деталей і тим самим усунути операцію рихтування в порівнянні з неперервно-послідовним процесом наплавлення.

Продуктивність процесу наплавлення в даному випадку досягається за рахунок заміни неперервно-послідовного способу наплавлення на одночасне наплавлення, а зменшення деформації здійснюється за рахунок єдиної рідкої ванни, створюваної наплавлюваним металом. Економія електроенергії досягається за рахунок розробленого оптимального режиму нагрівання [1]. Для її реалізації була розроблена спеціальна конструкція індуктора, який дозволяє концентрувати потужність електромагнітного поля в зоні наплавлення.

З метою забезпечення рівномірного розподілу потужності в зоні наплавлення та рівномірної температури було розроблено конструкції нагрівальних систем із застосуванням теплового та електромагнітного екранів (ІТЕЕ) [1,2]. Електромагнітні екрани застосовують для екранування електромагнітних полів. Даний тип екранів застосовують з метою запобігання нагрівання поверхонь які не підлягають нагріванню, оскільки при нагріванні відбуваються структурні перетворення металу, а в деяких випадках це є небажаний ефект. При достатній близькості цих поверхонь до індуктора, вони можуть нагріватися до досить високих температур, що призводить до використання значної потужності і надмірних витрат електроенергії. Тепловий екран застосовують з метою зменшення тепловіддачі тепла з торця наплавлювальної деталі в оточуюче середовище і тим самим зменшити час наплавлення.

Запропонована технологія з використанням нагрівальної системи ІТЕЕ дозволяє додатково економити до 14 % електроенергії, підвищити стабільність товщини шару наплавленого металу на 10...15 % і скоротити час наплавлення на 30%.

З метою підвищення зносостійкості наплавленого металу було запропоновано застосувати в процесі індукційного наплавлення горизонтальну вібрацію деталей. Такий підхід дозволяє в 1,5 рази підвищити зносостійкість наплавленого металу та покращити стабільність нанесеного шару на 20%, що в загальному підвищує експлуатаційні характеристики робочих органів ґрунтообробних знарядь [2, 3].

Перелік посилань

1. Shabl'ij, O.N. Optimization of induction surfacing of thin disc with allowance for heat and electromagnetic screening / Shabl'ij, O.N., Pulka, Ch.V., Pis'mennyj, A.S. // *Avtomaticheskaya Svarka*, 2003, (9), pp. 22–25

2. Ch.V. Pulka. Ways of updating the technology of induction surfacing of thin steel discs / Ch.V. Pulka O.N. Shably V.N. Baranovsky V.S. Senchishin and V.Ya. Gavrilyuk// *The Paton Welding Journal*. 5-6/2015. P.59-62.

3. Ch. V. Pulka. Influence of vibration of parts on structure and properties of metal in surfacing. / Ch. V. Pulka, O.N. Shably, V.S. Senchishin, M.V. Sharyk, G.N. Gordan// *The Paton Welding Journal* 1/2012, 23-25.

УДК 621.326:621.791.4:621.791/.792:621.791.052

Сергій Римар, д.т.н., с.н.с.; Олексій Прокоф'єв, к.т.н.; Руслан Губатюк, к.т.н.; Євген Пантелеймонов, к.т.н., с.н.с.; Валерій Абдулах

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

**ВИКОРИСТАННЯ ЗРАЗКІВ МАЛИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ФОРМ ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ІНДУКЦІЙНОГО ТЕРМІЧНОГО
ОБРОБЛЕННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

Анотація. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено і запатентовано економічний спосіб використання зразків малих геометричних форм для визначення параметрів процесу індукційного термічного оброблення зварних з'єднань.

Ключові слова: індукційне термічне оброблення, зварний шов, зразок малих геометричних форм, математичне моделювання, фізичне моделювання.

Serhii Rymar, Ph.D.; Oleksiy Prokofiev, Ph.D.; Ruslan Gubatyuk, Ph.D.; Yevhen Panteleimonov, Ph.D.; Valery Abdulakh

**USE OF SAMPLES OF SMALL GEOMETRICAL FORMS TO DETERMINE
PARAMETERS OF THE PROCESS OF INDUCTION HEAT TREATMENT OF
WELDED JOINTS**

Abstract. At the E.O. Paton electric welding Institute of the NAS of Ukraine developed and patented an economical method for using samples of small geometric shapes to determine the parameters of the process of induction heat treatment of welded joints.

Keywords: induction heat treatment, weld, sample of small geometric shapes, mathematical modeling, physical modeling.

При виготовленні зварних конструкцій виникають ситуації, коли необхідно зварювати сталі, зварне з'єднання яких потребує подальшого термічного оброблення. Проблемними є шви зварюваних зі сталей різних видів, коли у зварному шві утворюється сплав металу, відмінний від основного металу з'єднувальних деталей. Бувають випадки, коли при цьому зварний шов пересікає вже існуючі зварні шви і у таких місцях, утворюються інші структури металу ніж у вже отриманому металі зварного шву. Для покращення структури утвореного металу таких зварних з'єднань бажане, а в ряді випадків і необхідне їх термічне оброблення.

При індукційному термічному обробленні таких зварних з'єднань, особливо при використанні легованих і високолегованих сталей та сталей підвищеної міцності, виникають питання, пов'язані із доволі складним і затратним пошуком параметрів режиму виконання даного технологічного процесу, із визначення електромагнітних параметрів необхідного індукційного обладнання [1 – 4]. До того ж зварні вироби, що потребують термічного оброблення, можуть мати високу вартість і великі габарити. Тому проводити дослідження для визначення параметрів їх термічного оброблення на самих виробках є вкрай вартісною і економічно затратною задачею. Тому актуальним стає питання спрощення пошуку і відпрацювання режимів індукційного термічного оброблення із визначенням електромагнітних, теплових і часових параметрів ведення процесу, розробки необхідного індукційного обладнання із прив'язкою до дослідження з визначення структурних перетворень в термічно обробленому металі зварного з'єднання.

На основі теорії подібності, в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено і запатентовано [5] ефективний і економічний спосіб фізичного моделювання термічного оброблення малих зразків у вигляді циліндричних стрижнів

певного діаметра і довжини, що містять реальний зварний шов, з визначенням властивостей металу при здійсненні їх високочастотного індукційного термічного оброблення з можливістю подальших комплексних випробувань термооброблених зразків [6 – 8]. На запропонованих зразках здійснюється математичне і фізичне моделювання процесу їх високочастотного індукційного термічного оброблення (рис. 1) із визначенням електромагнітних і теплових параметрів процесу і геометричних параметрів індукторів. Дуже важливим є те, що зразки малої форми мають ідентичні до реальних об'єктів види сталей і зварні шви.

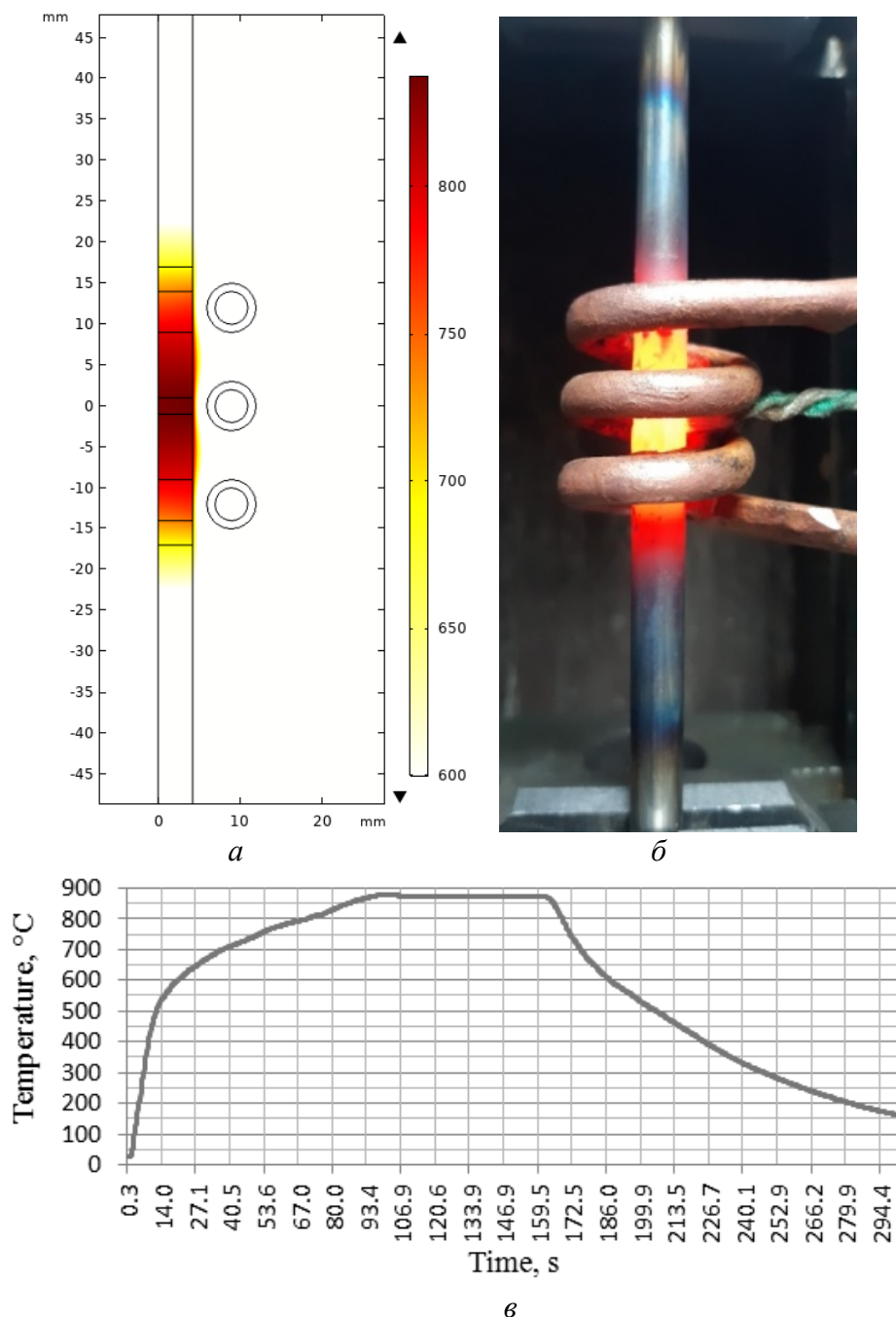


Рис. 1. Математичне моделювання температурного поля (а) і фізичне моделювання (б) процесу високочастотного індукційного термічного оброблення малого циліндричного стрижневого зразка із зварним швом по центру довжини стрижня та зміна температури в центрі на поверхні зразка (в) в процесі його оброблення

Економія полягає у моделюванні і проведенні експериментів із споживанням значно менших ресурсів, як енергетичних, так і економією витрат на виготовлення відповідного дослідного індукційного обладнання для проведення досліджень на малих зразках, або фрагментах реальних зразків.

Подібні заходи дозволяють, із залученням математичного моделювання, розробляти необхідне індукційне обладнання із визначеними електромагнітними і геометричними параметрами індукторів для реальних виробів. Індуктори можуть нагрівати весь зварний шов виробу, або виконувати процес місцевого високочастотного індукційного термічного оброблення. Останнє дозволяє виконувати термічне оброблення на будь якому місці розташування швів у виробі, використовуючи при цьому різні форми і конструкції індукторів.

Перелік посилань

1. Письменный А.С., Пантелеймонов Е.А., Прокофьев А.С., Пулька Ч.В. Расчет индуктора с магнитопроводом для нагрева плоских поверхностей. Автоматическая сварка. 2000. № 11. С. 39-43.

2. Пулька Ч.В., В.С. Сенчишин, В.В. Сенчишин. Шляхи вдосконалення технології індукційного наплавлення деталей ґрунтообробних машин. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва : проблеми теорії та практики», 29-30 вересня 2022 року. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. С. 137.

3. Числове моделювання напруженого стану з урахуванням кінетики фазових перетворень у стиковому з'єднанні зі сталі dc04 для різних технологічних схем зварювання / О.В. Прохоренко, В.М. Прохоренко, Ч.В. Пулька, В.С. Сенчишин. МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. С. 95–97.

4. Використання математичного моделювання при розробленні нових технологічних процесів індукційного наплавлення. Чеслав Пулька, Михайло Михайлишин, Віктор Сенчишин, Ігор Окіпний, Мирослав Шарик, Володимир Гаврилюк. МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. С. 98–100.

5. Спосіб фізичного модулювання процесу високочастотної термічної обробки металевого зразка: пат. 123711 Україна: МПК C21D 1/10 (2006.01), G01N 33/20 (2019.01), G01N 33/207 (2019.01), G01N 1/28 (2006.01), G01N 1/44 (2006.01). № a201902347; заявл. 11.03.2019; зпубл. 19.05.2021, Бюл. № 20. 5 с.

6. Hubatyuk R.S., Rymar S.V., Prokofiev O.S., Kostin V.A., Didkovskiy O.V., Muzhychenko O.F. Simulation of electromagnetic and thermal fields in the process of induction heating on small specimens with the presence of welded joint of high-strength railway rails. The Paton Welding Journal. 2021. No. 1. P. 40-44. doi: 10.37434/tpwj2021.01.08

7. The simulation of the process of heat treatment of welded joints of high-strength railway rails / R.S. Gubatyuk, S.V. Rymar, V.A. Kostin, O.S. Prokof'iev, O.V. Didkovskiy, Y.V. Antipin. Proceedings of the III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP: III Engineering-III-2021). AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, USA. Publ. 15 November 2021. Vol. 2402. Issue 1. 070026. P. 070026-1-070026-7. doi: 10.1063/5.0071364

8. Hubatyuk R.S., Rymar S.V., Prokofiev O.S., Kostin V.A., Didkovskiy O.V., Antipin E.V. Modeling of the process of induction heat treatment of welded joints from rail high-strength steels. The Paton Welding Journal. 2021. No. 9. P. 27-38. doi: 10.37434/tpwj2021.09.05.

УДК 621.326

Богдан Царик; Олег Махненко, д.т.н.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

РОЗРАХУНКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЄМНОСТЕЙ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Анотація. Представлена розрахункова модель прогнозування залишкових деформацій для великогабаритних конструкцій з великою кількістю зварних з'єднань. Для циліндричної ємності з алюмінієвого сплаву з великою кількістю зварних швів була визначена методом термопластичності функція усадки при зварюванні тертям з перемішуванням, і за допомогою наближеного методу функції усадки розраховані загальні залишкові деформації.

Ключові слова: зварні ємності, алюмінієвий сплав, зварювання тертям з перемішуванням, залишкові деформації, математичне моделювання.

Bohdan Tsaryk; Oleh Makhnenko, Ph.D.

CALCULATIONAL PREDICTION OF RESIDUAL DISTORTIONS AT WELDING OF LARGE-SCALE ALUMINUM ALLOY TANKS

Abstract. A computational model for predicting residual distortions of large-scale structures with a large number of welded joints was developed. For cylindrical tank made of aluminum alloy with a large number of welds the inherent strain function for friction stir welding joint was determined by the thermoplasticity analysis, and the residual distortions were calculated by the inherent strain method.

Keywords: welded tanks, aluminum alloy, friction stir welding, residual distortions, mathematical modeling.

Технологія зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) широко використовується для виконання з'єднань великогабаритних конструкцій, таких як паливні баки для аерокосмічної техніки, корпуси для транспортного машинобудування та ін. Для прогнозування точності, міцності та довговічності зварних конструкцій, виконаних ЗТП, актуальним завданням є розрахункове визначення залишкових напружень та деформацій. Особливо складною проблемою є прогнозування загальних деформацій великогабаритних конструкцій з великою кількістю зварних з'єднань.

Методологія розрахункового визначення зварювальних деформацій

Для вирішення задачі прогнозування деформацій великогабаритних циліндричних ємностей з алюмінієвого сплаву з великою кількістю зварних швів (Рис.1.) застосовано методологію моделювання зварювальних напружень і деформацій на основі комбінованого використання загального методу термопластичності [1] і наближеного методу функції усадки [2]. За допомогою методу термопластичності моделюється тимчасові і залишкові напруження і деформації для окремих зварних з'єднань. Відомо, що залишкові зварні напруження і пластичні деформації утворюються в обмеженій області в зоні зварного з'єднання. Тому розподілення залишкових напружень і параметрів функції усадки може бути отримано на спрощених моделях зварного з'єднання обмеженого розміру, що потребує значно менших комп'ютерних ресурсів і часу на розрахунок.

Стосовно великогабаритних циліндричних ємностей з повздовжніми і кільцевими стиковими з'єднаннями доцільно розглядати два типи спрощених моделей. Для визначення локальних залишкових деформацій (параметрів функції усадки) в зонах

повздовжніх з'єднань можна використовувати модель стикового з'єднання плоских елементів обмеженого розміру (Рис.2а). В зоні кільцевих з'єднань для визначення залишкових напружень і деформацій (параметрів функції усадки) можна використовувати спрощену модель в двовимірній постановці стикового кільцевого з'єднання реального розміру, але з припущенням швидкорухомого джерела зварювального нагріву і гіпотези «плоскої деформації» (Рис.2б).

Потім, з використанням трьохмірної моделі циліндричної ємності реального розміру за допомогою наближеного методу функції усадки в рамках пружної постановки задачі моделюються загальні деформації великогабаритної зварної конструкції від всіх зварних швів.



Рис.1. Схема деформацій циліндричної ємності з великою кількістю повздовжніх і кільцевих зварних з'єднань.

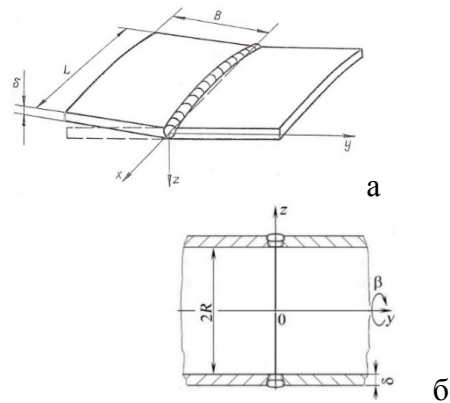


Рис.2. Визначення параметрів функції усадки: а) 3D модель стикового зварного з'єднання пластин обмеженого розміру; б) 2D модель кільцевого зварного з'єднання

Узагальнене представлення функції усадки як тензорної функції

Представимо функцію усадки як тензор пластичних деформацій

$$\Pi_{ij} = \begin{vmatrix} \Pi_{xx} & \Pi_{xy} & \Pi_{xz} \\ \Pi_{yx} & \Pi_{yy} & \Pi_{yz} \\ \Pi_{zx} & \Pi_{zy} & \Pi_{zz} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx}^p & \varepsilon_{xy}^p & \varepsilon_{xz}^p \\ \varepsilon_{yx}^p & \varepsilon_{yy}^p & \varepsilon_{yz}^p \\ \varepsilon_{zx}^p & \varepsilon_{zy}^p & \varepsilon_{zz}^p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx}^p & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy}^p & 0 \\ 0 & 0 & -(\varepsilon_{xx}^p + \varepsilon_{yy}^p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Pi_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \Pi_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & -(\Pi_{xx} + \Pi_{yy}) \end{vmatrix}$$

$\varepsilon_{xy}^p = \varepsilon_{yx}^p = \varepsilon_{xz}^p = \varepsilon_{zx}^p = \varepsilon_{zy}^p = \varepsilon_{yz}^p = 0$, оскільки вісь X і Y є головними осями для повздовжнього і поперечного напрямлення зварних з'єднань, $\varepsilon_{zz}^p = -(\varepsilon_{xx}^p + \varepsilon_{yy}^p)$ з умови збереження об'єму. Якщо вздовж зварного з'єднання функція усадки постійна, тоді $\Pi_{xx} = \varepsilon_{xx}^p(y, z)$, $\Pi_{yy} = \varepsilon_{yy}^p(y, z)$.

Постановка задачі визначення деформації на основі тензорної функції усадки

Тензор повних деформацій ε_{ij} в зварному елементі буде визначатися сумою тензора пружних деформацій ε_{ij}^e і тензора функції усадки Π_{ij}

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \Pi_{ij}, \quad (i, j = x, y, z).$$

Компоненти тензора ε_{ij} виражаються в кожній точці (x, y, z) трьома компонентами вектору переміщень U_i , а також пов'язані один з одним рівняннями сумісності деформацій. На граничних поверхнях величини переміщень U_i визначаються граничними умовами. Компоненти тензора ε_{ij} в рамках пружної постановки задачі

пов'язані з тензором напружень σ_{ij} законом Гука. Компоненти тензора напружень пов'язані один з одним рівняннями рівноваги. Вказані співвідношення і умови визначають загальну постановку задачі.

Визначення функції усадки для зварювання тертям з перемішуванням

Для визначення функції усадки були використані методи математичного моделювання температурних розподілів і напружено-деформованого стану стикового з'єднання пластин при зварювальному нагріві. Особливістю розробленої моделі джерела нагріву при ЗТП являється тепловиділення за рахунок тертя інструменту відносно матеріалу з'єднання [1]. Інструмент обертається навколо вертикальної осі з певною кутовою швидкістю ω , (об/с) і притискається до пластин з осьовим зусиллям P_n , (Па), що викликає на поверхні контакту інструменту тепловий потік в матеріал з'єднання

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot r, \quad (Вт/м^2); \quad Q = \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot \pi \cdot \iint_S r dS,$$

де μ - коефіцієнт тертя, Q - потужність тепловиділення (Вт), S - площа відповідних поверхонь контакту, $Q_1 = 2\pi/3 \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot (R_2^3 - R_1^3)$ на плечі ($z=\delta$, $R_1 > r > R_2$), $Q_2 = 2\pi \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^2 \cdot h$ на бічній поверхні штиря ($r=R_1$, $(\delta-h > z > \delta)$), $Q_3 = 2\pi/3 \cdot \mu \cdot P_n \cdot \omega \cdot R_1^3$ на нижній торцевій поверхні штиря ($z=\delta-h$, $0 > r > R_1$). Де δ - товщина зварюваних пластин, (м), h - довжина штиря, (м). Потужність об'ємного тепловиділення $W(x,y,z,t)$, (Вт/м³) складається з тепловиділення в об'ємі V_1 на верхній поверхні пластин з'єднання під плечем інструменту і в об'ємі штиря V_2 (dz - розмір скінченного елемента):

$$W(x, y, z, t) = W_1 + W_2 = \frac{Q_1}{V_1} + \frac{Q_2 + Q_3}{V_2} = \frac{2\mu P_n \omega (R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2)}{3(R_2 + R_1) dz} + \frac{2\mu P_n \omega}{\delta - h} \left(h + \frac{R_1}{3} \right).$$

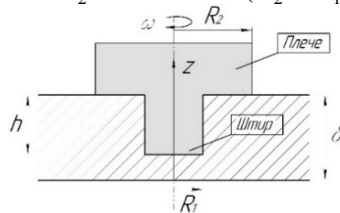


Рис. 3 Схема робочого інструменту при ЗТП

Модель термопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання передбачає, що тензор загальних деформацій є сумою пружних і пластичних деформацій:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad \text{де } \varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma}{2G} + \delta_{ij} (K\sigma + \varphi) \quad (i, j = x, y, z)$$

де δ_{ij} - символ Кронекера, σ - кульовий тензор, G - модуль зсуву, K - модуль об'ємної деформації, E - модуль Юнга, ν - коефіцієнт Пуассона, $\varphi = \alpha(T - T_0)$, де α - коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу. Пластичні деформації пов'язані з напруженнями рівнянням теорії пластичної неізотермічної течії (умовою Мізеса).

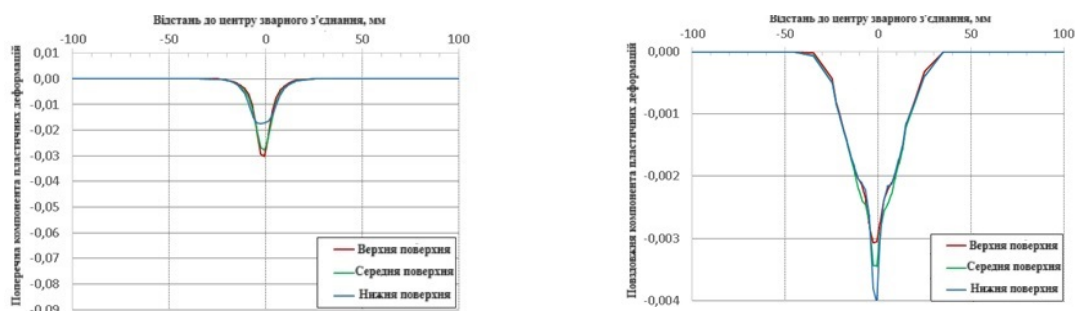


Рис.4 Результати розрахунку розподілу поперечних і поздовжніх пластичних деформацій для стикових зварних з'єднань у моделі FSW пластини (300x300 мм, $\delta=10$ мм)

Результати моделювання зварювальних деформацій

На Рис.5 представлено варіант довгої циліндричної оболонки, яка містить 6 поздовжніх і 5 кільцевих зварних з'єднань.

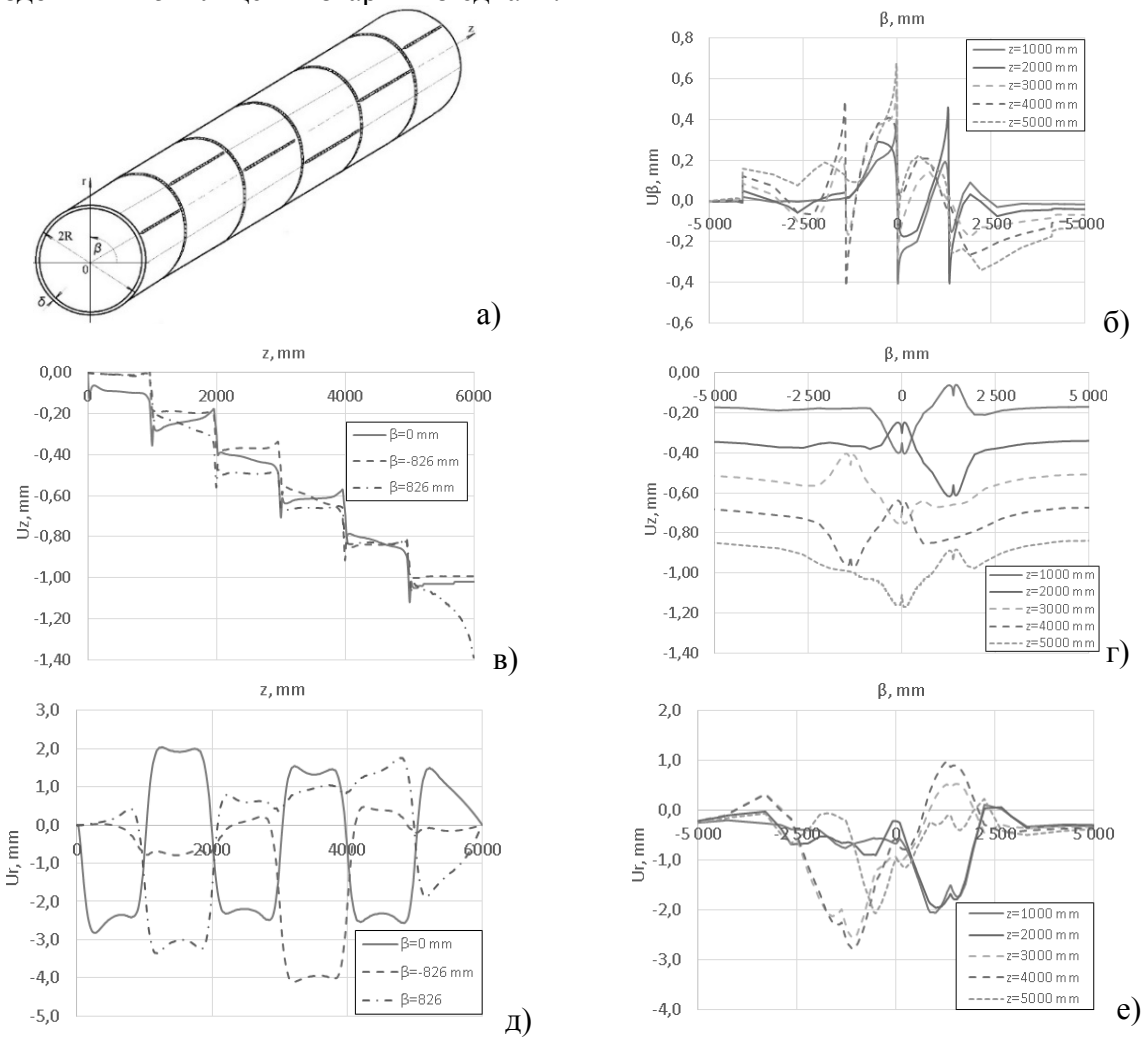


Рис.5. Зварювальні деформації циліндричної оболонки ($D=3200$ мм, $L=6000$ мм, $\delta=10$ мм)

Висновки. Розроблено математичну модель і розрахунковий алгоритм для розрахункового визначення зварювальних деформацій великогабаритних циліндричних оболонок з великою кількістю кільцевих і поздовжніх зварних з'єднань. Параметри функції усадки зварних з'єднань - це пластичні деформації в осьовому Π_{zz} та окружному $\Pi_{\beta\beta}$ напрямках. Задачу вирішують у загальній тривимірній постановці в межах пружного розв'язання, що дає змогу з достатньою інженерною точністю оперативно прогнозувати деформації великогабаритних циліндричних ємностей зі зварними з'єднаннями різного напрямку та розташування.

Перелік посилань

1. B.R. Tsaryk, O.F. Muzhychenko, O.V. Makhnenko Mathematical model of determination of residual stresses and strains in friction stir welding of aluminium alloy. The Paton Welding Journal – 2022. - #9. – P.33-40.
2. Махненко О. В., Мужиченко А. Ф. Математическое моделирование тепловой правки цилиндрических оболочек и валов с общими деформациями искривления продольной оси. Автомат. сварка. – 2007. – № 9. – С. 23–28.

УДК 621.791.(92+046):669.245:539.424

Олександр Яровицин, к.т.н., с.д.; Микола Черв'яков, д.т.н., с.н.с.; Георгій Хрущов; Іван Волосатов

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

**РОЗРОБКА І АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ДІЛЯНКИ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО
ВПЛИВУ ВАЖКОЗВАРИЮВАНОВОГО НІКЕЛЕВОГО ВИСОКОЖАРОМІЦНОГО
СПЛАВУ**

Анотація. На базі випробувань на повздовжній статичний розтяг зразка «50% основного та 50% наплавленого металу» в діапазоні температур 20-1100°C для нікелевого жароміцного сплаву типу ЖС6 розроблена ресурсозберігаюча методика. Вона дозволяє для наплавленої кромки експериментально оцінити величину критичної деформації руйнування ϵ для високотемпературної ділянки зони термічного впливу в основному металі та розрахунковим шляхом – її границю міцності.

Ключові слова: нікелевий жароміцний сплав; високотемпературна ділянка зони термічного впливу; статичний розтяг; критична деформація руйнування

Oleksandr Yarovytsyn, Ph.D.; Mykola Cherviakov, Ph.D.; Heorhii Khrushchov; Ivan Volosatov

**DEVELOPMENT AND APPROVAL OF THE METHODOLOGY FOR ASSESSING
THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE HIGH-TEMPERATURE SECTION OF
THE HEAT-AFFECTED ZONE OF DIFFICULT-TO-WELD NICKEL-BASED
SUPERALLOY**

Abstract. A resource-saving technique was developed on the basis of longitudinal tensile tests of the "50% base and 50% deposited metal" sample in the 20-1100°C temperature range for nickel nickel-based superalloy of the ZhS6 type. It allows for the welded edge to experimentally estimate the the critical rupture strain ϵ value for the high-temperature section of the heat-affected zone (HAZ) in the base metal and its ultimate tensile strength by calculation.

Keywords: difficult-to-weld nickel-based superalloys, micro-plasma powder welding deposition, longitudinal tensile test, high-temperature section of the heat-affected zone, deformation capacity.

Вступ. В нашій країні освоєні та широко застосовуються промислові технології відновлення кромки робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) з нікелевих жароміцних сплавів (ЖС) з високим вмістом зміцнюючої γ' -фази мікроплазмовим порошковим наплавленням (МПН) [1-2]. Розширення технологічних можливостей відновлення деталей авіаційних ГТД стикається зі збільшенням проявів схильності до утворення гарячих тріщин в зварних з'єднаннях «основний-наплавлений метал», що зокрема корелюються зі зростанням об'єму наплавленого металу та довжини наплавленого валика [3]. Актуальною є розробка таких методик досліджень, що дозволяють акцентуватися на визначенні характеристик опірності до утворення тріщин для окремих типових зон зварного з'єднання. Як важлива характеристика стадії такої опірності зарекомендувала себе критична деформація руйнування ϵ , яку достатньо просто визначати при випробуваннях на статичний розтяг. Попередні дослідження, виконані за стандартизованою (ISO/TR 17641-3) методикою Vareststraint test для нікелевого ЖС ЖС6У [4], вимагали використання вузькоспеціалізованого обладнання з спільним динамічним деформуванням металу шву й зони термічного

впливу (ЗТВ) основного металу (ОМ). Для цього була необхідна значна кількість пластин ЖС, а результати не дозволяли отримати експериментальні дані за ε окремо для кожної з зазначених вище типових зон зварного з'єднання.

Методика досліджень. В основу розробленої методики оцінки механічних властивостей та деформаційної здатності високотемпературної ділянки (ВТД) ЗТВ нікелевого ЖС покладено попередньо виявлені закономірності повздовжнього руйнування зразка наплавленого металу (НМ), що складався з двох сплавлених шарів зі значним чином відмінною пластичністю. Встановлено [5], що такий двошаровий зразок в процесі випробувань на поздовжній статичний розтяг руйнується з критичною деформацією ε , яка практично співпадає з відповідною величиною, визначеною для окремо випробуваної його найменш пластичної зони. Нова методика базувалася на вирішенні оберненої задачі. Малопластичною зоною з невідомою величиною ε , що визначалася шляхом випробувань двошарового зразка «50 % ОМ + 50 % НМ» на поздовжній статичний розтяг при $T = 20-1100^{\circ}\text{C}$ на сервогідравлічній машині MTS-810, виступала ВТД ЗТВ ОМ нікелевого ЖС (рис. 1-а), що припадала на певну частину площі поперечного перерізу робочої ділянки мініатюрного плоского пропорційного зразка (рис. 1-б).

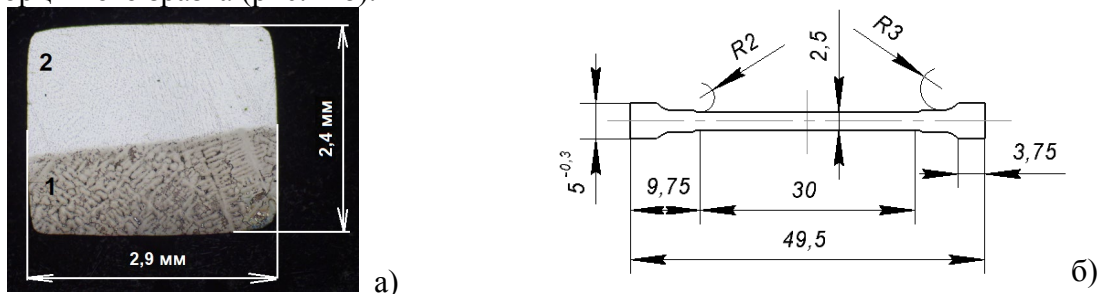


Рисунок 1. Поперечний переріз робочої ділянки (а) двошарового плоского пропорційного мініатюрного зразка (б). Примітка: 1 – ОМ нікелевого ЖС типу ЖС6; 2 – НМ сплаву Inconel 625

Загальну схему підготовки зразків МПН проілюстровано на рис. 2. Як зразки ОМ використовувалися пластинки литих полікристалічних сплавів ЖС6У та ЖС6К розмірами $100 \times 50 \times 5$ мм, що після вакуумно-індукційної виплавки за серійною технологією пройшли попередню термічну обробку за режимом гомогенізації $1210^{\circ}\text{C}-4$ год. У якості НМ для формування верхньої частини зварної заготовки – жаростійкий сплав Inconel 625 з підвищеною пластичністю. Підготований торець пластини попередньо потоншувався шліфуванням до 3,5-4,0 мм; одношарове МПН (див. рис. 2-а) присадного порошку Inconel 625 фракцією 53-150 мкм із застосуванням захисного газу 90% Ar+10% H_2 виконувалося на імпульсному зварювальному струмі з $I_{\text{RMS}} = 30-35$ А при швидкості 0,9-1,1 м/год. та кількості подачі дисперсної присадки 5,0 г/хв. Після зняття бокових підсилень наплавленого валика і хімічного травлення в реактиві Марбле (див. рис. 2-б) та проводилося нанесення розмітки відносно виявленої лінії сплавлення (див. рис. 2-в). Зразки для механічних випробувань вирізалися (див. рис. 2-в) на електроіскровому верстаті типу DK 7735; надалі поверхні електроерозійних різів полірувалися. Такі зразки випробовувалися без термічної обробки – у структурному стані «as built» за ISO/ASTM 52900. Фактичний розподіл площ поперечного перерізу ОМ та НМ (див. рис. 1-а) на випробуваних зразках уточнювався при металографічних дослідженнях. Додатково окремо випробовувалися зразки ОМ сплавів ЖС6У і ЖС6К, а також зразки НМ Inconel 625, виготовлених електроерозійною різкою зі зварної заготовки з багатошаровим наплавленням типу «вертикальна стінка».

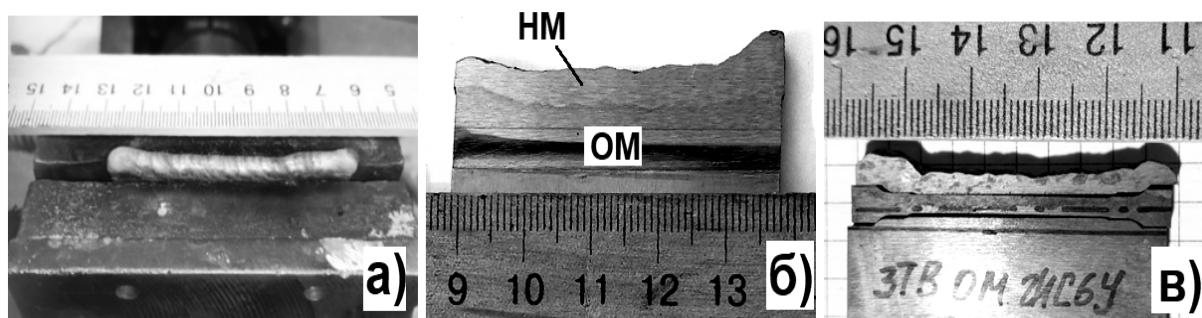


Рисунок 2. Основні етапи підготовки зразків «50 % ОМ + 50 % НМ» способом МПН

Результати та їх аналіз. Експериментальні дані для величини критичної деформації руйнування ε в залежності від температури 20-1100°C для ОМ та його ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К представлено на рис. 3. Металографічні дослідження показали, що для випробуваних двошарових зразків відносна площа поперечного перерізу ОМ складала: на основі сплаву ЖС6У – 0,60...0,70; на основі сплаву ЖС6К – 0,45...0,55. Встановлено, що для ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К спостерігається значне зниження деформаційної здатності порівняно з відповідним литим ОМ. Зокрема, при $T=600-1000^{\circ}\text{C}$ для ВТД ЗТВ ОМ спостерігається малопластичний стан з $\varepsilon = 0,3-1,0\%$. Результати розрахунків границі міцності σ_B для ВТД ЗТВ, виконані на базі відповідних експериментальних даних випробуваних зразків «50 % ОМ + 50 % НМ» на базі сплавів ЖС6У,К та зразків «100 % НМ» Inconel 625 з урахуванням реальних співвідношень площ поперечного перерізу між ОМ та НМ, наведено на рис. 4.

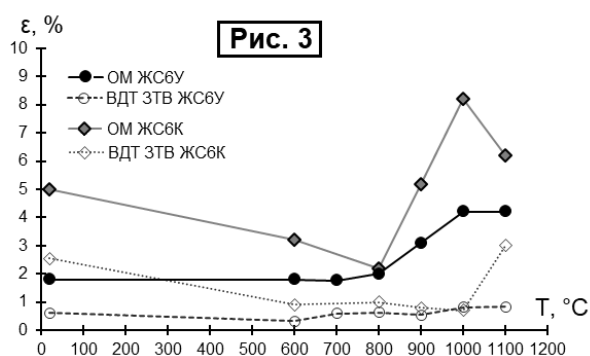


Рисунок 3. Залежність критичної деформації руйнування ε від температури T для ОМ та його ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К

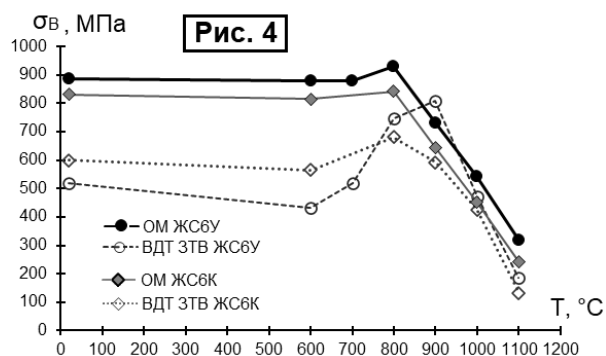


Рисунок 4. Залежність границі міцності σ_B від температури T для ОМ та його ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К

Вони засвідчили також наявність в діапазоні температур 20-800°C помітного зменшення ВТД ЗТВ, товщина якої за даними металографічних досліджень була 1,1...1,7 мм. Величина такого зменшення складає 30-45 % відносно σ_B литого ОМ ЖС. Його наявність можна пов'язати з характерним зменшенням розмірів міждендритних проміжків на ВТД ЗТВ ОМ через укрупнення гілок дендритів під дією зварювального термомеханічного циклу. За даними попередніх досліджень також встановлено наявність у структурному стані «as built» при $T=600-1100^{\circ}\text{C}$ подібного малопластичного стану з $\varepsilon \leq 1,0\%$ і для НМ сплавів ЖС6У,К (рис. 5).

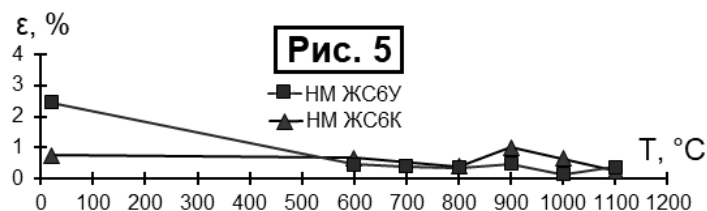


Рисунок 5. Залежність критичної деформації руйнування ϵ від температури T для НМ сплавів ЖС6У та ЖС6К

Заклучення. Розроблено ресурсозберігаючу методику оцінки механічних властивостей та деформаційної здатності ВТД ЗТВ глибиною 1,1-1,7 мм та апробовано її на сплавах ЖС6У та ЖС6К. Для ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К порівняно з відповідним литим ОМ встановлено: при 20-1100°C деградацію деформаційної здатності щонайменше у 2-3 рази; при 20-800°C значне її зменшення у 30-45 %. Показано, що відома висока схильність ЖС типу ЖС6 до утворення гарячих тріщин при зварюванні плавленням обумовлена одночасним формуванням малопластичних станів як з боку ВТД ЗТВ ОМ, так і з боку НМ цього ж хімічного складу. В таких умовах можливості серійних технологій ремонту обмежуються відновленням способом МПН малогабаритних робочих лопаток авіаційних ГТД з довжиною наплавленого валика до 40 мм [1,2,6]. Подальше освоєння розмірів дефектів, можливих до відновлення способом МПН без проявів схильності до утворення тріщин, пов'язується з усуненням малопластичного стану принаймні для однієї з типових зон зварного з'єднання нікелевого ЖС, перш за все – з боку НМ [3,5].

Перелік посилань

1. Жеманюк П.Д., Петрик І.А., Чигилейчик С.Л. (2015) Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. Автоматическая сварка, №8, С. 43 - 46.
2. Ющенко К.А., Яровицин О.В., Хрущов Г.Д., Петрик І.А., Чигилейчик С.Л. (2022) Дослідження та оптимізація серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням. Космічна наука і технологія, №3(28), С. 3-16. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.01-01>
3. Ющенко К.А., Яровицин О.В., Наконечний О.О., Волосатов І.Р., Фомакін О.О., Хрущов Г.Д. (2020) Розробка технології відновлення сектора соплових лопаток з важкозварюваного нікелевого жароміцного сплаву типу ЖС6 мікроплазмовим порошковим наплавленням. Автоматичне зварювання, №11, С. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2020.11.05>
4. Петрик І.А. Процеси відновлення зварюванням та паянням лопаток газотурбінних двигунів з важкозварюваних сплавів на нікелевій та титановій основі: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси та технології»– Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона –2007. – 24 с.
5. Патент UA 127421, B23K 10/02, B23K9/04, B23K9/23, B23K6/00. Спосіб мікроплазмового порошкового 3D-наплавлення деталей з нікелевих жароміцних сплавів. Опубл. 16.08.2023, Бюл. №33/2023. Винахідники: Ющенко К.А, Яровицин О.В. Наконечний О.О., Хрущов Г.Д., Волосатов І.Р., Черв'яков М.О., Фомакін О.О., Ковальчук С.С.
6. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О., Звягинцева А.В., Волосатов І.Р., Хрущов Г.Д. (2019) Оценка кратковременных механических свойств соединения трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6. Автоматическая сварка, №7, С. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.07>

Секція: МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 539.4:631.356.4

Андрій Бабій, д.т.н., проф.; І. Головецький

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСАХ НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. Нестационарні процеси навантаження вимагають окремих підходів до визначення конструктивних параметрів елементів машин. При проектуванні сільськогосподарської техніки ці процеси ускладнюються впливом середовищ, з якими контактують робочі органи. Проведені дослідження та розв'язані задачі на основі теорії механіки руйнування дозволяють створити надійну машину із заданим ресурсом роботи.

Ключові слова: нестационарні процеси навантаження, механіка руйнування, надійність, ресурс роботи, картоплезбиральна машина, вібраційний леміш, ґрунтове середовище.

Andriy Babii, Ph.D., Prof.; I. Holovetskyi

DETERMINATION OF DESIGN PARAMETERS FOR MACHINE ELEMENTS UNDER NON-STATIONARY LOAD PROCESSES

Abstract. Non-stationary load processes require distinct approaches to determining the design parameters of machine elements. When designing agricultural machinery, these processes are further complicated by the environmental impacts on the working components. The conducted research and problem-solving based on fracture mechanics theory enable the creation of reliable machinery with a specified operational lifespan.

Keywords: non-stationary load processes, fracture mechanics, reliability, operational lifespan, potato harvester, vibrating ploughshare, soil environment.

Розробка нової машини чи її окремого вузла супроводжується багатьма чинниками, які є невизначеними та можуть приймати відповідний діапазон значень. Задача конструктора полягає у віднаходженні оптимальних чи раціональних значень такого елемента, що дозволить машині бути надійною у роботі та забезпечити відповідний ресурс її напручування [1-8].

Ці задачі є особливо актуальними для сільськогосподарського машинобудування, де спостерігаються нестационарні процеси навантаження елементів машин та є вплив середовищ, з якими контактують робочі органи. І тут передумовами до раціонального проектування є розв'язані задачі, що пов'язані з механікою руйнування «найслабших» ланок конструкції.

При проектуванні активного лемеша картоплезбиральної машини виникла необхідність розрахувати ряд елементів, які складають кінематичний ланцюг приводу даного робочого органу. Одним із таких елементів є шатун, що через систему важелів передає зусилля від приводного кривошипа до робочого леза лемеша, яке здійснює вібраційні рухи. Підкопування бульбоносного пласту ґрунту таким способом дозволяє полегшене проникнення різальної кромки лемеша у ґрунт, сприяє утворенню направлено руху підкопаної маси його площиною, інтенсифіковує сепарацію ґрунтових частинок тощо. Шатун, в свою чергу, навантажений знакозмінними зусиллями $P_{\max} = 15$ кН, $P_{\min} = -5$ кН, для якого потрібно підібрати поперечний перетин з розрахунку на витривалість. Для більш критичного підходу до розрахунку закладемо у модель виконаний у стержні шатуна отвір діаметром 5 мм як концентратор

напруження. Матеріалом шатуна буде слугувати профіль з конструкційної вуглецевої звичайної якості сталі Ст3пс з механічними характеристиками: $\sigma_b = 420$ МПа, $\sigma_T = 250$ МПа, $\sigma_{-1} = 200$ МПа.

Тоді залежність для визначення дійсного коефіцієнта концентрації буде мати вигляд

$$k_\sigma = 1 + q_\sigma(\alpha_\sigma - 1), \quad (1)$$

де q_σ – коефіцієнт чутливості матеріалу до концентрації напружень;

α_σ – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень.

Оскільки задача полягає у підборі профілю шатуна, а тому його розміри не відомі по відношенню до прийнятого діаметра отвору, то приймаємо значення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень $\alpha_\sigma = 2$, вважаючи, що отвір порівняно малий з габаритами деталі [9], а коефіцієнт чутливості – $q_\sigma = 0,47$.

Тоді дійсний коефіцієнт концентрації буде становити $k_\sigma = 1,47$.

Коефіцієнт концентрації, що враховує стан поверхні ($\beta = 0,8$) та, задаючись коефіцієнтом масштабного фактора ($\varepsilon = 0,87$), набуде вигляду

$$(k_\sigma)_d = \frac{k_\sigma}{\varepsilon\beta} \quad (2)$$

і буде становити $(k_\sigma)_d = 2,11$.

Зв'язок між коефіцієнтом запасу міцності та описаними параметрами буде наступним [9]

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}A}{(k_\sigma)_d \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} + \psi_\sigma \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}}, \quad (3)$$

де A – площа поперечного перетину шатуна;

$\psi_\sigma = 0$ для сталі Ст3пс.

Тоді шукана площа A при заданому коефіцієнті запасу міцності для таких конструкцій $n_\sigma = 2,2$ буде рівна

$$A = \frac{n_\sigma}{\sigma_{-1}} \left((k_\sigma)_d \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \right). \quad (4)$$

Підставляючи значення у залежність (4), отримаємо необхідне значення площі поперечного перетину профілю для виготовлення шатуна, $A = 2,32 \cdot 10^{-4}$ м².

За допустимими напруженнями при статичному навантаженні такого стержня отримано наступну залежність для визначення мінімальної площі поперечного перетину стержня

$$A_{cm} \geq \left[\frac{P_{\max}}{\sigma_p} \right], \quad (5)$$

де $[\sigma_p]$ – допустиме напруження на розтяг для сталі Ст3пс (при коефіцієнті запасу міцності $n_\sigma = 2,2$), $[\sigma_p] = 114$ МПа.

Тоді значення площі поперечного перетину шатуна $A_{cm} = 1,32 \cdot 10^{-4}$ м².

Тут видно, що значення знайдених площ за двома способами значно відрізняються. Проілюструємо такі зміни площ поперечного перетину профілю шатуна при зміні заданого значення коефіцієнта запасу міцності, рис. 1.

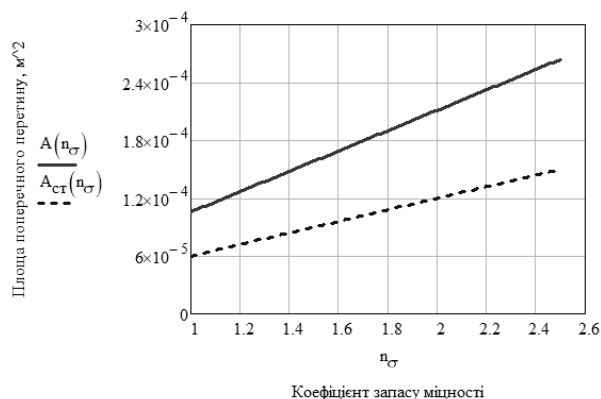


Рисунок 1 – Графічні залежності шуканих площ поперечного перетну шатуна, що знайдені за залежностями (4) – $A(n_\sigma)$ та (5) – $A_{\text{ст}}(n_\sigma)$

Отже, якщо порівняти знайдені значення площ за залежностями (4) і (5) та при коефіцієнті запасу міцності $n_\sigma = 2,2$, то видно, що площа знайдена за статичним розрахунком у 1,758 разів є меншою у порівнянні з площею за розрахунком, який враховує змінність навантаження. Тому для вибору профілю шатуна за основу приймемо площу $A = 2,32 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Серед сортаменту профілю найбільш близьким є перетин профільної труби 25 мм \times 25 мм \times 3 мм, для якої площа поперечного перетину складає $A = 2,6 \cdot 10^{-4}$. Саме такий профіль варто рекомендувати для виготовлення шатуна в системі приводу активного лемеша картоплекопача.

Перелік посилань

1. A. Nanka, I. Morozov, V. Morozov, M. Krekot, A. Poliakov, I. Kiralhazi, M. Lohvynenko, K. Sharai, A. Babiy, M. Stashkiv. Improving the efficiency of a sowing technology based on the improved structural parameters for colters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 4. No. 1 (100) (2019) Engineering Technological Systems. P. 33 – 45.
2. Andreikiv O. E., Lysyk A.R., Shtayura N. S, and Babii A.V. Evaluation of the Residual Service Life of Thin-Walled Structural Elements with Short Corrosion-Fatigue Cracks. Materials Science. Vol. 53, No. 4, January, 2018. P. 514–521.
3. Andreikiv O.E., Babii A.V. & Dolinska, I.Ya. Influence of the Working Media and Maneuvering Loading Mode on the Service Life of Spraying Booms of Field Sprinklers. Materials Science. Vol. 56. December, 2020. P.166–173.
4. Andreykiv O., Babii A., Dolinska I., Yadzhak N., Babii M. Residual lifetime prediction of field sprayer booms under the action of manoeuvre loading and corrosive environment. Procedia Structural Integrity. Volume 36, 2022, P. 36-42.
5. Rybak T.I., Babii A.V., Bortnyk I.M., Tsion G.B., and Konovalenko S.I. Evaluation of the Service Life of the Frames of Sections of Boom Field Sprayers. Materials Science. 2019. 55, P. 374–380.
6. Бабій А.В., Головецький І.В., Герасимович П.В. Проблеми та перспективи розвитку картоплярства в Україні. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“. Тернопіль 24-25 листопада 2021 року. ФОП Паляниця ВА. Т.1. С. 25-26..
7. Бабій А.В., Головецький І.В., Гладь Ю.Б. Дослідження кінематичних параметрів вібраційного лемеша картоплекопача з використанням комп'ютерної програми. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин", 2023. Вип. 53. С.227-236.
8. Головецький І.В., Бабій А.В. Аналіз конструктивних особливостей найпростіших картоплекопачів. «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики»: матеріали Міжнар. наук.-практ. конфі. 29-30 вересня 2022. Тернопіль: С.49-50.
9. Писаренко С.Г. Опір матеріалів. К. : Вища школа. Головне видавн., 1986. 775 с.

УДК 631.17

Віктор Барановський¹, д.т.н., проф.; Марія Паньків¹, к.т.н., доц.; Віталій Паньків¹, к.т.н., доц.; Н. Дубчак², к.т.н., доц.; Юлія Паньків, Ph.D.

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

²Відокремлений підрозділ НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут», Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ПРОДУКТІВ

Анотація. Продукти виробництва, наприклад цукрові та кормові буряки, коренеплоди цикорію, морква, картопля, топінамбур є важливою технічною культурою агропромислової та переробної галузі України. Підвищення якості збирання та переробки продуктів в процесі виробництва продукції, зберігання та транспортування – актуальна проблема, яка має важливе державне значення. В статті наведено методологічні принципи прогнозування пошкодження або руйнування продукту в процесі його виробництва на основі теоретичного аналізу одиничних подій, або потоку подій за певний період часу.

Ключові слова: продукт, фізична дія, пошкодження, вірогідність, технологічна лінія, подія.

Viktor Baranovsky, Ph.D., Prof.; Maria Pankiv, Ph.D., Assoc. Prof.; Vitaliy Pankiv, Ph.D., Assoc. Prof.; N. Dubchak, Ph.D., Assoc. Prof.; Julia Pankiv, Ph.D.

MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES DESTRUCTION OF ROOT

Abstract. Production products, for example, sugar and fodder beets, chicory root crops, carrots, potatoes, Jerusalem artichoke are an important technical culture of the agro-industrial and processing industry of Ukraine. Improving the quality of collection and processing of products in the process of production, storage and transportation is an urgent problem of important national importance. The article provides methodological principles for forecasting damage or destruction of a product during its production based on a theoretical analysis of single events or a stream of events over a certain period of time.

Keywords: product, physical action, damage, probability, technological line, event.

Механізовані процеси виробництва, обробки, переробки та транспортування, де відбувається фізична дія (вплив) на продукт робочими органами знарядь праці, поряд з корисним очікуваним результатом призводять до погіршення якості отриманого продукту [1].

З методологічної позиції, погіршення якості продукту є наслідком його пошкодження або руйнування, які відбуваються в результаті поточкових процесів різної фізичної природи – механічну обробку, нагрівання та охолодження, хімічний вплив тощо [2]. В цьому контексті, розглянемо аналіз поточкових механічних процесів, в яких робочі органи машини завдають продукту механічні пошкодження або руйнування, що значно знижує якість сировини та продукту переробки з неї.

Припустимо, що цукрові та кормові буряки, коренеплоди цикорію, морква, картопля, топінамбур (в подальшому продукт) обробки на технологічній лінії має постійну міцність P , або зусилля, яке необхідне для пошкодження продукту.

Розглянемо n точок (рис. 1), де продукт піддається силовій взаємодії F зі сторони робочих органів машини, при цьому щільність ймовірності якого дорівнює $w_i(F)$, $i = 1, 2, \dots, n$.

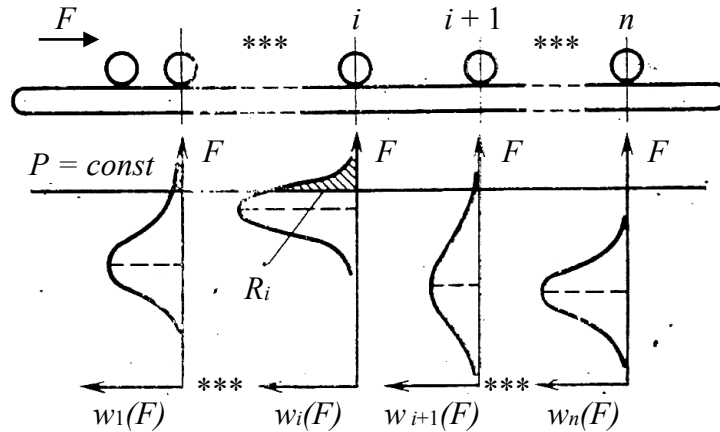


Рисунок 1. Щільність $w_i(F)$ вірогідності зовнішнього впливу на продукт в різних точках технологічної лінії

Вірогідність пошкодження R_i об'єкту (робочого органу) на i -й ділянці технологічної лінії визначається

$$R_i = \int_p^{\infty} w_i(F) dF. \quad (1)$$

Тоді вірогідність пошкодження продукту після проходження i -х ділянок може бути визначено згідно теореми про повторення експериментів [3] за формулою

$$R_i = \left[\frac{d \prod_{i=1}^n (q_i + R_i z)}{dz} \right]_{z=0}, \quad (2)$$

де z – довільний параметр; $q_i = 1 - R_i$.

Припустимо, що міцність P продукту в i -й точці технологічної лінії є також випадкова величина, яка має щільність ймовірності $w_i(P)$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Тоді наслідком взаємодії продукту з робочим органом машини в цій точці можна отримати шляхом порівняння двох випадкових величин F_i і P_i .

При цьому, за умови $F_i \geq P_i$, будемо мати більші або менші* пошкодження продукту. Верифікацію в цьому випадку поняття вірогідності більші або менші* пошкодження продукту проведемо наступним чином.

Припустимо, що продукт проходить m раз через i -у точку на технологічній лінії обробки продукту, при цьому кожний раз проводимо вимірювання випадкових величин F_{ik} та R_{ik} , де $k = 1, 2, \dots, s$.

У подальшому нанесемо результати таких вимірів на площину Π (рис. 2) з координатними осями OF та OP , позначивши такі виміри точками M_{ik} .

Ордината кожної точки M_{ik} буде відповідати відповідній силі F_{ik} зовнішнього впливу на продукт, міцність якого дорівнює P_{ik} на i -й ділянці технологічної лінії його обробки.

При цьому, умова $F_i \geq P_i$, або пошкодження продукту обробки виконується для всіх точок M_{ik} , які розташовуються вище лінії $F = P$, а також для тих точок M_{ik} , які безпосередньо належать цій лінії.

Оцінка вірогідності R_i^* настання такої події буде дорівнювати відношенню числа точок в півплощині A до загального об'єму проведених вимірів випадкових величин

$$R_i^* = N_A / N_{(A+B)}. \quad (3)$$

Для ефективності оцінки вірогідності R_i^* необхідна умова

$$R_i^* \rightarrow R_i \mid (N_{A+B}) \rightarrow \infty, \quad (4)$$

що утруднює застосування формули (3) в практичних розрахунках.

Тоді, розглянемо точку M_{ik} як двомірну випадкову величину з компонентами F_{ik} та P_{ik} , при цьому кожна компонента має щільність вірогідності $w_i(F)$ та $w_i(P)$ відповідно (рис. 2).

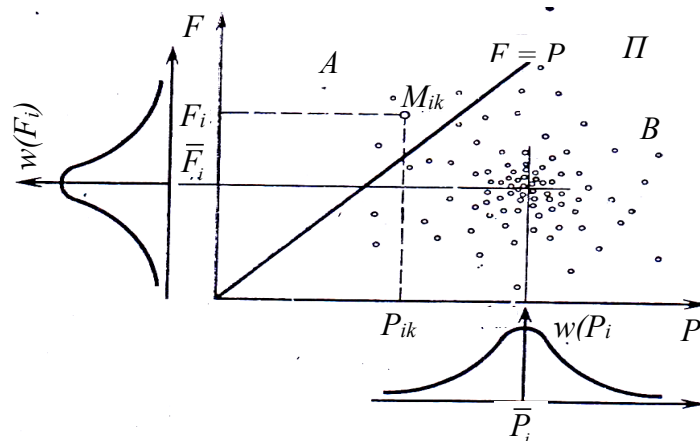


Рисунок 2. Щільність $w_i(F)$ вірогідності зовнішнього впливу на продукт в різних ділянках технологічної лінії

Двомірну щільність вірогідності в випадку нормального розподілення являє собою пагорбові поверхню (рис. 3).

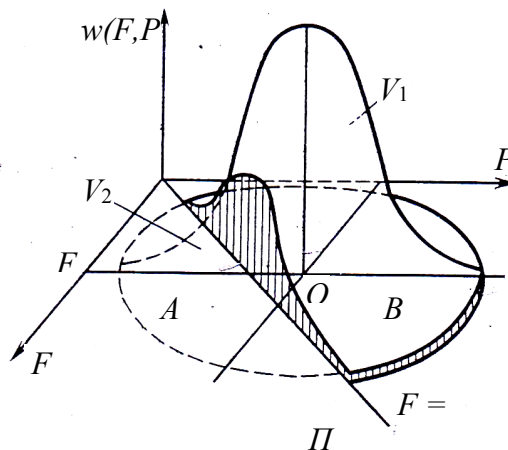


Рисунок 3. Схема до визначення вірогідності P пошкодження продукту методом обчислення об'єму

Тоді, згідно інтегрального виразу (1) будемо мати, при цьому точки M_{ik} складають повну групу подій

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w_i(F, P) dF dP = 1. \quad (5)$$

Виконаємо січення двомірної щільності $w_i(F, P)$ площиною, яка проходить через лінію $F = P$, яка перпендикулярна площині Π . Відсічений таким чином об'єм, який знаходиться між поверхнею $F_i = P_i$ та площиною Π буде дорівнювати вірогідності R_i та може бути обчислений за інтегральним виразом [4]

$$R_i = V_2 = \int_0^{\infty} \int_0^F w_i(F, P) dF dP, \quad (6)$$

або

$$R_i = 1 - V_1 = 1 - \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} w_i(F, P) dF dP, \quad (7)$$

де V_1 і V_2 ш – об'єми, які показано на рис. 3.

Таким чином, ймовірність пошкодження продукту обробки на i -й ділянці технологічної лінії буде залежати:

- від вигляду двомірної щільності вірогідності $w_i(F, P)$;
- від визначальних параметрів двомірної щільності вірогідності $w_i(F, P)$.

До основних визначальних параметрів двомірної щільності вірогідності $w_i(F, P)$ можна віднести:

- положення проекції точки O на площині Π ;
- дисперсія σ_F^2 та σ_P^2 ;
- коефіцієнт кореляції K_{FP} взаємозв'язку між двома випадковими величинами F та P .

Щільність вірогідності $w_i(F)$ та вірогідності $w_i(P)$ в загальному випадку можуть підкорятися різним законам випадкового розподілення.

В кожній конкретній ситуації вірогідність $w_i(F, P)$ може мати свій конкретний певний вигляд.

Таким чином, запропонована методологія або принцип оцінки дозволяє визначати показники якості обробки продуктів на всіх етапах її проходження на технологічних лініях машин.

Наприклад, визначити пошкодження коренеплодів або картоплі в процесі їх механізованого збирання корене- або бульбозбиральними машинами, в процесі доробки зібраної продукції на технологічних лініях підготовки сировини для переробки тощо на основі запровадження статистичних досліджень показників або компонентів F та P .

Перелік посилань

1. Войтюк Д. Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник; за ред. Д. Г. Войтюка / Д. Г. Войтюк, В. М. Барановський, В. М. Булгаков та ін. К.: Вища освіта, 2005. 464 с.
2. Baranovsky V., Truhanska O. Pankiv M., Bandura V. Research of a contact impact of a root crop with a screw auger. Research in Agricultural Engineering, 2020. Vol. 66. No 1. P. 33–42.
3. Жлуктенко В.І., Наконечний С.І. Теорія ймовірностей і математична статистика: у 2-х ч. Ч. 1. Теорія ймовірностей. К.: КНЕУ, 2000. 304 с.
4. Швачич Г.Г., Коноваленков В.С., Заборова Т.М. Вища математика. Розділ «Подвійні та криволінійні інтеграли»: Навч. посібник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2011. 36 с.

УДК 629.7.036.34

Борис Карпінос¹, д.т.н., проф.; Андрій Бологін², к.т.н., с.н.с.; Петро Ковель², к.т.н., с.н.с.; Леонід Нагорний², д.т.н., проф.

¹ Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

² Державний науково-дослідний інститут авіації, Україна

ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СИЛОВОГО ЕЛЕМЕНТУ ГЕЛІКОПТЕРА З УРАХУВАННЯМ РЕАЛЬНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація. Виконано комп'ютерне моделювання напруженого стану важеля автомату і перекосу лопаті несучого гвинта транспортного гелікоптера з урахуванням показників навантаження за час польоту. Визначено значення напружень в небезпечних зонах, їх розміри і розташування. Аналіз напруженого стану дозволив підвищити коректність та достовірність прийняття рішень стосовно продовження ресурсу силового елемента гелікоптера та конкретизувати вимоги допуску до подальшої його експлуатації.

Ключові слова: напружений стан, силовий елемент гелікоптера, автомат перекосу, комп'ютерне моделювання, міцність, ресурс, продовження показників, допуск до експлуатації.

Boris Karpinos, Ph.D., Prof.; Andrii Bolohin, Ph.D.; Petro Kovel, Ph.D.; Leonid Nagirniy, Ph.D., Prof.

PECULIARITIES OF THE STRESSED STATE OF THE HELICOPTER POWER ELEMENT UNDER EXTREME OPERATING CONDITIONS

Abstract. A computer simulation of the stress state of the machine lever and the skew of the carrier blade of the transport helicopter was carried out, taking into account the load indicators during the flight. The values of stresses in dangerous zones, their sizes and location are determined. The analysis of the stressed state made it possible to increase the correctness and reliability of decision-making regarding the continuation of the indicators of the resource of the helicopter's power element and specify the requirements for admission to its further operation.

Keywords: stressed state, helicopter power element, skewing machine, computer modeling, strength, service life, extension of performance, approval for operation.

Забезпечення статичної та циклічної міцності силових елементів гелікоптеру за штатних і позаштатних умов експлуатації була і залишається нагальною проблемою його функціонування та несівної здатності. Розв'язання проблеми починається ще на стадії вибору матеріалу, на етапах проектування, розробки і створення конструкції, нормування напружень та коефіцієнтів запасу міцності і довговічності, впровадженні перспективних конструктивно-технологічних рішень виготовлення елементів. Її зміст і мета корегуються на основі регламентних оглядів і спостережень і особливо загострюються у час, коли напруження наближається до призначеного ресурсу, або у випадках експлуатації за позаштатних умов.

Виконано чисельне дослідження напруженого стану тяги повороту та важеля лопаті несучого гвинта – найбільше напружених ланок силового механізму (рис.1).

Потреба такого дослідження виникла у зв'язку з руйнуванням декількох силових елементів, що мало катастрофічні наслідки. Комп'ютерне моделювання напруженого стану передбачало виконання традиційних кроків кінцеве-елементного розв'язання задач механіки твердого тіла - створення моделей об'єктів дослідження, імпорту характеристик матеріалу, вибору типу задачі деформування, форми та розмірів кінцевих елементів, формулювання граничних умов. Деталі виготовлялися з сталі

40X2HMA. Використовувався сучасний CAD пакет SolidWorks.

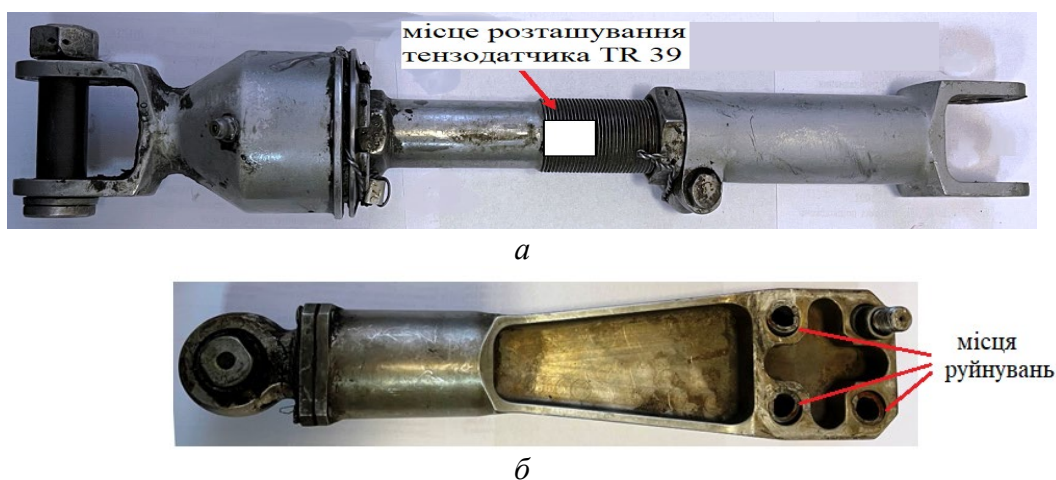


Рисунок 1. – Видяг тяги повороту *a*) і важеля *б*)

Формулювання граничних умов і оцінка їх коректності здійснювалося на основі попереднього експериментального дослідження локального деформування тяги. Тензометричні дослідження виконано в умовах штатного польоту. Результати їх у вигляді кінетики напружень наведено на рис.2.

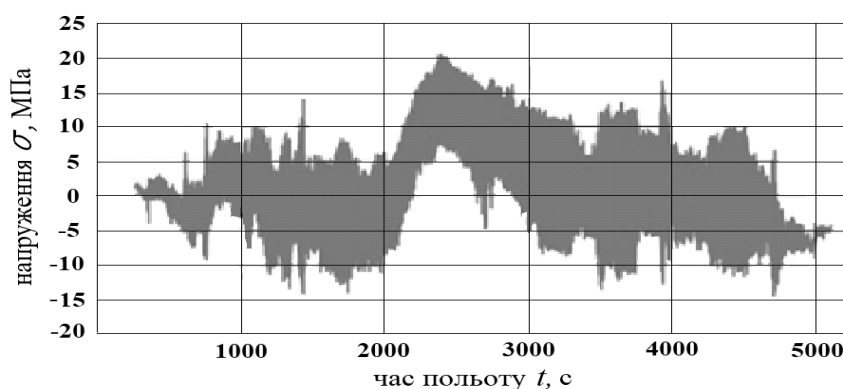


Рисунок 2. – Зміна напружень в тязі повороту за час польоту гелікоптера

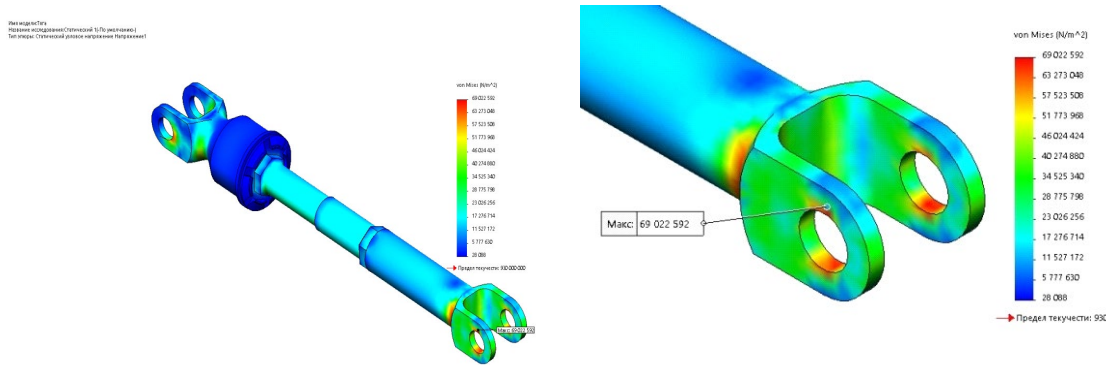
Напруження з частотою обертання несучого гвинта асиметрично змінюються у часі. Їх значення залежать від умов польоту – швидкості, висоти, фігур пілотування. Максимальне за час польоту значення напружень $\sigma = -12$ МПа прийнято контрольним при визначенні граничних умов навантаження тяги.

Напружений стан тяги характеризується суттєвою неоднорідністю, особливо в зонах концентрації напружень (рис.3). Такими зонами є перехід верхньої виделки тяги в стержень та отвори для встановлення пальців, де зафіксовано максимальні значення інтенсивності напружень, $\sigma_i = 69$ МПа. Для тяги коефіцієнти запасу статичної міцності - 13, багатоциклової втоми - 3,8.

Результати чисельного експерименту напруженого стану важеля повороту лопаті подано на рис. 4.

Напружений стан важеля, як і стан тяги характеризується неоднорідністю, наявністю місць концентрації напружень. Небезпечні зони важеля, в яких напруження максимальні, спостерігаються біля його кріплення до корпусу осевого шарніру. В цих зонах за час польоту значення інтенсивності напружень $\sigma_i = 257$ МПа, на ребрах жорсткості важеля $\sigma_i = 88$ МПа. Відповідно коефіцієнти запасу статичної міцності - 3,8;

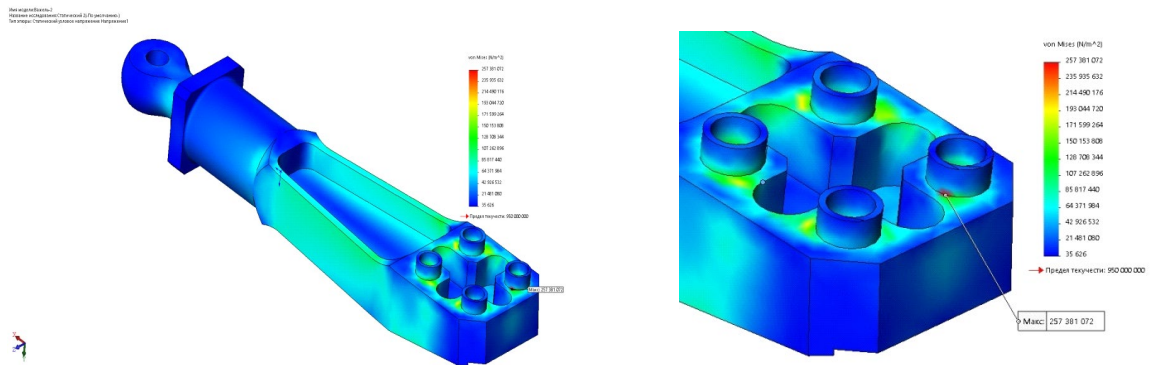
1,8, багатоциклової втоми - 1,2.



a

б

Рисунок 3. – Загальний розподіл інтенсивності напружень σ_i в тязі втулки *a*) та локалізація напружень в місці її кріплення до важеля повороту лопаті *б*)



a

б

Рисунок 4. – Загальний розподіл інтенсивності напружень σ_i у важелі повороту *a*) та локалізація напружень в місці його кріплення до осевого шарніра *б*)

Таким чином, результати комп'ютерного моделювання засвідчили суттєву напруженість силових елементів гелікоптера і обґрунтували жорсткі умови до контролю їх технічного стану, прийняття рішень стосовно продовження ресурсу та подальшої експлуатації.

УДК 629.7.023:621.454.3

Костянтин Буйських, к.т.н., с.н.с; Леонід Кравчук, д.т.н., проф.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНЬОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Анотація. Реалізована методика дослідження впливу попереднього експлуатаційного навантаження елементів конструкцій оболонкового типу на характеристики міцності полімерного композиційного матеріалу, яка полягала в короткочасному розтягуванні кільцевих зразків до руйнування. Встановлено, що із розглянутих видів попереднього експлуатаційного навантаження найбільший вплив на зменшення залишкових характеристик міцності полімерного композиційного матеріалу має нагрівання кільцевих зразків до 300 °С з витримкою 30 хвилин.

Ключові слова: попереднє експлуатаційне навантаження, характеристики міцності, полімерний композиційний матеріал.

Kostiantyn Buiskykh, Ph.D.; Leonid Kravchuk, Ph.D., Prof.

STUDY OF THE INFLUENCE OF PRELIMINARY OPERATIONAL LOADING OF ELEMENTS OF STRUCTURES ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE COMPOSITE MATERIAL

Abstract. The method of researching the impact of the preliminary operational load of elements of shell-type structures on the strength characteristics of the polymer composite material was implemented, which consisted in the short-term stretching of ring samples until failure. It was established that, of the considered types of preliminary operational load, heating of ring samples up to 300 °C with a holding time of 30 minutes has the greatest effect on reducing the residual strength characteristics of the polymer composite material.

Keywords: Preliminary operating load, strength characteristics, polymer composite material.

Бурхливий розвиток із створення і впровадження композиційних матеріалів різноманітних класів стимулював розробників техніки до того, що за останні 50 років відсоток застосування цих матеріалів в аероракетнокосмічній галузі збільшився з 2..3 до 50...55. Ефективність робіт, пов'язаних зі створенням аероракетнокосмічної техніки визначається на даному етапі рівнем дослідницьких робіт, ефективністю забезпечення практичної можливості моделювання експлуатаційних режимів з екстремальними термосиловими параметрами із забезпеченням надійної інформації про працездатність конструкції в складних умовах термомеханічного навантаження. Тому метою даної роботи являється дослідження впливу попереднього експлуатаційного навантаження елементів конструкцій відповідального обладнання на залишкові характеристики міцності полімерного композиційного матеріалу.

Для дослідження впливу на характеристики міцності полімерного композиційного матеріалу попереднього експлуатаційного навантаження циліндричних моделей [1, 2] реалізована методика випробувань кільцевих зразків згідно з патентом України [3]. Реалізована в роботі методика полягає в короткочасному розтягуванні до руйнування кільцевих зразків із односпрямованого композиційного полімерного матеріалу армованого вуглецевими і іншими високомодульними волокнами. Кільцеві зразки шириною 10 мм виготовлялися способом нарізання із циліндричної тонкостінної оболонки. На рис. 1 показана схема навантаження циліндричної оболонки (а) та кільцевих зразків (б, в).

Для всебічного аналізу характеру руйнування кільцевих зразків в процесі випробувань на розтяг додатково було досліджено напружено-деформований стан цього конструктивного елемента.

Для дослідження впливу на характеристики міцності полімерного композиційного матеріалу попереднього експлуатаційного навантаження елементу конструкції було розв'язано 4 задачі. Проаналізовано, як у порівнянні з вихідним станом вплинуло на характеристики міцності полімерного композиту:

1) попереднє короткочасне навантаження циліндричної оболонки зусиллями стиску з наступним руйнуванням при розтягу;

2) попереднє короткочасне (1-2 хв) нагрівання циліндричної оболонки до 300 °С з одночасним механічним навантаженням;

3) попереднє нагрівання кільцевих зразків до значень температур 200 і 300 °С з витримкою 30 хв за кожної температури;

4) попереднє циклічне навантаження кільцевих зразків 100 циклів з зусиллям 20 і 40 КН для кожної партії зразків, що становило приблизно 30 і 60 % від межі міцності цього матеріалу.

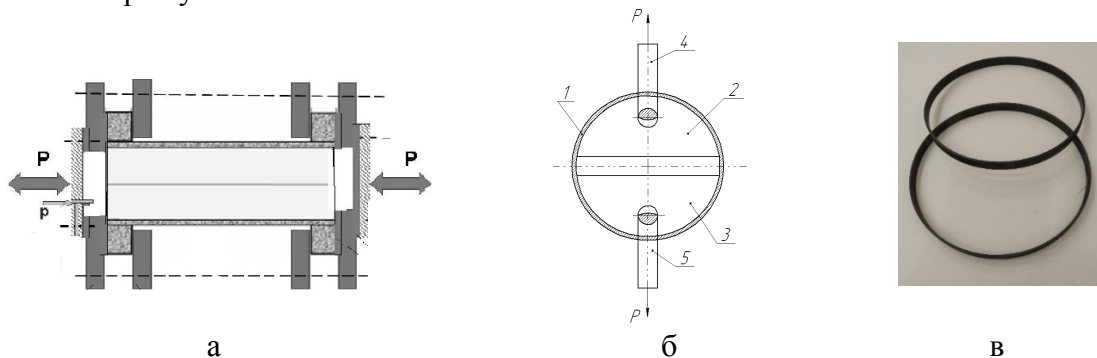


Рис. 1. Схема навантаження циліндричної оболонки (а) та кільцевих зразків (б, в): 1 – зразок-кільце; 2 – верхній напівдиск; 3 – нижній напівдиск; 4 – верхній пристрій для розтягування; 5 – нижній пристрій для розтягування; P – напрямок прикладеного навантаження

Для отримання характеристик міцності композиційного матеріалу у вихідному стані випробували кільцеві зразки на розтяг за нормальної температури. Середнє значення напруження руйнування цього матеріалу за нормальної температури складає 2512 МПа.

Аналіз результатів дослідження впливу різного виду попереднього навантаження на залишкові механічні характеристики композиційного матеріалу дозволяє стверджувати наступне. У випадку попереднього навантаження за типом № 1 середні значення напруження руйнування співпадають і різниця з вихідним станом складає менше 1%.

Аналіз результатів випробування зразків за попереднім навантаженням за типом № 2 свідчить, що середнє значення напруження руйнування складало 2187 МПа, що порівняно з границею міцності для матеріалу у вихідному стані менше на 14 %.

Узагальнення результатів дослідження впливу попереднього нагрівання кільцевих зразків за типом № 3 свідчить, що попереднє нагрівання до 200 °С знижує границю міцності на розтяг цього композиту на 14% порівняно з вихідними даними, а нагрівання до 300 °С знижує границю міцності на 21%.

Але якщо усереднити дані на кожному з рівнів навантаження в циклі то відхилення від вихідних даних складає на більше 2%. Тобто можна стверджувати, що задане

Попереднє циклічне навантаження практично не впливає на залишкову границю міцності при розтягу, про що свідчить зменшення границі міцності від вихідних даних не більше ніж на 2%.

Таким чином можна стверджувати, що із розглянутих видів попереднього експлуатаційного навантаження найбільший вплив на залишкові характеристики міцності полімерного композиційного матеріалу має нагрівання кільцевих зразків до 300 °С з витримкою 30 хвилин, що зменшує границю міцності на 21%.

На рис. 2 показано діаграми деформування полімерного композиційного матеріалу у вихідному стані і за нагрівання до 300 °С.

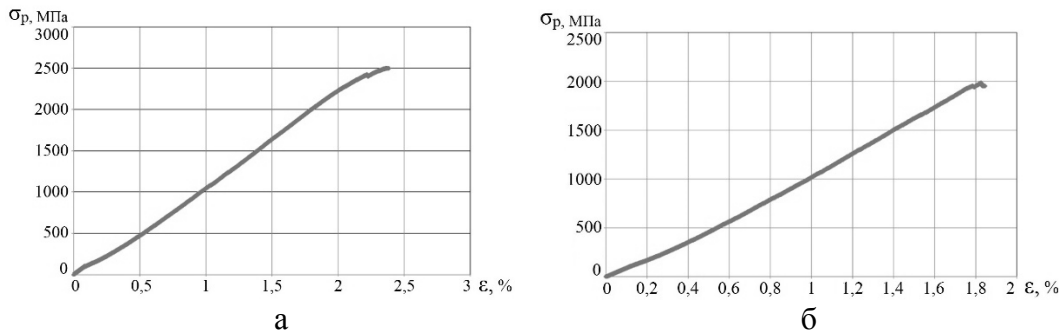


Рис. 2. Діаграми деформування полімерного композиційного матеріалу у вихідному стані (а) і за нагрівання до 300 °С (б)

Перелік посилань

1. І.І. Дерев'янка, О.А. Самусенко, О.В. Дроздов та ін. «Експериментальна інформаційна технологія дослідження конструкцій із вуглепластику на герметичність та міцність внутрішнім тиском», Пробл. міцності, № 3, 49-58 (2022).

2. Л.В. Кравчук, К.П. Буйських, І.І. Дерев'янка, О.М. Потапов «Дослідження несучої здатності елементів оболонкових конструкцій ракетної техніки із композиційних матеріалів», Пробл. міцності, № 4, 65-73 (2022).

3. Патент України на корисну модель № 139583: Спосіб випробування кільцеподібних елементів конструкцій з композиційних матеріалів на міцність при розтягуванні при високих температурах. Автори: Дзюба В.С., Кравчук Л.В., Буйських К.П., Токарський В.А., Мудрик С.П. Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей 10.01.2020 UA 139583 U.

УДК 539.432

Олег Герасимчук, д.т.н., с.н.с.; Олег Кононученко, к.т.н., с.досл.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ОЦІНКА ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ДО ІНІЦІЮВАННЯ ТРІЩИНИ ВІД КОНЦЕНТРАТОРА НАПРУЖЕНЬ У СТАЛЕВИХ ЗРАЗКАХ ЗА ЗМІННОГО РОЗМАХУ НАПРУЖЕНЬ ЦИКЛУ

Анотація. Запропоновано модель для теоретичної (не експериментальної) оцінки втомної довговічності до моменту ініціювання втомної тріщини у зразках із концентратором напружень за змінного (ступінчастого) прикладеного розмаху напружень циклу. Модель враховує нелінійність накопичення втомного пошкодження. Історія зміни розмаху напружень циклу враховується в моделі при переході від більшого розмаху до меншого, використовуючи вплив розміру локальної пластичної зони від вершини концентратора на величину прикладеного локального максимального напруження циклу. Вихідними даними для теоретичної оцінки, окрім параметрів навантаження і геометричних розмірів поперечного перерізу зразка та концентратора, є характеристики статичної міцності та мікроструктури вихідного матеріалу.

Ключові слова: ступінчасте циклічне навантаження; стадія зародження втомної тріщини; втомна довговічність; концентратор напружень; сталь 45.

Oleh Herasymchuk, Ph.D.; Oleh Kononuchenko, Ph.D.

ESTIMATION OF FATIGUE LIFE UNTIL CRACK INITIATION FROM A NOTCH IN STEEL SPECIMENS AT VARIABLE CYCLE STRESS RANGE

Abstract. A model is proposed for theoretical (non-experimental) evaluation of fatigue life until crack initiation from a notch in metallic samples at variable applied cycle stress range, using only the characteristics of monotonic strength and microstructure of the initial material.

Key words: step cyclic load; fatigue crack nucleation stage; fatigue life; notch; steel 0.45%С.

Вступ. Після того, як було встановлено, що правило Пальмгрена-Майнера лінійного підсумовування втомного пошкодження не завжди виконується для різних режимів зміни прикладеного розмаху напружень циклу, багатьма дослідниками було запропоновано безліч схем для розрахунку кількості циклів до руйнування зразків за змінних режимів циклічного навантаження [1]. Всі сучасні моделі втомної довговічності за змінного розмаху напружень циклу використовують результати випробувань на втому і втомну тріщиностійкість за постійного розмаху. З аналізу літературних джерел щодо використання у дослідженнях різних спектрів навантаження, можна зробити висновок, що для розробки і перевірки нової методики оцінки втомного пошкодження немає необхідності застосовувати складні режими циклічного навантаження, які характерні і стандартизовані для окремих елементів конструкцій. Достатньо дослідити та оцінити пошкодження матеріалів за двоступінчастих циклічних навантаженнях на рівнях: високі – низькі (*H-L – high-low*) та низькі – високі (*L-H – low-high*) з варіюванням різниці рівнів і кількості циклів навантаження на низькому та високому рівнях [2].

Метою роботи є розроблення моделі для оцінки кількості циклів одновісного навантаження металевих зразків до моменту ініціювання втомної тріщини від концентратора напружень за ступінчастих режимів зміни прикладеного розмаху напружень циклу, враховуючи при цьому кінетику накопичення пошкоджень та історію зміни розмаху напружень і не використовуючи експериментально встановлених втомних даних для даного матеріалу.

Опис моделі. Степеневе рівняння для розрахунку втомного пошкодження D_i на стадії зародження тріщини ($0 \leq D_i \leq 1$), яке відображає кінетику накопичення цього пошкодження за *постійного* прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma_i$ пропонується у наступному вигляді:

$$D_i = (n / N_{in,i})^{m_D}, \quad (1)$$

n – кількість циклів навантаження; $N_{in,i}$ – кількість циклів навантаження до появи тріщини за прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma_i$:

$$N_{in,i} = \left(\frac{\beta}{\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_{R,e}} \right)^{m_{in} - 1}; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{40EM}{\xi(1+\nu)\sqrt{\pi(1-\nu)}}; \quad (3)$$

$$m_D = 1 / (1 + m_{in} / 2). \quad (4)$$

$$m_{in} = 3 \frac{\lg(E\sqrt{b}) - \lg K_F}{\lg \Delta K_{th,in} - \lg K_F}, \quad (5)$$

$$\lg K_F = \frac{1}{3} \left[3 \lg(E\sqrt{b}) + \lg(10^{-5} / v_0) \right], \quad (6)$$

де K_F – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) під час руйнування на рівні швидкості росту тріщини $dl/dN = 10^{-5}$ м/цикл; v_0 – мінімальна швидкість тріщини, яка дорівнює одній міжатомній відстані b у напрямку вектора Бюргерса \vec{b} за цикл; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; M – фактор Тейлора; ξ – критична гострота інтрузії, відношення її глибини до радіусу вістря, характеристика матеріалу, яка розраховується залежно від розміру зерна d [3]; $\Delta\sigma_{R,e}$ – *нижня* межа границі витривалості гладких зразків у термінах розмаху напружень циклу за асиметрії R , мінімальний розмах напружень, необхідний для ініціювання тріщини, характеристика матеріалу, яка розраховується залежно від розміру зерна d [3]; m_{in} – показник степеня у рівнянні початкової швидкості росту шойно ініційованої тріщини:

$$dl/dN = v_0 (\Delta K_i / \Delta K_{th,in})^{m_{in}}, \quad (7)$$

ΔK_i – прикладений розмах КІН, $\Delta K_i = f(\Delta\sigma_i, l)$; l – лінійний розмір тріщини; $\Delta K_{th,in}$ – внутрішній пороговий розмах КІН, оцінюється за формулою [4]:

$$\Delta K_{th,in} = \frac{\sqrt{12}M}{8\sqrt{\pi}(1+\nu)} \sqrt{\frac{|\vec{b}|}{h}} E\sqrt{b}; \quad (8)$$

h – відстань між сусідніми паралельними площинами ковзання у кристалічній ґратці; b – усереднена величина вектора Бюргерса \vec{b} для крайових і гвинтових дислокацій, $b = |\vec{b}|(2-\nu)/2$;

За наявності тупого концентратора напружень з радіусом вершини ρ у рівнянні (2) використовується прикладений розмах локальних напружень циклу, тобто $\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_{loc,i} = \sigma_{max,i}^{loc}(1-R)$, де $\sigma_{max,i}^{loc}$ розраховується наступним чином [3]:

$$\sigma_{max,i}^{loc} = K_t \sigma_{max,i}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5l_{c,R,max,i} / \rho}, \quad (9)$$

де $l_{c,R,\max,i}$ – критична відстань від вершини концентратора, на якій визначається $\sigma_{\max,i}^{loc}$ з розподілу пружних локальних напружень за $\sigma_{\max,i}^{nom}$:

$$l_{c,R,\max,i} = l_{c,R} \left(\frac{K_t \sigma_{\max,i}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5l_{c,R} / \rho}}{\sigma_{\max,R,e}} \right)^{(m_{in}-1)m_D}; \quad (10)$$

$l_{c,R}$ – критична відстань для додатних асиметрій циклу ($1 > R \geq 0$) за $\sigma_{\max,i}^{loc} = \sigma_{\max,R}$:

$$l_{c,R} = l_{c,-1} [2(1-R)]^{1/(m_{in}-1)}, \quad (11)$$

$$l_{c,-1} = E^2 b / \sigma_{-1}^2; \quad (12)$$

σ_{-1} – границя витривалості гладких зразків за симетричного циклу; K_t – теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, $K_t = \sigma_y(x=0) / \sigma_{nom}$; $\sigma_y(x)$ – розподіл пружних локальних напружень від вершини тупого концентратора, $\sigma_y(x) = \sigma_{nom} \cdot K_t / \sqrt{1 + 4,5x / \rho}$; σ_{nom} – номінальне напруження; $\sigma_{\max,i}^{nom}$ – номінальне максимальне напруження циклу.

У зразках із концентратором після переходу від більшого розмаху локальних напружень до меншого ($H-L$) розмір критичної відстані залишається той самий, що сформувався за більшого розмаху, тобто $l_{c,R,\max,H}$. Отже, у цьому випадку під час розрахунку пошкодження на нижчому ступені L локальне напруження $\sigma_{\max,L(H)}^{loc}$ слід оцінювати, використовуючи формулу (11), наступним чином:

$$\sigma_{\max,L(H)}^{loc} = K_t \sigma_{\max,L}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5l_{c,R,\max,H} / \rho}, \quad (13)$$

Тобто розмах локальних напружень на ступені L , розрахований за формулою (13), буде меншим, ніж розрахований за формулою (9) для однакового розмаху номінальних напружень, оскільки $l_{c,R,\max,H} > l_{c,R,\max,L}$. При цьому номінальне максимальне напруження циклу на ступені L не змінюється. Якщо послідовність ступенів $H-L$ або $L-H$ періодично повторюється, то критична відстань $l_{c,R,\max,H}$ формується під час першої появи ступеня H і залишається такого ж розміру до завершення стадії 1. Припускається, що у гладких зразках за одновісного розтягу-стиску або розтягу-розтягу цей ефект відсутній, оскільки за будь-якої критичної відстані розмах локальних напружень дорівнює розмаху номінальних напружень. Натомість у гладких зразках, які знаходяться в умовах неоднорідного напруженого стану (циклічний згин, циклічне кручення), вказаний ефект послідовності $H-L$ також буде відбуватись.

Оскільки рівняння пошкодження (1) застосовується з єдиним показником степеня m_D для різних рівнів $\Delta\sigma_i$, то внаслідок подібності процесу його накопичення, для оцінки кількості циклів до ініціювання тріщини \tilde{N}_{in} за змінного розмаху напружень можна використовувати лінійне правило підсумовування пошкоджень у вигляді:

$$\sum_i (n_i / N_{in,i}) = 1, \quad (14)$$

де n_i – кількість циклів на кожному ступені. Тоді

$$\tilde{N}_{in} = \sum_i n_i. \quad (15)$$

На рис. 1,а наведено схему ступінчастого циклічного навантаження зразків за режимами $H-L$ і $L-H$, а на рис. 1,б – порівняння розрахованої \tilde{N}_{in}^{calc} та визначеної експериментально $\tilde{N}_{in,0}^{exp}$ кількості циклів до ініціювання тріщини для випробуваних зразків за різних режимів ступінчастої зміни розмаху напружень з варіюванням n_i та σ_{max} . У розрахунках було використано наступні вихідні дані для зразків зі сталі 45 із глухим отвором [3]: $\nu = 0,3$; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\sigma_Y = \sigma_{0,2} = 468$ МПа; $|\bar{b}| = 2,48 \cdot 10^{-10}$ м, отже $b = |\bar{b}|(2 - \nu)/2 = 2,108 \cdot 10^{-10}$ м; $h = 0,707 \cdot |\bar{b}| = 1,753 \cdot 10^{-10}$ м; $M = 2$; $d = 50 \cdot 10^{-6}$ м; $\rho = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м, $K_t = 2.88$. Як видно з рис. 1,б розрахунок добре збігається з експериментальними результатами.

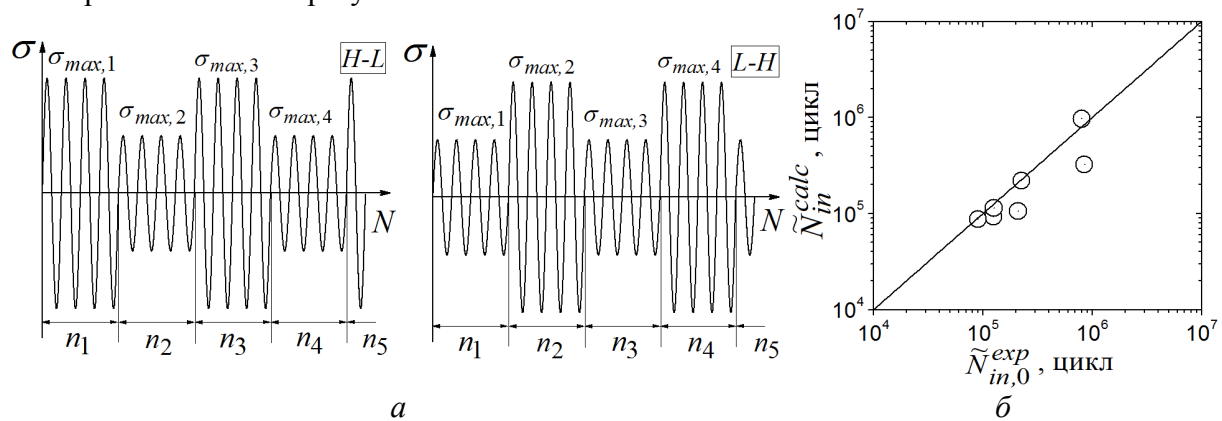


Рис. 1. а – схема ступінчастого циклічного навантаження; б – порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними.

Висновки. Запропонована модель втомної довговічності дає можливість розрахувати кількість циклів навантаження до моменту ініціювання тріщини від тупого концентратора напружень у зразках/елементах конструкцій за змінного розмаху прикладених номінальних напружень циклу, використовуючи при цьому, як вихідні дані, тільки характеристики статичної міцності: $E, \nu, \sigma_{0,2}$ та мікроструктури: d, M, b вихідного матеріалу.

Перелік посилань

1. Santecchia E., Hamouda A. M. S., Musharavati F. et al. “A Review on fatigue life prediction methods for metals”. Adv. Mater. Sci. Eng. 2016. P. 1-26.
2. Zakaria K.A., Abdullah S. and M.J. Ghazali “A Review of the Loading Sequence Effects on the Fatigue Life Behaviour of Metallic Materials”. Journal of Engineering Science and Technology Review. 2016. 9 (5). P. 189 – 200.
3. Herasymchuk O.M., Kononuchenko O.V. “Theoretical estimation of fatigue life before crack initiation in metal materials” Strength of Materials, 2023, 55(3), P. 457-468.
4. K. S. Chan, “Variability of large-crack fatigue-crack-growth thresholds in structural alloys”, Metall. Mater. Trans. A., 35A, 3721–3735 (2004).

УДК 620.171.3:616.71-001.5-089.227.84

М. Димань¹, к.т.н., с.досл.; А. Лакша², д.м.н., проф., О. Фомін³, к.м.н., доц.

¹ Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

² Українська військово-медична академія, Україна

³ Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, Україна

ДЕФОРМАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ОСТЕОСИНТЕЗУ СКЛАДНИХ ПЕРЕЛОМІВ КІСТОК ТАЗУ

Анотація. Робота присвячена дослідженню механічних характеристик фіксації складних переломів кісток таза у ділянці крижово-клубового з'єднання та верхньої і нижньої гілок лобкової кістки, які можуть виникати внаслідок поранення високошвидкісними снарядами що ранять. Досліджено деформаційні характеристики систем остеосинтезу складних переломів тазових кісток за допомогою паралельного введення спонгіозних гвинтів зі стабілізацією стрижневим апаратом зовнішнім фіксації та за допомогою армування із застосуванням накісткової реконструктивної пластини при циклічних навантаженнях. Удосконалення конструкції, використання нових матеріалів та методів їх виготовлення дозволить ефективно використовувати властивості наявних біомедичних матеріалів, покращити експлуатаційні характеристики, скоротити терміни лікування а також покращити якість життя поранених.

Ключові слова: біомеханіка, остеосинтез, стабільність фіксації перелому, кістки таза, ураження високошвидкісними снарядами (осколки, кулі).

M. Dyman, Ph.D.; A. Laksha, Ph.D., Prof.; O. Fomin, Ph.D., Assoc. Prof.

DEFORMATION CHARACTERISTICS OF OSTEOSYNTHESIS SYSTEMS OF COMPLEX FRACTURES OF PELVIC BONES

Abstract. The work is devoted to the study of mechanical characteristics of osteosynthesis systems of complex fractures of pelvic bones in the area of the ice-club joint and upper and lower branches of the pubic bone, which can occur as a result of injury by high-velocity projectiles that injure. Deformation characteristics of osteosynthesis systems of complex fractures of pelvic bones by means of parallel insertion of spongy screws with stabilization by rod apparatus of external fixation and by means of reinforced with application of extramedullary reconstructive plate under cyclic loads are investigated. The improvement of the design, the use of new materials and methods of their manufacture and coating will allow to effectively use the properties of available biomedical materials, improve the performance, reduce the duration of treatment and also improve the quality of life of the injured.

Keywords: biomechanics, osteosynthesis, stability of fracture fixation, pelvic bones, damage by high-velocity projectiles (rocket fragments, bullets).

Системи остеосинтезу мають бути достатньо стабільними при довготривалому лікуванні, яке може супроводжуватися компресійними, згинальними та ротаційними навантаженнями кісток.

Аналітичне визначення взаємних зміщень уламків кісток під дією навантажень є достатньо складною проблемою, у зв'язку з особливостями механічних характеристик кісткової тканини (в'язко-пружні ефекти, анізотропія, неоднорідність модулів пружності) та складною тримірною конфігурацією кісток. Експериментальні дослідження жорсткості та стабільності фіксації на натурних препаратах при реальних видах та рівнях навантажень на сьогодні дає найбільш достовірні результати.

Надалі окрім загальної деформації всієї системи «кістка з переломом – система остеосинтезу» будемо розглядати також взаємні зміщення частин кістки під дією фізіологічних навантажень. Як характеристики стабільності будемо розглядати ступінь зміни цих зміщень у часі під дією довготривалих циклічних навантажень.

Актуальність проблеми. Вибір способу остеосинтезу складних переломів тазових кісток при ураженні високошвидкісними раними снарядами пов'язано з масовістю цих переломів в Україні на даний час. Такі переломи відносять до найтяжчих пошкоджень і становлять 5–10 % від усіх випадків. Близько 90% переломів кісток тазу мають поєднаний і множинний характер. Летальність при поєднаних переломах становить 20–80%, при ізольованих – 6–19%. Інвалідами залишаються 40–56% травмованих. При хірургічному лікуванні, застосовуються декілька методів, зокрема, фіксація гвинтами, накістковими реконструктивними пластинами, стрижневим апаратом зовнішньої фіксації [1,2,3].

Мета роботи. Розробка методики проведення натурального експерименту і вивчення деформаційних характеристик засобів остеосинтезу складних переломів тазових кісток людини отриманих високошвидкісними снарядами, що ранили (осколки, кулі), в залежності від типу фіксатора та його розташування під дією циклічних навантажень.

Об'єкти досліджень. При остеосинтезі переломів кісток тазу, використовували стандартні спонгіозні гвинти діаметром 5 мм, довжиною 110 мм та з кроком різьби 2 мм. Реконструктивну накісткову пластину довжиною 84 мм і товщиною 2 мм, з гвинтами діаметром 6,5 мм і довжиною 45 мм. Для стабілізації був використаний стандартний стрижневий апарат зовнішньої фіксації. На **рис.1** зображено моделі систем остеосинтезу кісток тазу, які були досліджені.

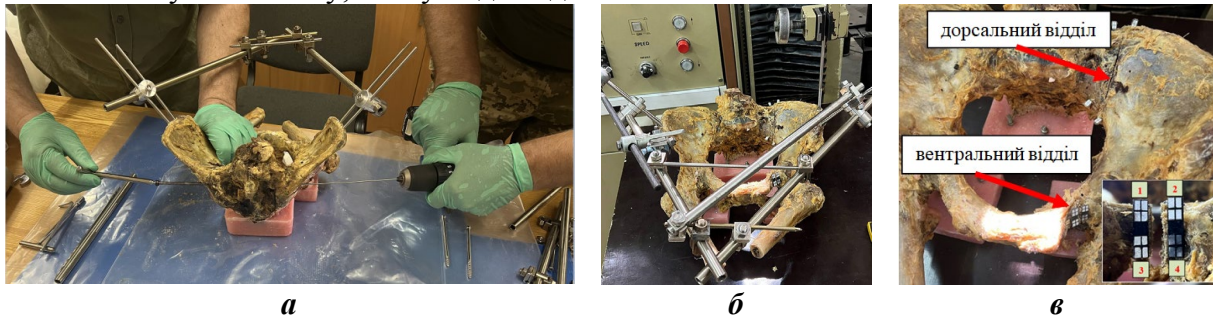


Рис. 1 – Моделювання і фіксація перелому (а), тазова кістка на робочому столі випробувальної машини при випробуванні в режимі циклічних навантажень при згині (б), позначення відділів тазової кістки та схема нумерації ідентифікаційних маркерів (в)

Підготовка зразків до випробувань. Використовували анатомічні препарати тазових кісток трупів людей, які померли від пошкоджень та захворювань, не пов'язаних з патологією опорно-рухового апарата.

Перед випробуваннями на всіх зразках тазових кісток моделювали прямі переломи в дорсальному та вентральному відділах. Переломи моделювали шляхом поперечної остеотомії осциляторною пилкою та фіксували двома способами: 1) в дорсальному відділі шляхом паралельного введення спонгіозних гвинтів та стабілізацією зовнішнім стрижневим апаратом фіксації (СО1) та 2) в дорсальному відділі шляхом паралельного введення гвинтів та армування в вентральному відділі із застосуванням накісткової реконструктивної пластини і стабілізацією зовнішнім стрижневим апаратом фіксації (СО2) [4].

Для виключення сторонніх деформацій у місцях контакту зразків з випробувальним обладнанням та для закріплення досліджуваних препаратів на

робочому столі випробувальної машини використовували пластикові опори (Протакрил М), що виготовляють індивідуально для кожної кістки [5].

Як ідентифікаційні маркери (*рис.1в*) для реєстрації переміщень точок перелому використовували прямокутні пластинки, виготовлені з листового ПВХ які нерухомо закріплювали до кісткової тканини в вентральному та дорсальному відділах тазової кістки.

Для вимірювання переміщень на відстані 100 мм від зразка встановлювали цифрову фотокамеру. За допомогою програмного забезпечення для обробки цифрових зображень вимірювали відстані між ідентифікаційними мітками в pixel і за допомогою масштабного коефіцієнту перераховували величини відстаней в міліметрах. Масштабний коефіцієнт визначали попереднім фотографуванням калібру з відомим розміром. Розрахунок переміщень точок перелому під дією навантажень детально описано у роботах [6,7].

Методика випробувань. Досліджена зміна жорсткості систем остеосинтезу під дією циклічних навантажень, що імітують навантаження на опорно-руховий апарат людини під час ходьби. Для аналізу способів фіксації використовуємо відносні величини – відношення відповідного зміщення до прикладеного навантаження (приведені переміщення λ) та величини, зворотні до приведених зміщень (жорсткості С). Приведені переміщення характеризують деформацію системи під дією навантаження величиною 1 Н. Жорсткості систем - це навантаження, яке необхідно прикласти до зразка для виникнення в ньому деформації в 1 мм. Ці характеристики відображають біомеханічні властивості лінійних систем, в яких деформації прямо пропорціональні навантаженням.

Тазові кістки з модельованими переломами та системами остеосинтезу закріплювали на робочому столі універсальної випробувальної машини [4] за допомогою спеціальних струбцин. Зусилля на зразок при випробуваннях передавали за допомогою сталевого стрижня діаметром 5 мм, закріпленого на динамометрі (*рис.1б*).

За допомогою програми з комплекту програмного забезпечення випробувальної машини TIRAtest-2151 здійснювали цикли «навантаження – розвантаження» препаратів в інтервалі між двома заданими значеннями сили. Швидкість деформування зразка становила 0,5 мм/хв. Попереднє навантаження становило 10 Н. Кількість циклів становила – 100. Зусилля $P_{\min} = 20$ Н, а зусилля P_{\max} змінювали від 50 Н, 75 Н, 100 Н. Реєстрацію переміщень здійснювали на 1, 2, 5, 10, 20, 50 та 100-му циклах.

Результати випробувань. Для порівняльного аналізу використані результати, що одержані при значеннях $P_{\min} = 20$ Н та $P_{\max} = 100$ Н.

Результати експериментів та розрахунків представлені в табл. 1 та на рис. 2.

Табл. 1. Приведені переміщення вентральної точки перелому λ^V (мм/Н) на 100-му циклі

Навантаження	Тип фіксації	
	CO 1	CO 2
$P_{\min} = 20$ Н	0,081	0,039
$P_{\max} = 100$ Н	0,027	0,009

При дії циклічних згинальних навантажень найбільшу жорсткість мають системи фіксації в дорсальному відділі шляхом паралельного введення гвинтів та армування в вентральному відділі із застосуванням накісткової реконструктивної пластини і стабілізацією зовнішнім стрижневим апаратом фіксації (C02).

Жорсткості фіксації вентральної точки перелому

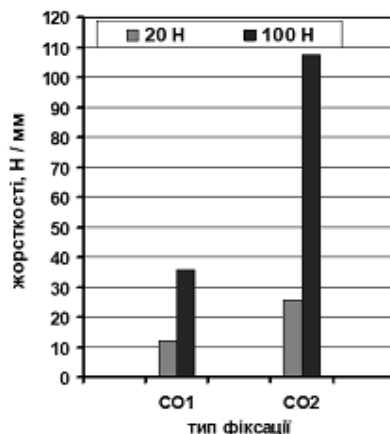


Рис. 2 – Жорсткості фіксації переломів C^V (Н/мм), розраховані по приведеним переміщенням вентральної точки перелому на 100-му циклі при навантаженнях 20 Н та 100 Н

Висновки. Розроблені методика та програма випробувань моделей тазових кісток з модельованими складними переломами та системами остеосинтезу. Одержані характеристики жорсткості систем фіксації моделей тазових кісток під дією циклічного навантаження при згині. Встановлено, що за більшістю вимірних характеристик перевагу мають система остеосинтезу, а саме фіксація в дорсальному відділі шляхом паралельного введення спонгіозних гвинтів та армування в вентральному відділі із застосуванням накісткової реконструктивної пластини і стабілізацією зовнішнім стрижневим апаратом фіксації ($CO2$).

Перелік посилань

1. Лікування поранених з бойовими ушкодженнями живота (за досвідом АТО/ООС): монографія / за ред. К.В. Гуменюка, І.П. Хоменка, І.А. Луріна, та ін. ; за заг.ред. В.І. Цимбалюка. – Херсон : Олді+, 2022. – 194с.
2. O. Ye. Loskutov, I. I. Zherdev, A. M. Domanskyi, S. O. Korol " Surgical Management of Gunshot Wounds of Extremities in Multiprofiled Hospital ", *Travma*, No. 17 (3), pp. 169–172, 2022. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.17.2016.75804>
3. I.P. Khomenko, S.O. Korol, S.V. Khalik, V.Iu. Shapovalov, R.V. Yenin, O.S. Herasymenko, S.V. Tertyshnyi "Clinical and Epidemiological analysis of the structure of combat surgical injury during Antiterrorist operation / Joint Forces Operation", *UJMM*, No. 2 (2), pp.5-13, 2021. DOI:10.46847/ujmm.2021.2(2)-005
4. M.Dyman, M. Shydlovskiy, M. Bobyr, A. Laksha, and O. Fomin, "Functional reliability of means of fixation for complex pelvic fractures. Part 1: Materials and methods", *Mech. Adv. Technol.*, vol. 8, no. 1(100), pp. 54–61, 2024. DOI: [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.1\(100\).297622](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.1(100).297622)
5. M. Shidlovskiy, M. Dyman, T. Omelchenko "The tibia fractures fixation system deformation characteristics", *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 3 (84), pp. 52-60, 2018. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.84.141615>
6. M. Shidlovskiy, O. Zakhovayko, M. Dyman "Application of digital photography in biomechanical studies of osteosynthesis systems", *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 1 (82), pp. 123-130, 2018. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.126215>
7. M.S. Shydlovskiy, O.P. Zakhovayko, M.M. Dyman "Sposib vyznachennia peremishchen v systemakh osteosyntezy", in *Proc. Zbirnyk naukovykh prats XVII Prohresyvnna tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita Ukraine*, Odesa, pp. 21–22, 2016.

УДК 631.356

Тарас Довбуш, к.т.н., доц.; Вікторія Мартинюк, Ph.D.; Анатолій Довбуш
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ БАРАБАННОГО ТИПУ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ГИЧКИ З ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

Анотація. Розроблено умови для якісного виконання процесу різання та видалення листя цукрових буряків двофункціональним барабанним різальним апаратом, який реалізується шляхом синхронізації поступального руху апарату та кутових швидкостей барабанів.

Ключові слова: видалення листя цукрових буряків, поступальна швидкість, кутова швидкість, барабанний різальний апарат.

Taras Dovbush, Ph.D., Assoc. Prof.; Viktoriia Martyniuk, Ph.D.; Anatoliy Dovbush
JUSTIFICATION OF THE KINEMATIC PARAMETERS OF A DRUM-TYPE
DEVICE FOR SUGAR BEET LEAF REMOVAL

Abstract. The conditions for the high-quality performance of the process of cutting and removal of sugar beet leaves with a dual-functional drum cutting device have been developed, which is implemented by synchronizing the translational movement of the device and the angular velocities of the drums.

Keywords: removal of sugar beet leaves, translational speed, angular speed, drum cutting device.

Більшість гичкозбиральних машин працює на технологічній швидкості 5...6 км/год, і видаляє гичку із застосуванням двох і більше гичковидальючих механізмів різних за конструктивним виконанням. За умови підвищення робочої швидкості вище рекомендованих меж значно погіршується процес обрізання гички. Водночас робота на понижених швидкостях знижує продуктивність збиральних агрегатів, а це призводить до збільшення тривалості збирання цукрових буряків.

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми може бути використання двофункціональних зрізувальних пристроїв, які поєднують різні за конструкцією та схемами видалення гички механізми. Спершу зрізання гички виконують дисковими ножами на фіксованій висоті (рис. 1а). Завдяки цьому головки коренеплідів гарантовано не ушкоджуються. Зрізану таким чином гичку можна використовувати для згодовування тваринам (зелений корм, силос), оскільки вона не містить домішок ґрунту. На другому етапі (рис. 1б) зрізання залишків гички доцільно виконувати доочисним плаваючим ножем пасивного типу, копії якого забезпечують технологічну точність обрізання гички.

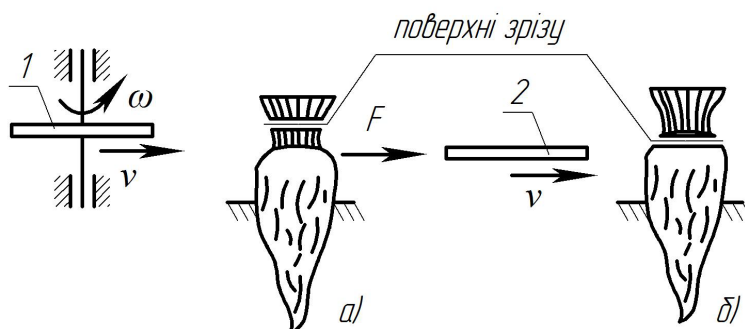


Рисунок 1. Обрізування гички цукрових буряків:
а – зрізання гички;
б – дообрізування головок буряків;
1 – дисковий ніж;
2 – плоский пасивний ніж

Конструктивно зрізувальний пристрій має шість блоків – циліндричних барабанів, у нижній частині яких приварені гичкозрізаючі плоскі ножі; по твірній барабанів приварені гребні лопатки для підбирання і передавання зрізаної гички з одного барабана на інший і в подальшому для виведення маси із зони збирання гички. Пристрій виконаний так, що зона зрізання гички ножами кожного барабана однакова, тобто водночас має зрізатися гичка на шести рядках кожним барабаном.

Подача зрізаної технологічної маси з барабана на барабан відбувається завдяки поступальному руху агрегату у горизонтальному напрямі та обертанню циліндричних барабанів з лопатками. За умови однакових кутових швидкостей барабанів, навантаження на кожний наступний наростає і досягає максимуму на шостому, що призводить до неякісного підбирання зрізаної маси, тобто її втрат і розкидання на незібрану частину поля, а також погіршення подальшого її видалення із ділянки, що збирається. Частина гички губиться під час передачі її з одного барабана на інший через те, що вона не поміщається у проміжках між лопатками, а також, за таких умов, збільшується навантаження на осі барабанів.

Необхідна умова якісного виконання технологічного процесу зрізання гички та її відведення – синхронізація швидкостей, а саме, поступальної швидкості агрегату v та кутової швидкості ω зрізаючого пристрою барабанного типу. Швидкість обертання кожного барабана з лопатками та ножами має забезпечувати зрізання гички хоча б з одного буряка та передачу зрізаної маси на наступний барабан, який також зрізає гичку з коренеплодів рядка, над яким він розташований і т.д.

Необхідну умову роботи зрізаючого пристрою опишемо як рівність переміщень - поступального руху агрегату та колової швидкості поверхні лопаток барабана (рис. 2).

Відстань між двома сусідніми буряками у рядку агрегат пройде за час $t = a/v$. За цей час лопатка першого барабана, яка передає гичку циліндричною поверхнею барабана на другий барабан, має повернутися на кут $\varphi = \omega \cdot t = \pi/2$, що відповідає кутовій швидкості першого барабана

$$\omega_1 = \omega = \frac{\pi \cdot v}{2a}.$$

Щоб забезпечити передачу однакової маси технологічної сировини кожним барабаном у фіксований момент часу необхідно забезпечити кінематичний взаємозв'язок між ними. Досягти цього можна лише завдяки збільшенню кутових швидкостей різальних барабанів із закріпленими на них лопатками. Відповідна зміна кутових швидкостей має бути досягнута послідовно, починаючи із першого (вхідного) барабана і завершуючи, в даному випадку, шостим (вихідним) барабаном (рис. 3).

Залежності, які показують взаємозв'язок між кутовими швидкостями барабанів з ріжучими ножами, визначимо з таких міркувань. Вага зрізаної гички буряків за деякий час t , що припадає на перший барабан при поступальному русі агрегату

$$Q_1 = q \cdot v \cdot t, \quad (1)$$

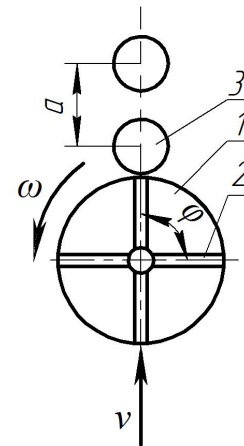


Рисунок 2. Кінематична схема зрізуючого пристрою барабанного типу

1 – барабан; 2 – лопатка;
3 – головки цукрових буряків; а – відстань між буряками в рядку;
 ω – кутова швидкість барабана;
 φ – кут між лопатками

де q - вага зрізаної гички з одного погонного метра рядка, $q = q_0/a$;

a - відстань між буряками у рядку, $1/a$ - кількість буряків на одному погонному метрі;

q_0 - вага гички з одного буряка;

v - поступальна швидкість гичкорізного агрегата синхронізована з кутовою швидкістю барабана, $v = 2a \cdot \omega_1 / \pi$.

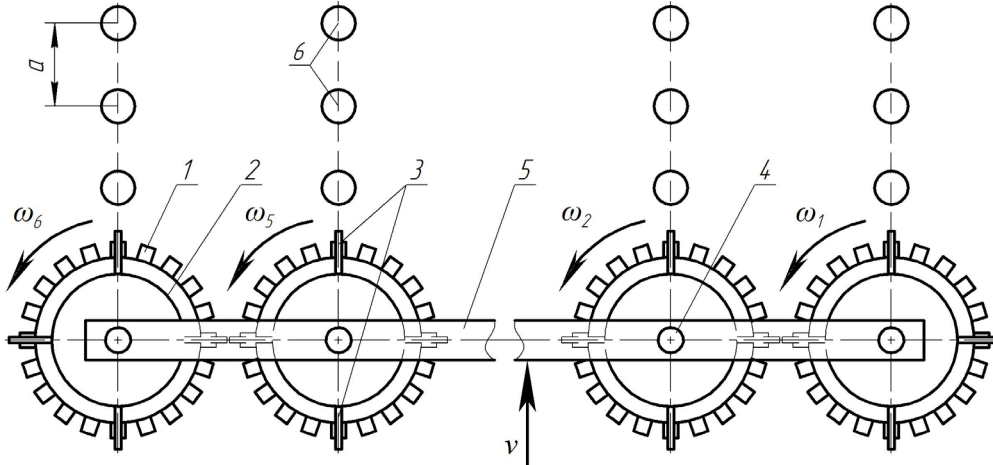


Рисунок 3. Кінематична схема зрізуючого пристрою барабанного типу
 1 – ніж; 2 – барабан; 3 – лопатка; 4 – вісь барабана; 5 – рама; 6 – головки цукрових буряків; a – відстань між буряками в рядку; v – лінійна швидкість агрегату;
 $\omega_1 \dots \omega_6$ – кутові швидкості барабанів

Враховуючи значення q і v , отримаємо, якою буде вага зрізаної гички на першому барабані

$$Q_1 = \frac{2 \cdot \omega_1 \cdot q_0 \cdot t}{\pi} \quad (2)$$

На другий барабан потрапить вага зрізаної гички з коренеплодів другого рядка, а також вага гички передана на нього першим барабаном

$$Q_2 = 2Q_1 = \frac{4 \cdot \omega_1 \cdot q_0 \cdot t}{\pi} \quad (3)$$

З рівності

$$\frac{4 \cdot \omega_1 \cdot q_0 \cdot t}{\pi} = \frac{2 \cdot \omega_2 \cdot q_0 \cdot t}{\pi}$$

отримаємо, що кутова швидкість другого барабана

$$\omega_2 = 2\omega_1 \quad (4)$$

Враховуючи необхідність забезпечення зрізання гички на однаковій висоті з шести рядків і повноту послідовної передачі зрізаної маси із зони збирання, отримаємо залежності для кутових швидкостей барабанів:

$$\omega_3 = 3\omega_1, \quad \omega_4 = 4\omega_1, \quad \omega_5 = 5\omega_1, \quad \omega_6 = 6\omega_1 \quad (5)$$

Синхронізувати мінімальну поступальну швидкість гичкорізального агрегата з мінімальною кутовою швидкістю (α відповідно і частотою обертання) першого барабана та з врахуванням відстані між коренеплодами у рядках, для забезпечення якісного зрізання, підбирання та відведення гички можна користуючись графіком показаним на рис. 4.

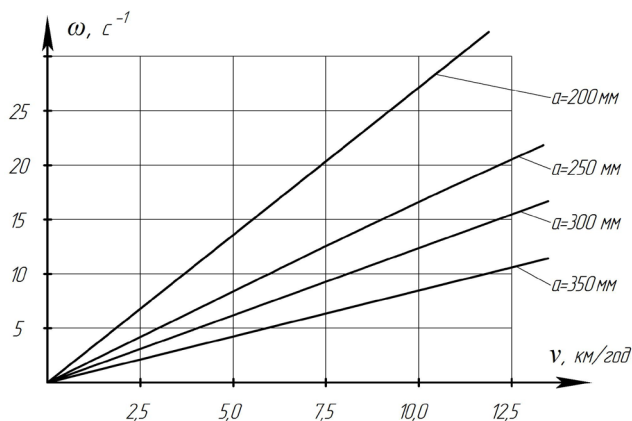


Рисунок 4. Залежність кутової швидкості першого барабана від мінімальної поступальної швидкості руху гичкозбирального агрегата з врахуванням відстані між коренеплодами у рядках

Обумовлена синхронізація поступального руху гичкозбирального пристрою та оберткових рухів ріжучих барабанів забезпечує якісне виконання процесу зрізування та відведення гички.

Перелік посилань

1. Andrii Babii, Taras Dovbush, Nadiia Khomuk, Anatolii Dovbush, Anna Tson, Vasyl Oleksyuk, 2022. Mathematical model of a loaded supporting frame of a solid fertilizers distributor. *Procedia Structural Integrity* No 36, PP.203-210. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.025>
2. Dovbush Taras, Khomyk Nadia, Dovbush Anatolii, Dunets Bogdan, 2019. Evaluation technique of frame residual operational life. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. Tern.: TNTU. Vol. 93. No. 1. PP. 61-69.
3. Довбуш Т. А. Опір матеріалів: навчальний посібник до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи. Т. А. Довбуш, Н. І. Хомик, А. В. Бабій, Г. Б. Цьонь, А. Д. Довбуш. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.
4. Хомик Н.І., Цьонь Г.Б., Довбуш Т.А., Антончак Н.А. Основи агрономії: навчальний посібник до практичних занять та самостійної роботи. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 320 с.
5. Хомик Н.І., Цьонь Г.Б., Довбуш Т.А., Олексюк В.П. Основи агрономії: навчальний посібник (курс лекцій). Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 232 с.
6. Tson Anna, Baranovskyi Viktor, Lyashuk Oleg, Dovbush Taras. Experimental researches of parameters technological process of the improved beets tops purifier. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. Tern.: TNTU, 2018. Vol. 92. No. 4. P. 60-67.
7. Tson Anna, Khomuk Nadia, Dovbush Taras, Tson Oleh. Feasibility study of an auger conveyor performance of the haulm removing module. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. Tern.: TNTU, 2018. Vol. 91. No 3. P. 101-106.
8. Гевко Ів.Б., Довбуш Т.А., Цьонь О.П., Довбуш А.Д., Станько А.І. Синтез гвинтових робочих органів із еластичними поверхнями та результати їх дослідження. *Сільськогосподарські машини*. Випуск 47. 2021. С.63-72
9. Гевко Р.Б., Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Дячун А.Є., Залуцький С.З., Станько А.І., Довбуш Т.А. Гвинтові конвеєри з еластичними поверхнями. Монографія. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2024. 239 с. Рекомендовано до друку вченою радою Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (протокол № 1 від 30.01.2024 р.) ISBN 978-617-7875-72-6.

УДК 631.356

Тарас Довбуш, к.т.н., доц.; Надія Хомик к.т.н., доц.; Ганна Цьонь, к.т.н.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПАСИВНОГО НОЖА ДЛЯ ДООБРІЗУВАННЯ ГОЛОВОК КОРЕНЕПЛОДІВ ЦУКРОВИХ БУРЯКІВ

Анотація. Встановлено параметри потужності пасивного ножа для обрізки листя цукрових буряків та їх зміну в залежності від розмірних характеристик коренеплодів, товщини леза ножа та положення ножа відносно руху пристрою.

Ключові слова: обрізка головок цукрових буряків, ніж попереднього очищення, потенціальна енергія деформації зрізу, зовнішня робота леза ножа, товщина леза ножа.

Taras Dovbush, Ph.D., Assoc. Prof.; Nadia Khomyk, Ph.D., Assoc. Prof.; Hanna Tson, Ph.D.

JUSTIFICATION OF THE POWER PARAMETERS OF THE PASSIVE KNIFE FOR TRIMMING THE HEADS OF SUGAR BEET

Abstract. The power parameters that must be applied to a passive knife for trimming sugar beet leaves and their change depending on the dimensional characteristics of root crops, the thickness of the knife blade and the position of the knife relative to the movement of the device are established.

Keywords: trimming of sugar beet heads, pre-cleaning knife, potential energy of deformation of the cut, external work of the knife blade, thickness of the knife blade.

Гичковидаляючі механізми, видаливши гичку з головок коренеплодів, відводять її із зони рядків у міжряддя, на зібране поле або у транспортний засіб, тобто за межі дії викопувальних робочих органів коренезбиральних машин. Такі пристрої поєднують кілька механізмів, в основному – це гичкозрізувальні апарати та очисники головок коренеплодів. Гичкозрізувальні апарати використовують для зрізання основної маси гички, очисники головок коренеплодів видаляють залишки гички. Очисники, що виконують зрізування, називають дообрізувачами, конструктивно вони можуть бути виконані по-різному, поєднуючи, копії та різні види ножів, ними можуть бути також окремі типи гичкозрізувальних апаратів. Основні агровимоги до таких механізмів: під час видалення верхньої частини головок коренеплодів зі зрізаною частиною має видалятися як можна менше цукроносної маси, тобто відходи цукроносної маси з гичкою не повинні перевищувати 5 % від маси коренеплодів; залишків гички на коренеплодах має бути не більше 1,5 %. Нормально обрізаними вважають коренеплоди, у яких площина зрізу проходить у зоні коронки або сплячих вічок. В інших випадках, а саме, при відхиленні під час дообрізування площини зрізу вище або нижче межі допустимого зрізу, коренеплоди є високо або низько обрізаними.

Компонувальні рішення машин для видалення гички є різними і залежать від технології збирання, вимог до якості видалення гички, кількості рядків, що одночасно збирають. Гичковидаляючі механізми конструктивно можуть бути об'єднані у гичкозбиральні машини, бурякозбиральні комбайни, виконані окремо (гичкорізи, очисники головок коренеплодів), поєднанні з копаками коренезбиральних машин.

Аналізуючи існуючі конструкції і тенденції розвитку гичкозбиральних машин, для забезпечення якісного видалення гички можна вважати перспективним поєднання двох робочих органів в одній машині а саме, високе зрізування гички роторними пристроями і доочищення головок коренеплодів гичкозрізувальними пристроями, виконаними із застосуванням пасивних гребінчастих копіїв і пасивних плоских ножів.

Розглянемо процес дообрізування гички з головок коренеплодів цукрових буряків із застосуванням пасивних ножів, які працюють після проходу дискових ножів, що зрізають гичку на фіксованій висоті. Обґрунтуємо силові параметри пасивного ножа.

Силу, яку потрібно прикласти до пасивного доочисного ножа для забезпечення дообрізування, визначимо з умови рівності потенціальної енергії деформації зрізу гички буряків та зовнішньої роботи, яку виконує лезо ножа

$$W = A. \quad (1)$$

Потенціальна енергія деформації зрізу, яку необхідно затратити на руйнування шару коренеплоду цукрового буряка у зоні коронки, (рис. 1):

$$W = \frac{\tau^2 \cdot V}{2G} = \frac{\pi \cdot \tau^2 \cdot R^2 \cdot \delta}{2G}, \quad (2)$$

де τ – граничні напруження зрізу коренеплоду цукрового буряка у зоні коронки (або сплячих вічок);

G – модуль пружності зрізу коренеплоду цукрового буряка у зоні коронки (або сплячих вічок),

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot \delta; \quad (3)$$

δ – товщина леза доочисного ножа;

R – радіус головки коренеплоду цукрового буряка у зоні коронки або сплячих вічок.

Зовнішню роботу, яку виконує лезо доочисного ножа дообрізуючи головки коренеплодів буряків, визначимо, аналізуючи процес різання залежно від положення ножа (рис. 1). Елементарна робота ножа на дообрізування гички з головок коренеплодів

$$dA = \frac{1}{2} dF \cdot dh, \quad (4)$$

де dF – елементарна сила прикладена до ножа, $dF = 2 R \cdot \sin \varphi \cdot \tau \cdot \delta$;

dh – елементарне переміщення ножа по коренеплоду цукрового буряка у зоні коронки (або сплячих вічок), $dh = R \cdot d\varphi$.

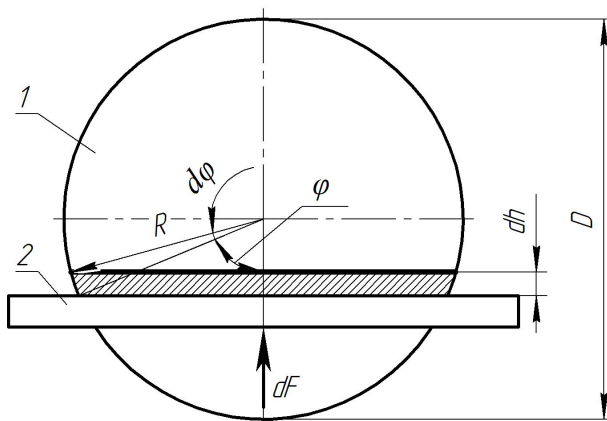


Рисунок 1. Схема дообрізування гички з головок цукрових буряків залежно від положення ножа
1 – головка коренеплоду;
2 – доочисний ніж.

Залежність (4) набуде вигляду $dA = R^2 \cdot \delta \cdot \tau \cdot \sin \varphi d\varphi$. Відповідно загальна робота, яку потрібно затратити на дообрізування головок коренеплодів цукрових буряків,

$$A = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} R^2 \cdot \delta \cdot \tau \cdot \sin \varphi d\varphi = 2 R^2 \cdot \delta \cdot \tau. \quad (5)$$

Користуючись умовою рівності потенціальної енергії та зовнішньої роботи затраченої на дообрізування $W = A$

$$\frac{\pi \cdot \tau^2 \cdot R^2 \cdot \delta}{2 G} = 2 R^2 \cdot \delta \cdot \tau, \quad (6)$$

отримаємо залежність для визначення напруження зрізу необхідного для виконання процесу дообрізування

$$\tau = 4 \cdot G / \pi. \quad (7)$$

Для забезпечення якісного дообрізування головок коренеплодів до доочисного ножа необхідно прикласти максимальну силу

$$F_{\max} = 2R \cdot \delta \cdot \tau = 4 \cdot G \cdot d_{зр} \cdot \delta / \pi, \quad (8)$$

де $d_{зр}$ – діаметр зрізу головок коренеплодів у зоні коронки або сплячих вічок.

Діапазон зміни сили різання від товщини леза доочисного ножа та діаметрів головок коренеплодів у зоні коронки або сплячих вічок показано на рис. 2.

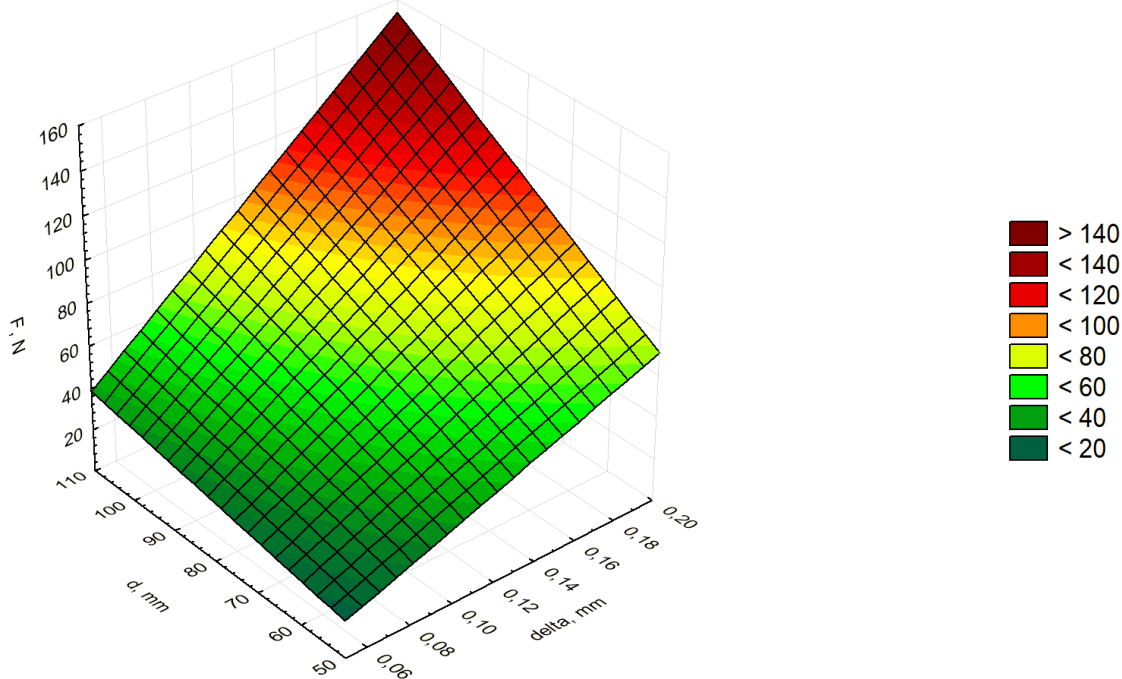


Рисунок 2. Залежність сили різання від товщини леза доочисного ножа та діаметрів головок буряків у зоні коронки або сплячих вічок при $G = 5,5$ МПа; $\delta = 0,05...0,2$ мм; $d_{зр} = 50...110$ мм

Виходячи з міркувань зменшення динамічних навантажень на ніж доочисника та плавності зрізання ніж потрібно встановити нахилено, тобто під кутом α до осі руху агрегату (рис. 3). Для обох випадків встановлення ножа (рис. 3а,б) робота затрачена на зрізання гички з головок коренеплодів має бути однаковою, тобто

$$\frac{1}{2} F_1 \cdot 2 \cdot OC_1 = \frac{1}{2} F_2 \cdot 2 \cdot OC_2, \quad \text{або} \quad F_1 = \frac{F_2}{\cos \alpha}, \quad F_2 = F_1 \cdot \cos \alpha.$$

Для випадку встановлення ножа нахилого на кут α до осі руху агрегату сила зрізу зменшується, але шлях леза ножа по головках коренеплодів буряків збільшується, завдяки цьому забезпечується якісне дообрізування гички.

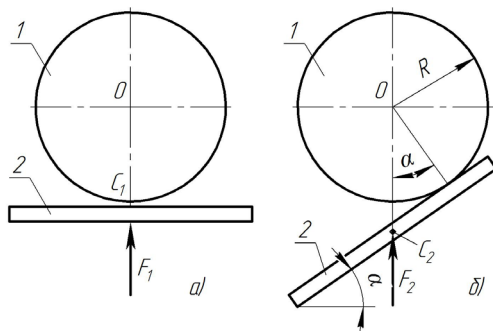


Рисунок 3. Схема дообрізування гички залежно від положення ножа
1 – головка коренеплоду;
2 – ніж.

Виходячи з умови рівності потенціальної енергії та зовнішньої роботи затраченої на дообрізування головок коренеплодів цукрових буряків пасивним плоским ножом, встановлено, що завдяки правильному вибору кута нахилу ножа до осі руху гичкозбирального агрегату, можна досягти зменшення навантаження на ніж через зменшення сили різання, водночас покращити якість дообрізування гички завдяки збільшенню шляху проходження ножа, тобто шляху різання.

Перелік посилань

1. Andrii Babii, Taras Dovbush, Nadiia Khomuk, Anatolii Dovbush, Anna Tson, Vasyl Oleksyuk, 2022. Mathematical model of a loaded supporting frame of a solid fertilizers distributor. *Procedia Structural Integrity* No 36, PP.203-210. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.025>
2. Dovbush Taras, Khomyk Nadia, Dovbush Anatolii, Dunets Bogdan, 2019. Evaluation technique of frame residual operational life. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. Tern.: TNTU. Vol. 93. No. 1. PP. 61-69.
3. Довбуш Т. А. Опір матеріалів: навчальний посібник до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи. Т. А. Довбуш, Н. І. Хомик, А. В. Бабій, Г. Б. Цьонь, А. Д. Довбуш. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.
4. Хомик Н.І., Цьонь Г.Б., Довбуш Т.А., Антончак Н.А. Основи агрономії: навчальний посібник до практичних занять та самостійної роботи. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 320 с.
5. Хомик Н.І., Цьонь Г.Б., Довбуш Т.А., Олексюк В.П. Основи агрономії: навчальний посібник (курс лекцій). Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 232 с.
6. Tson Anna, Baranovskyi Viktor, Lyashuk Oleg, Dovbush Taras. Experimental researches of parameters technological process of the improved beets tops purifier. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. Tern.: TNTU, 2018. Vol. 92. No. 4. P. 60-67.
7. Tson Anna, Khomuk Nadia, Dovbush Taras, Tson Oleh. Feasibility study of an auger conveyor performance of the haulm removing module. *Scientific Journal of the Ternopil national technical university*. Tern.: TNTU, 2018. Vol. 91. No 3. P. 101-106.
8. Hevko R. B., Tkachenko I. G, Khomyk N. I., Gumeniuk Y. P, Flonts I.V., Gumeniuk O. O., 2020. Determination of technical-and-economic indices of root crop conveyer-separator during their motion on curved path. *IMMATEH: Agricultural engineering*. Vol. 61, No 2. PP. 175-182.

УДК 620.178.7

Євген Кондряков, к.т.н.; Андрій Кравчук, к.т.н.; Валерій Харченко, д.т.н.; Володимир Жмака

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

МОДЕРНІЗАЦІЯ ІНСТРУМЕНТОВАНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО КОПРА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ УДАРНИХ ВИПРОБУВАНЬ РІЗНИХ ТИПІВ

Анотація. Проведено модернізацію інструментованого вертикального копра з метою розширення його функціональності, а саме встановлено новий динамометр та вузли закріплення зразків для проведення випробувань на ударний зсув, стиск та динамічне продавлювання. Також копер був оснащений системою відеофіксації, яка включає високошвидкісну камеру, що дозволяє проводити запис процесу деформування та руйнування зі швидкістю до 200 000 кадрів за секунду. За результатами тестових випробувань на ударний згин та зсув отримано відеосигнали процесу деформування та руйнування зразків.

Ключові слова: інструментований вертикальний копер, високошвидкісна система реєстрації, ударний зсув, ударний стиск, динамічне продавлювання, високошвидкісна відеокамера.

Eugene Kondryakov, Ph.D.; Andriy Kravchuk, Ph.D.; Valery Kharchenko, Ph.D.; Volodymyr Zhmaka

MODERNIZATION OF THE INSTRUMENTED VERTICAL DROP WEIGHT IMPACT TESTING MACHINE AND IMPROVEMENT OF DIFFERENT TYPES OF IMPACT TESTING METHODS

Abstract. Modernization of the instrumented vertical drop weight impact testing machine has been carried out to expand its functionality, specifically by installing a new dynamometer and sample mounting units for conducting impact shear, compression, and dynamic perforation tests. The impact testing machine was also equipped with a video recording system, which includes a high-speed camera capable of recording the deformation and fracture process at speeds up to 200,000 frames per second. From the results of impact bending and shear test, video signals of the specimen deformation and fracture process were obtained.

Keywords: instrumented vertical drop weight impact testing machine, high-speed registration system, impact shear, impact compression, dynamic perforation, high-speed video camera.

При високошвидкісному деформуванні властивості матеріалів можуть суттєво відрізнятись від їх квазістатичних властивостей, які отримують при стандартних випробуваннях. Зокрема, границя плинності та міцності зростають, а пластичність зменшується. Крім того, при високих швидкостях деформування активізуються різні механізми руйнування і для їх врахування потрібно проводити випробування різних типів зразків. До таких методик належать випробування на ударний згин, розтяг, зсув, стиск тощо, більшість з яких не регламентуються вітчизняними нормативними документами [1-5]. У зв'язку з необхідністю отримання характеристик міцності та пластичності в залежності від термомеханічних параметрів у широкому діапазоні швидкостей деформації, часто комбінують різні види випробувань як при статичному, так і при динамічному навантаженні. Тому розробка універсального експериментального обладнання, яке здатне забезпечити проведення широкого класу випробувань, а також підвищення інформативності таких випробувань за рахунок

використання сучасних високошвидкісних засобів реєстрації, залишається актуальною задачею.

Для забезпечення можливостей проведення на одній установці всіх видів випробувань, описаних вище, було проведено модернізацію інструментованого вертикального копра ВК-350. Конструкцію цього копра було розроблено в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України для проведення випробувань на ударний трьохточковий згин зразків типу Шарпі. Спеціально для вертикального копра була розроблена багатоканальна система високошвидкісної реєстрації деформації і температур з частотою дискретизації до 20МГц та система нагріву та охолодження зразків, що дозволяє проводити випробування в широкому діапазоні температур [6].

Для розробки нової конструкції вузла навантаження та зразків було використано метод чисельного експерименту. Проводилась серія розрахунків з використанням методу скінчених елементів, при цьому варіювались конструкція та розміри ударника, опори та зразків. За результатами розрахунків було спроектовано оптимальні конструкції вузлів навантаження (динамометр та опори), які дозволяють отримати якісні результати (рис. 1,а).

За результатами аналізу літературних джерел та сучасних методів випробувань на ударний зсув для досліджень була обрана форма зразка з двома зонами зсуву. Довжина L зон зсуву може бути змінена для створення різних швидкостей деформування в цих зонах. З такою конструкцією зразка деформація стиску, що виникає у верхній його частині, перетворюється у локальний зсув у відповідних зонах. Такий зразок може бути випробуваний як на статичний, так і на динамічний зсув з використанням стандартних сервогідравлічних машин та різних типів копрів. При цьому швидкість деформування може варіюватися у межах $10^{-3} \div 10^5 \text{ c}^{-1}$ (рис.1,б).

Для випробувань на ударний стиск розроблено циліндричні зразки діаметром $d = 9 \text{ мм}$ та висотою $h = 11 \text{ мм}$. Зразок встановлюється на масивну загартовану опору з твердістю, вищою за твердість зразка, для уникнення його вдавлення в опору. Навантаження зразка проводиться ударником з динамометром з різними швидкостями деформування.

В якості зразків для випробувань на динамічне продавлення використовувались квадратні пластини $50 \times 50 \text{ мм}$ товщиною 1 мм . Для закріплення тонколистових зразків була розроблена спеціальна опора з отвором для встановлення змінних пуансонів різної форми.

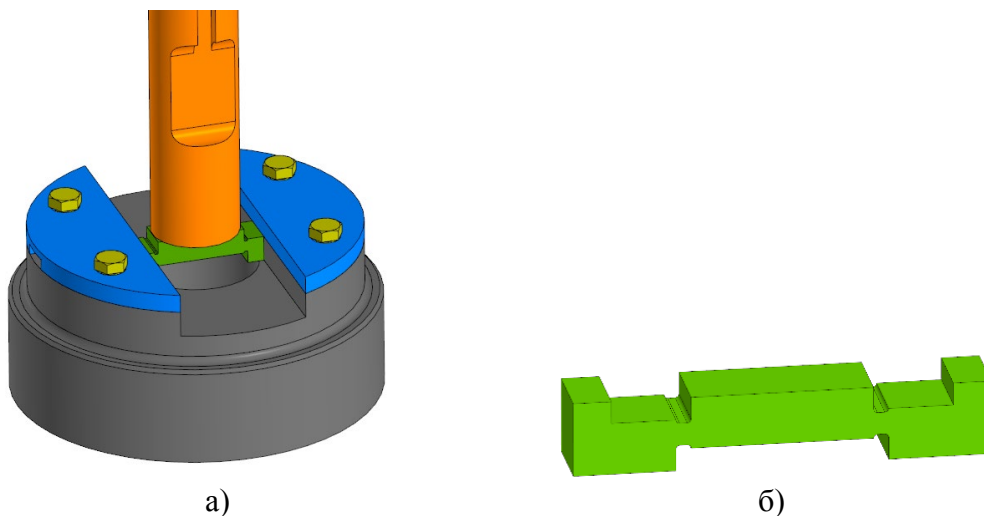


Рис. 1. Модернізована конструкція вузла навантаження (а) та форма зразка для проведення випробувань на ударний зсув (б).

За результатами всіх типів випробувань, описаних вище, записується діаграма навантаження в координатах зусилля-час. Для цього використовується високошвидкісна система реєстрації з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) Adlink NuDAQ PCI-9812. Сигнал з тензорезисторів, наклеєних на спеціальних площадках динамометра, через блок підсилення та плату АЦП передається на персональний комп'ютер для обробки, аналізу та зберігання даних. Для підвищення інформативності випробувань для відеофіксації процесу навантаження було використано високошвидкісну відеокамеру PHOTRON FASTCAM NOVA S9, яка дозволяє записувати відеосигнал зі швидкістю до 200 000 кадрів за секунду. Камера забезпечує високошвидкісне завантаження зображень на персональний комп'ютер за допомогою набору технологій Fast Gigabit Ethernet та багатофункціонального програмного забезпечення Photron FASTCAM Viewer. Для покращення якості зображення використовувався додатковий об'єктив з 12-кратним збільшенням та стробоскопічні +висоочастотні лампи для підсвічування з системою керування GSVITEC MultiLED G8. Камера розташовувалась так, що її оптична вісь була перпендикулярна до поверхні зразка, а відстань до зразка складала 150мм. При цьому просторова розподільна здатність складала 240 пікселів/мм. Схематичне зображення процесу реєстрації даних при різних видах ударних випробувань показано на рис. 2.

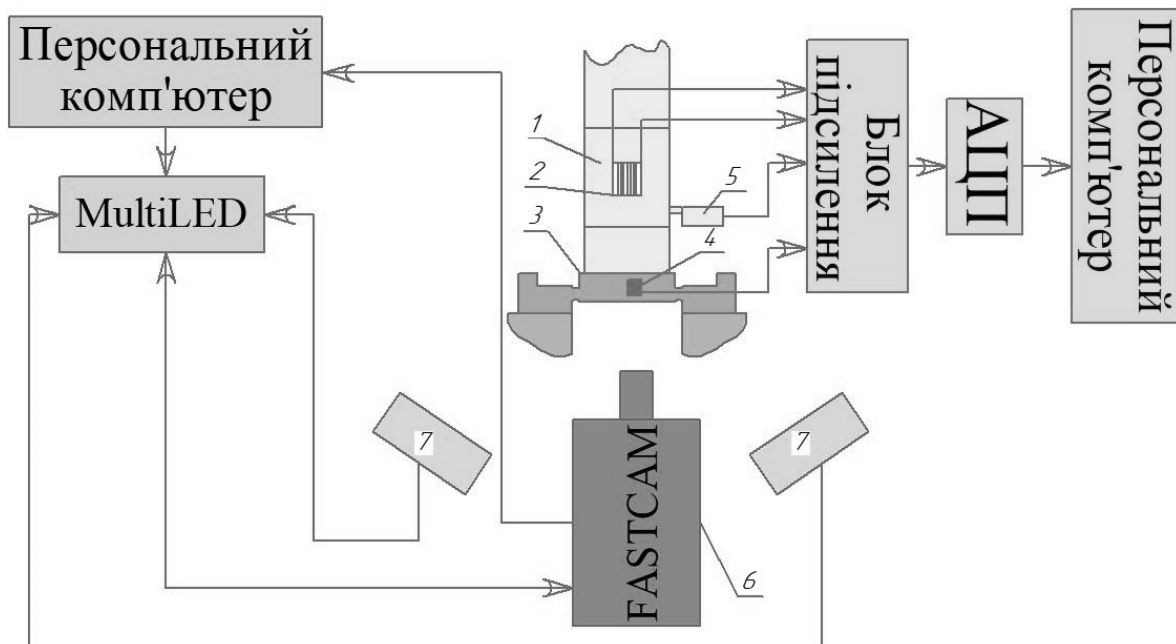


Рис. 2. Схема реєстрації параметрів навантаження зразка при випробуваннях на ударний зсув: 1 – динамометр; 2 – тензорезистори; 3 – зразок; 4 – датчик температури; 5 – система вимірювання швидкості навантаження; 6 – високошвидкісна камера; 7 - високочастотні освітлювачі.

Тестування відеофіксації процесу навантаження проводилось при випробуваннях на ударний згин та зсув. При проведенні тестових випробувань було відпрацьовано методику синхронізації сигналу з тензорезисторів, наклеєних на ударнику, та відеосигналу з високошвидкісної камери. При цьому швидкість системи реєстрації сигналу з датчиків складає $5 \cdot 10^6$ точок за секунду, а частота відеореєстрації – $8 \cdot 10^4$ кадрів за секунду, отже приблизно на 60 точок діаграми навантаження припадає 1 кадр відеосигналу. Відеофіксація процесу руйнування зразків також дозволяє оцінити швидкість розповсюдження тріщини. Швидкість реєстрації відеосигналу дозволяє отримувати зображення зразка з високою дискретністю, таким чином, вимірюючи

довжину тріщини на поверхні зразка, можна оцінити швидкість її розповсюдження з високою точністю.

Результати ударних випробувань зразків різних типів можуть бути використано для чисельного моделювання процесів деформування та руйнування матеріалів та елементів конструкцій. При таких розрахунках використовують різні моделі матеріалів та критерії руйнування (модель Джонсона-Кука, модель Гарсона-Твергаарда-Нідлмана та інші) [7-9]. Для моделювання високошвидкісних процесів, таких як балістичне пробиття перешкоди, вибухові навантаження тощо, необхідно визначати параметри таких моделей, які чутливі до впливу швидкості деформації. Таким чином, використання результатів комплексних випробувань з різними швидкостями деформації дозволяє отримати повний набір параметрів для різних моделей матеріалу. Тому використання для проведення таких випробувань інструментованих методів дозволить отримати додаткову інформацію о процесах деформування та руйнування матеріалів при динамічному навантаженні в діапазоні швидкостей деформацій $10^2 \div 10^4 \text{ c}^{-1}$.

Перелік посилань

1. Xu Zejian et al. Determination of shear behavior and constitutive modeling of the 603 steel over wide temperature and strain rate ranges. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019. Vol. 129. P. 184-204.
2. Astakhov, M.M., Loginov, A.V., Loshmanov, L.P. et al. Combined experimental and theoretical method of determining strength characteristics of materials under quasistatic tensile conditions. *Strength Mater* 23, 963–966 (1991).
3. Viehrig H.-W., Boehmert J., Dzugan J. Use of instrumented Charpy tests for master curve determination. IAEA Specialists Meeting on Master Curve Testing and Results Application, 17-19 September 2001. Prague, Czech Republic, 2001. 8 p.
4. Xu, Z., Ding, X., Zhang, W., Huang, F., 2017. A novel method in dynamic shear testing of bulk materials using the traditional SHPB technique. *Int. J. Impact Eng.* 101: 90–104.
5. A. Popławski, P. Kędziński, A. Morka Identification of ArmoX 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials & Design*. 2020. Vol. 190. P. 1-28.
6. Харченко В.В., Кондряков Е.А., Жмака В.Н., Бабуцкий А.А (2006) Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности. *Надёжность и долговечность машин и сооружений*, №27. 121-130.
7. Yuguang Cao et al. Determination of Johnson–Cook parameters and evaluation of Charpy impact test performance for X80 pipeline steel. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 179.
8. A. Banerjee et al. Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Materials Science & Engineering A*. 2015. Vol. 640. P. 200-209.
9. Є.О. Кондряков, А.В. Кравчук, В.В. Харченко Чисельне моделювання процесів зародження та розповсюдження тріщини в зразках різних типів з використанням моделі пошкоджуваності матеріалу GTN. *Mech. Adv. Technol.* 2021. Vol.5, N1. P. 1-8.

УДК 669.539.43

Галина Кречковська д.т.н., с.досл.; Петро Соловей; Леся Свірська, к.т.н.; Іван Курнат, Олександра Студент, д.т.н., проф.

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОШКОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РОТОРІВ ПАРОВИХ ТУРБІН ВНАСЛІДОК КОНТАКТНОЇ ВТОМИ

Анотація. Проаналізовано причини експлуатаційних пошкоджень в дисках роторів парової турбіни на двох об'єктах енергетики. Показано, що сумісний вплив концентраторів напружень та технологічного середовища сприяли зародженню в них тріщин контактної втоми та їх поширенню внаслідок корозійної втоми.

Ключові слова: диск ротора турбіни, експлуатаційне руйнування, контактна втома, корозійна втома, механізм руйнування.

Halyna Krechkovska, Ph.D.; Petro Solovei; Lesya Svirska, Ph.D.; Ivan Kurnat, Oleksandra Student, Ph.D., Prof.

OPERATIONAL DAMAGE TO STEAM TURBINE ROTOR ELEMENTS AS A RESULT OF CONTACT FATIGUE

Abstract. The causes of operational damage in steam turbine rotor disks at two energy facilities are analyzed. It was shown that the combined influence of stress concentrators and the technological environment contributed to the initiation of contact fatigue cracks in them and their propagation due to corrosion fatigue.

Key words: turbine rotor disk, operational failure, contact fatigue, corrosion fatigue, failure mechanism.

Вступ. Теплова енергетика України в умовах сьогодення перебуває у складних обставинах, спричинених значною зношеністю устаткування та руйнівними ударами сусідньої держави-терориста. Адже близько 90% потужностей ТЕС досягли межі вичерпування планового ресурсу (10^5 год), а 51% з них – фізичного зносу за паркового ресурсу понад $2 \cdot 10^5$ год. Елементи роторів парових турбін відносять до критично важливих, тому необхідно забезпечити їх безперебійну роботу. Адже сумісний вплив високих експлуатаційних напружень та корозійно-наводнювального технологічного середовища, підсилений втратою початкових властивостей теплопривних сталей внаслідок їх деградації під час тривалої експлуатації [1], робить їх найбільш уразливими елементами енергогенеруючого устаткування. Руйнування дисків роторів парових турбін супроводжується масштабними пошкодженнями із реальною загрозою життю персоналу та довкіллю. Тому оцінювання поточного стану тривало експлуатованих сталей дисків та аналіз причин, які спричинили їх пошкодження, є важливими для упередження таких ексцесів у майбутньому. Нижче з'ясовано причини руйнування двох дисків роторів парових турбін після різної тривалості експлуатації на різних об'єктах та оцінено технічний стан теплопривних сталей за їх властивостями.

Матеріали та методики дослідження. Причини пошкодження аналізували на вирізках з пошкоджених дисків роторів високого тиску парових турбін після їх експлуатації близько 14 та 35 років. Аналізовані елементи були виготовлені зі сталей 30ХНЗМ1ФА (мас. %: 0,3 С; 1,67 Сr; 0,54 Мо; 3,42 Ni; 0,14 V; 0,11 Cu; 0,19 Si; 0,32 Mn; 0,005 S; 0,0005 P) та 34ХНЗМ (мас. %: 0,32 С; 0,91 Сr; 0,29 Мо; 2,8 Ni; 0,41 Si; 0,59 Mn; 0,053 S; 0,039 P), відповідно. В обох турбінах був використаний різний принцип кріплення лопаток з диском ротора. В першому з них, вилкоподібні хвостовики лопаток

з'єднувалися з гребенями диску заклепками, які проходили через наскрізні отвори в обох елементах. А в другому – їх з'єднання забезпечувала відповідність профілів Т-подібних хвостовиків лопаток і пазу у диску ротора.

Для аналізу стану експлуатованих сталей використали характеристики міцності та пластичності та фрактографічний аналіз експлуатаційних зламів. Механічні властивості дискових сталей визначали на гладких циліндричних зразках діаметром 5 мм. Їх випробовували на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Структурні та фрактографічні особливості аналізованих елементів, зруйнованих під час експлуатації, аналізували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

Експериментальні результати. *Структура експлуатованих сталей.* У структурі сталі 30ХНЗМ1ФА після меншої тривалості експлуатації виявили дрібні карбіди завбільшки до 0,5 мкм, які зберегли зв'язок з феритною матрицею, і лише найкрупніші з них частково відшарувались від неї (рис. 1а). Тоді як в триваліше експлуатованій сталі 34ХНЗМ ознаки втрати зв'язку карбідів з феритною матрицею у вигляді дрібних ямок на місці карбідів виявились істотніше, що свідчило про її інтенсивнішу деградацію на мікроструктурному рівні (рис. 1б). Попри те, що триваліше експлуатована сталь зберегла цілісність на макрорівні, вона практично втратила її на мікрорівні і перетворилася у матрицю з великою кількістю мікропорожнин (структура типу пемзи). Така тенденція накопичення пошкоджень, внаслідок втрати когезії між вclusions і матрицею, узгоджується з особливостями пошкоджень у металі шва теплотривкої сталі 15Х1М1Ф після тривалої експлуатації на парогоні ТЕС [2].

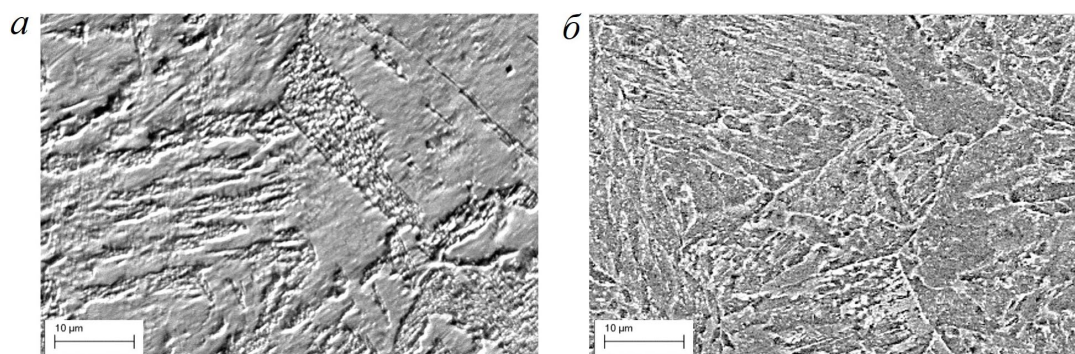


Рис. 1. Мікроструктура сталей 30ХНЗМ1ФА (а) та 34ХНЗМ (б) дисків роторів парових турбін після 14 та 35 років експлуатації, відповідно.

Механічні властивості дискових сталей. Через концентратори напружень в гребенях і ободах дисків, яких неможливо уникнути під час їх виготовлення, вони найвразливіші до пошкоджень. Під впливом відцентрових сил, що діють на лопатки, рівень напружень в найслабших перерізах дисків може короткочасно досягати навіть границі плинності металу. Тому контроль технічного стану металу на відповідність регламентованим рівням міцності і пластичності є важливим для прогнозування роботоздатності непошкоджених дисків, експлуатованих за подібних умов. У таблиці наведені результати атестації обох сталей дисків за випроб на розтяг.

Таблиця. Механічні властивості сталей гребенів дисків роторів турбін

Сталь	Орієнтація зразка	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %
30ХНЗМ1ФА	Радіальна	773	653	22	71,0
	Тангенціальна	776	655	21	70,5
ТУ 108.11.918-87		≥ 740	590 – 710	≥ 15	≥ 40
34ХНЗМ	Тангенціальна	999	935	13	51
ГОСТ 4543-2016		686 – 883	≤ 816	≥ 13	≥ 40

Виявили, що механічні властивості сталі 30ХНЗМ1ФА практично не залежали від орієнтації зразків, що узгоджувалось з технологією виготовлення дисків ротора методом литва (див. таблицю). Адже в литій структурі анізотропія властивостей звикло не проявляється. Основне, що попри 14-річну експлуатацію механічні властивості сталі диску продовжували відповідати регламентним вимогам. Отже, якби не дочасне пошкодження елементів ротора, то і не було б підстав зупиняти турбіну.

Водночас результати випроб на розтяг сталі 34ХНЗМ після експлуатації в диску ротора парової турбіни показали, що її границі міцності σ_B та плинності $\sigma_{0,2}$ досягли 999 та 935 МПа, а відносні видовження і звуження – 13 та 51%, відповідно. Отже, після 35 років експлуатації ця сталь за всіма показниками (окрім ψ) перестали відповідати вимогам регламенту, що вважали ознакою її критичної деградації.

Причини руйнування дисків. Аналіз дефектів на поверхні гребеня диска зі сталі 30ХНЗМ1ФА в околі його зламу виявив велику кількість корозійних уражень (рис. 2а). Їх появу пов'язали з неприпустимо великою кількістю так званих корозійно-активних неметалевих включень у структурі сталі (рис. 2б), що спричинили неприйнятну для таких відповідальних елементів як диски роторів електрохімічну гетерогенність сталі. Мікрорентгенівський спектральний аналіз показав в складі цих включень алюмінати кальцію за різного співвідношення CaO та Al₂O₃ з додатками оксидів магнію і кремнію, оточених оболонкою з кальцій сульфідом, або сульфідом марганцю. Негативний вплив неметалевих включень чітко проявився в околі макротріщини від отвору під заклепку в гребені диска у вигляді густої мережі паралельних мікротріщин, спричинених контактною втомою (рис. 2в). Під дією високих контактних навантажень між поверхнею отворів в гребені диска і заклепками ці тріщини, розташовані на різній віддалі від поверхні отворів, зливалися шляхом руйнування перетинок до найближчих неметалевих включень у структурі сталі за механізмом зсуву. Перетворення однієї із цих тріщин на магістральну сприяло її переорієнтації на нормально орієнтовану стосовно поверхні отвору тріщини та її поширенню вже під дією циклічних навантажень розтягу з формуванням типового рельєфу з паралельних утомних боріздов (рис. 2г).

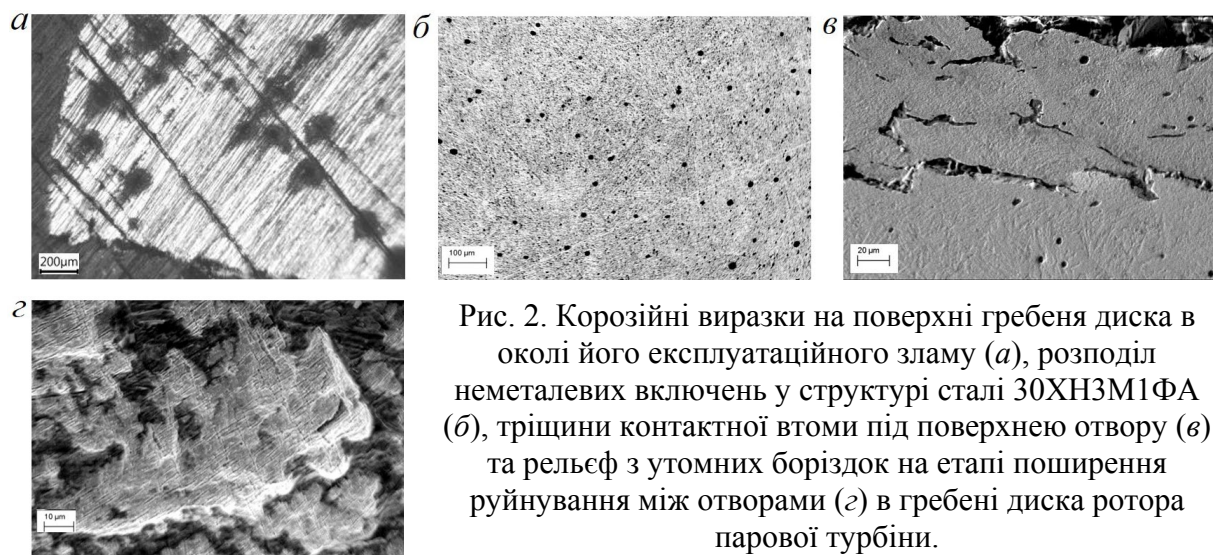


Рис. 2. Корозійні виразки на поверхні гребеня диска в околі його експлуатаційного зламу (а), розподіл неметалевих включень у структурі сталі 30ХНЗМ1ФА (б), тріщини контактної втоми під поверхнею отвору (в) та рельєф з утомних боріздов на етапі поширення руйнування між отворами (г) в гребені диска ротора парової турбіни.

Отже, попри відсутність очевидних структурних ознак деградації сталі 30ХНЗМ1ФА (відшарування карбідів від матриці) та відповідність її механічних властивостей регламентним вимогам, диск ротора парової турбіни все ж дочасно зруйнувався (всього після 14 років експлуатації), що обумовлено несприятливим поєднанням низки чинників: структурного (неприпустимо висока густина корозійно-

активних неметалевих включень), активного технологічного середовища (взаємодія з яким сприяла формуванню мережі дефектів на включеннях), конструктивно невіддале рішення з'єднання хвостовиків робочих лопаток та диску (сприяло виникненню високих контактних навантажень між ними та зародженню мережі тріщин контактної втоми), та механічного (висока концентрація напружень сприяла утомному росту тріщин в перетинках між отворами для заклепок).

Аналізуючи причини руйнування диску ротора парової турбіни після 35 років експлуатації, в структурі сталі 34ХНЗМ не виявили надмірної кількості неметалевих включень, що убезпечило диск від дочасного формування мережі пошкоджень корозійно-механічного походження. Разом з тим, через порушення зазорів між Т-подібними хвостовиками лопаток та гребенем диску внаслідок тривалої експлуатації ротора, не вдалося уникнути значного наклепу під поверхневих шарів контактуючих елементів. Відповідні сліди пластичного деформування поверхневих шарів гребеня диску виявили в околі зони їх контакту з хвостовиками лопаток (рис. 3а). Це сприяло виникненню тріщин контактної втоми у підповерхневих прошарках гребеня диску (рис. 3б). Особливістю руйнування диску після тривалої експлуатації стало те, що ослаблення когезії карбідів з матрицею, відзначеного під час металографічних досліджень, спричинило, крім того, ослаблення когезії між суміжними зернами. Як наслідок, стало можливим поширення руйнування в диску за корозійно-втомним механізмом (практично шляхом міжзеренного руйнування, рис. 3в).

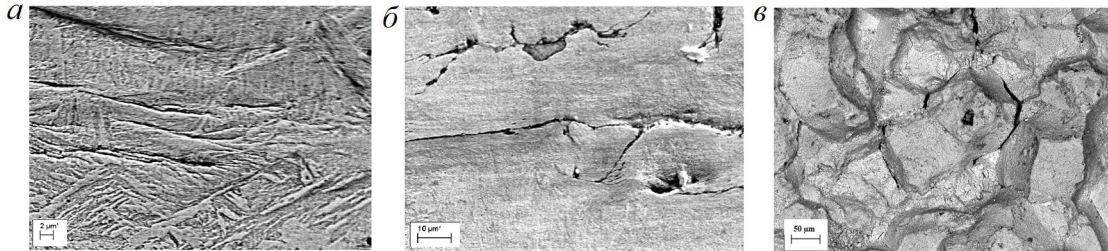


Рис. 3. Сліди пластичної деформації на поверхні гребеня диску зі сталі 34ХНЗМ в околі його експлуатаційного зламу після 35 років експлуатації в роторі парової турбіни (а), тріщини контактної втоми під зоною контакту гребеня диску та полички хвостовика лопатки (б) та корозійно-втомний рельєф експлуатаційного зламу гребеня диску на етапі поширення руйнування (в).

Висновки. Руйнування обох аналізованих дисків розпочиналося з контактної втоми. Проте дочасне руйнування дискової сталі 30ХНЗМ1ФА (всього після 14 років експлуатації в роторі турбіни) відбулося через несприятливу комбінацію структурного, корозійного та механічного чинників, які пришвидшили перехід від контактної втоми до поширення руйнування за класичним для втоми крізьзеренним механізмом з формуванням утомних боріздок. Тоді як в сталі 34ХНЗМ після 35 років експлуатації відбулися структурні зміни, що ослабили межі зерен та створили сприятливі передумови для поширення руйнування диска за міжзеренним механізмом, властивим корозійній утомі.

Перелік посилань

1. Ranking of the mechanical characteristics of steels of steam pipelines of thermal power plants by their sensitivity to in-service degradation / O. Z. Student, H. V. Krechkovska, L. M. Svirska, B. I. Kindratskyi, V. V. Shyrovkov // Materials Science. – 2021. – 57, 3. – P. 404-412. DOI:10.1007/s11003-021-00554-x.

2. Development of a method for computer processing of fractographic images to assess the cohesion of inclusions to the matrix in the weld metal after its operational degradation and hydrogenation / R. Vorobel, O. Student, I. Ivasenko, P. Maruschak, H. Krechkovska, O. Zvirko, O. Berehulyak, T. Mandziy, I. Tsybailo, P. Solovei // Materialia (MTLA). – 2024. – 34. Article number: 102074. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102074.

УДК 621.326

Юрій Крутій, д.т.н., проф.; Данило Величко

Одеська державна академія будівництва та архітектури, Україна

ПРО ВІЛЬНІ КОЛИВАННЯ КРУГЛИХ СУЦІЛЬНИХ ТА КІЛЬЦЕВИХ ПЛАСТИН НА НЕОДНОРІДНІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ ВІНКЛЕРА

Анотація. Розглядається задача про вільні симетричні коливання круглих суцільних та кільцевих пластин, що опираються на неоднорідну пружну основу Вінклера. Розроблено аналітичний метод розрахунку для випадку, коли коефіцієнт постелі задається будь-якою неперервною функцією радіальної координати. Метод ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння коливань в частинних похідних. Наведено числові результати розрахунку власних частот коливань для випадку суцільної металевої круглої пластини з жорстко закріпленим контуром та лінійно-змінним коефіцієнтом постелі. Для порівняння наведено також відповідні розрахунки методом скінчених елементів.

Ключові слова: круглі пластини, неоднорідна пружна основа, вільні симетричні коливання, аналітичний метод, частоти коливань.

Yurii Krutii, Ph.D., Prof.; Danylo Velychko

ABOUT FREE OSCILLATIONS OF CIRCULAR SOLID AND ANNULAR PLATES ON AN INHOMOGENEOUS ELASTIC WINKLER FOUNDATION

Abstract. The problem of free symmetrical oscillations of circular solid and annular plates resting on an inhomogeneous elastic Winkler foundation is examined. An analytical calculation method is developed for the case when the modulus of subgrade reaction is defined by any continuous function of the radial coordinate. The method is based on the exact solution of the corresponding partial differential equation of vibration. Numerical results for the natural oscillation frequencies are computed and presented for the case of a solid metal circular plate with a rigidly fixed contour and a linearly varying modulus of subgrade reaction. For comparison, the corresponding calculations using the finite element method are also presented.

Keywords: circular plates, inhomogeneous elastic foundation, free symmetric oscillations, analytical method, oscillation frequencies.

Колівальні явища повсюдно поширені в природі і відіграють фундаментальну роль у різних механічних системах. Частота вільних коливань є фундаментальною властивістю системи і залежить виключно від її внутрішніх механічних характеристик. Точне визначення власних частот має вирішальне значення для розуміння поведінки колівальних систем. Зокрема, коли частота зовнішньої сили збігається з власною частотою системи, виникає резонанс, що призводить до значного посилення реакції системи або до її серйозних пошкоджень, а інколи до її руйнування.

Авторами досліджено задачу про симетричні коливання круглих пластин сталої циліндричної жорсткості

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)},$$

що опираються на неоднорідну пружну основу (рис. 1). Тут E – модуль Юнга, h – товщина пластини, μ – коефіцієнт Пуассона.

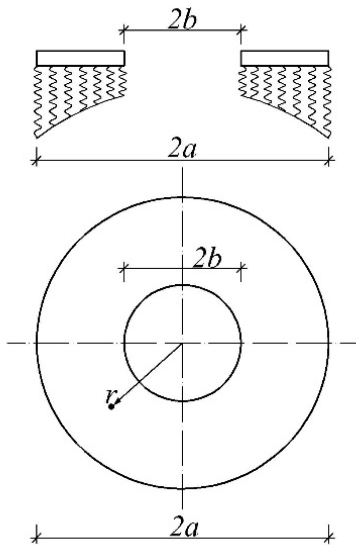


Рис. 1. Кільцева пластина на змінній пружній основі

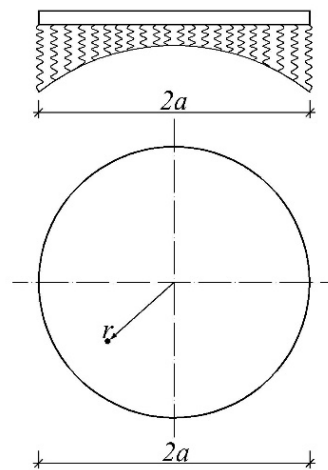


Рис. 2. Суцільна пластина на змінній пружній основі

Для пружної основи прийнято гіпотезу Вінклера, відповідно до якої сила реакції основи $R(r, t)$ на пластину та динамічний прогин $W(r, t)$ пов'язані між собою рівністю $R(r, t) = -k(r)W(r, t)$, де $k(r)$ – змінний коефіцієнт постелі.

Диференціальне рівняння коливань пластини має вигляд

$$D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) \right] \right\} + k(r)W + \rho h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0.$$

В публікації [1] отримано точний розв'язок цього рівняння. Як наслідок, в замкненій формі там наведено розрахункові формули для параметрів коливань пластини. Виходячи з точного розв'язку, авторами даної публікації розроблено аналітичний метод розрахунку на коливання круглих та кільцевих пластин, коли коефіцієнт постелі задається будь-якою неперервною функцією. Для реалізації розробленого методу створено відповідний програмний код. Тим самим, забезпечено можливість розрахунку пластин на симетричні коливання у програмному режимі.

Приклад. Наведемо результати розрахунку для суцільної пластини з жорстко закріпленим контуром. Коефіцієнт постелі змінюється за лінійним законом

$$k(r) = k(0) - (k(0) - k(a)) \frac{r}{a}.$$

Вихідні дані для розрахунку: $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$; $E = 200 \text{ ГПа}$; $\mu = 0,3$; $a = 1 \text{ м}$; $h = 0,05 \text{ м}$; $k(0) = 5 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^3$; $k(a) = 4 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^3$.

В табл. 1 наведені результати розрахунку авторським методом (АМ) та наближеним методом скінченних елементів (МСЕ) у програмному комплексі ЛІРА-САПР. Оскільки авторський метод розрахунку ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння, отримані чисельні результати можна трактувати, як точні. Порівняння результатів дає можливість чисельно визначити похибку розрахунків методом скінченних елементів для розглянутого прикладу.

На рис. 3 представлені графіки перших п'яти симетричних форм коливань.

Таблиця 1

№ форми	Частоти коливань ω , рад/с		Розбіжність, %
	АМ	МСЕ	
1	250,334497	238,236404	4,832771
2	973,146283	926,875977	4,754712
3	2180,080984	2075,200928	4,810833
4	3870,186617	3682,196045	4,857403
5	6043,317446	5747,596191	4,893360

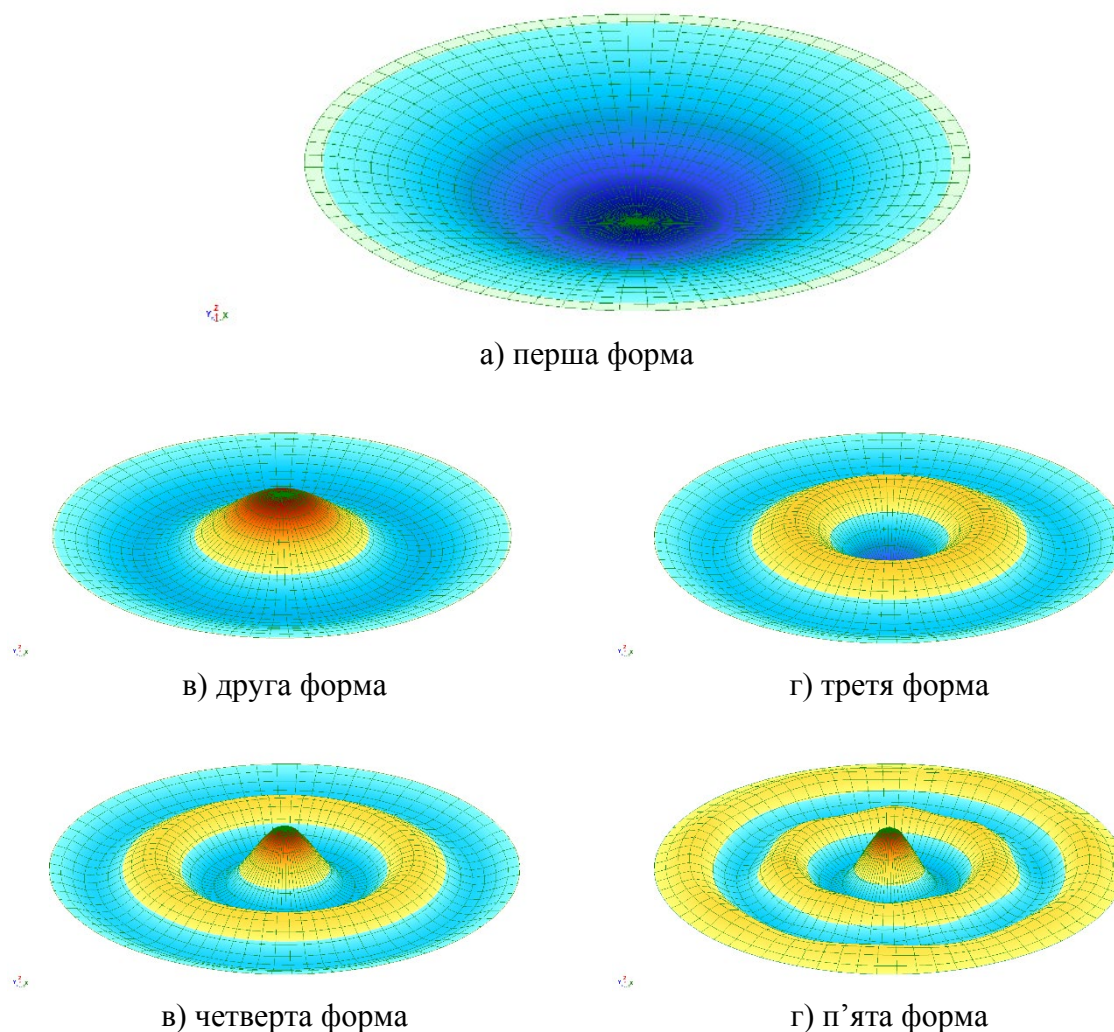


Рис. 3. Перші п'ять симетричних форм коливань

У цілому можна констатувати наявність нового аналітичного методу розрахунку на коливання суцільних та кільцевих пластин на неоднорідній суцільній пружній основі Вінклера, коли коефіцієнт постелі задається будь якою неперервною функцією.

Перелік посилань

1. Krutii, Y., Surianinov, M., Osadchiy, V., & Kolomiichuk, V. (2021). Development of analytical calculation method for axisymmetric oscillations of circular and annular plates on variable Winkler elastic foundation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1164(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1164/1/012056>.

УДК 539.375

Олександр Кіпніс, к.ф.-м.н.

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Україна

ПЛОСКА ЗАДАЧА МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ПРО СТИСК КУСКОВО-ОДНОРІДНОЇ ПІВПЛОЩИНИ З ЗАКРІПЛЕНОЮ МЕЖЕЮ ВЗДОВЖ МІЖФАЗНОЇ ТРІЩИНИ

Анотація. З використанням апарату тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл досліджено плоску задачу про стиск кусково-однорідного напівобмеженого тіла з закріпленою спеціальним чином межею вздовж приповерхневої тріщини, розташованої на прямолінійній межі поділу середовищ. Проаналізовано втрату стійкості матеріалу в локальній області біля міжфазної тріщини як початковий етап руйнування.

Ключові слова: матеріал з покриттям, межа поділу середовищ, міжфазна тріщина, стиск вздовж тріщини, критичні навантаження

Alexander Kipnis, Ph.D.

PLANE PROBLEM OF FRACTURE MECHANICS ON COMPRESSION OF A PIECEWISE HOMOGENEOUS HALF-PLANE WITH A FIXED EDGE ALONG AN INTERFACE CRACK

A plane problem of compression of a piecewise homogeneous semi-bounded body with a fixed edge along a near-surface crack located on the rectilinear interface is considered. The study is performed using the relations of the three-dimensional linearized theory of stability of deformable bodies. The piecewise homogeneous body model is applied, assuming that the coating material is more rigid than the base material. The loss of stability of the material in the local area near the interfacial crack is analyzed as the initial stage of fracture.

Keywords: material with coating, interface, near-surface interface crack, compression along the crack, critical loads

Вступ. Задачі для тіл, які стискаються вздовж площин розташування тріщин відносять до неklasичних задач механіки руйнування через незастосовність класичних критеріїв руйнування за такої схеми навантаження. Найбільш ефективним підходом до дослідження указаних проблем є застосування апарату тривимірної лінеаризованої теорії стійкості деформівних тіл (ТЛТСДТ) [1] із залученням відповідних критеріїв руйнування.

Так, старт руйнування *однорідного* матеріалу, що стискається вздовж тріщин асоціюється з втратою стійкості стану рівноваги матеріалу в локальній області поблизу тріщини (*локальна втрата стійкості*) [2].

Початковий етап руйнування *кускОВО-однорідного* конструкційного матеріалу, що стискається вздовж тріщин (зокрема таких, що розташовані на межі поділу середовищ) має комбінований характер і передбачає взаємодію різних механізмів втрати стійкості: *локальна втрата стійкості*, *внутрішня* (зумовлена внутрішньою структурою конструкційного матеріалу та стисканням вздовж межі поділу середовищ) та *приповерхнева* (зумовлена наявністю граничної поверхні тіла (для обмежених і напівобмежених тіл) і явищами, що виникають біля цієї поверхні) втрата стійкості [3].

Нижче в рамках ТЛТСДТ досліджена плоска статична задача про стиск конструкційного матеріалу вздовж тріщини, розташованої на прямолінійній межі поділу двох різних середовищ: напівобмеженого однорідного тіла (основа) та однорідного шару покриття. Межа тіла закріплена таким чином, що точки цієї межі

можуть вільно зміщуватися лише в нормальному до неї напрямку. Відповідну крайову задачу, сформульовану в термінах потенціальних гармонічних функцій із застосуванням інтегральних подань Фур'є зведено до задачі на власні значення для системи інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду (і деякої додаткової умови), яка досліджується чисельно з використанням методу Бубнова-Гальоркіна. Зазначена система інтегральних рівнянь одержана в загальному випадку, коли обидва матеріали (основи і покриття) є стисливими або нестисливими високоеластичними матеріалами, для пружних потенціалів яких, згідно з термінологією [1], виконується умова *рівності коренів характеристичних рівнянь*. Визначені значення критичного відносного укорочення і критичного навантаження, які, відповідно до застосованого критерію руйнування, відповідають старту процесу руйнування конструкційного матеріалу, що досліджується.

Постановка задачі. В умовах плоскої деформації розглянемо кусково-однорідне напівобмежене тіло, що складається з півплощини $x_2 \geq 0$ (матеріал "1", основа) та смуги $-h \leq x_2 \leq 0$ (матеріал "2", покриття). Прямолінійна межа поділу середовищ $x_2 = 0$ містить відкриту міжфазну ненавантажену тріщину довжини $2a$ (рис. 1); поза тріщиною матеріали жорстко з'єднані між собою.

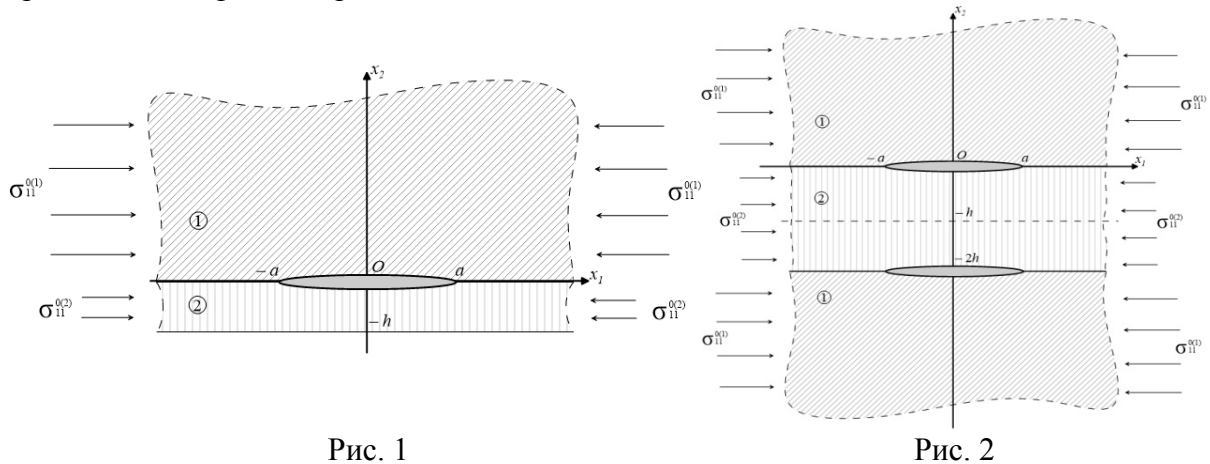


Рис. 1

Рис. 2

Нехай на нескінченності матеріали стискаються вздовж осі Ox_1 рівномірно розподіленими навантаженнями

$$\sigma_{11}^{0(i)} = \text{const}, \quad i = 1, 2; \quad \sigma_{11}^{0(1)} \neq \sigma_{11}^{0(2)} \quad (1)$$

таким чином, щоб гарантувати однакові укорочення вздовж осі Ox_1 для матеріалів півплощини та смуги

$$\lambda_1^1 = \lambda_1^2 = \lambda_1 = \text{const}, \quad \lambda_1 < 1, \quad (2)$$

де λ_1^1 , λ_1^2 – коефіцієнти укорочення матеріалів півплощини та смуги, що обумовлені стискаючими зусиллями $\sigma_{11}^{0(1)}$ та $\sigma_{11}^{0(2)}$ відповідно (тут і далі верхнім індексом "1" (в дужках) позначені величини, що відповідають матеріалу півплощини "1", а верхнім індексом "2" (в дужках) – смуги "2"; верхнім індексом "0" (без дужок) тут і надалі позначаються величини, що відносяться до початкового (докритичного, незбуреного) стану, а збурення цих величин не позначаються додатковим індексом). Межа тіла $x_2 = -h$ закріплена таким чином, що точки цієї межі можуть вільно зміщуватися лише в нормальному до неї напрямку.

В цьому випадку докритичний напружено-деформований стан в кожній з областей є статично визначеним, однорідним та визначається виразами для переміщень

$$u_1^{0(i)} = (\lambda_1 - 1)x_1, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Граничні умови сформульованій задачі записуються наступним чином:

$$\begin{aligned} t_{22}^{(2)} = 0, u_1^{(2)} = 0 \quad (x_2 = -h, 0 \leq |x_1| < \infty); \quad t_{22}^{(1)} = t_{22}^{(2)}, t_{21}^{(1)} = t_{21}^{(2)} \quad (x_2 = 0, 0 \leq |x_1| < \infty); \\ t_{22}^{(2)} = 0, t_{21}^{(2)} = 0 \quad (x_2 = 0, |x_1| \leq a); \quad u_1^{(1)} = u_1^{(2)}, u_2^{(1)} = u_2^{(2)} \quad (x_2 = 0, |x_1| > a). \end{aligned} \quad (4)$$

Тут $t_{kl}^{(i)}$, $i, k, l = 1, 2$ є збуреннями компонент несиметричного тензору напружень Піоли-Кірхгофа \tilde{t} , \vec{u} – вектор переміщень.

В описаній постановці крайова задача з умовами (4) еквівалентна задачі плоскої деформації для смуги, що жорстко з'єднана з двома півплощинам і стискається вздовж двох паралельних міжфазних тріщин (для випадку антисиметричної (згинної) форми втрати стійкості) (рис. 2). Аналогічна задача для однорідного тіла досліджена в [4]; аналогічна просторова осесиметрична задача досліджена в [5] з використанням методу скінчених різниць для низки конкретних композитних матеріалів, які, згідно з термінологією [1], відповідають випадку *нерівних коренів характеристичних рівнянь*.

Перевагою застосування підходу, що пропонується в роботі є можливість отримання результатів в *загальній формі* для широкого спектру матеріалів: стисливих і нестисливих, пружних і пружно-пластичних, ізотропних та анізотропних. При цьому, на відміну від підходів, що базуються на використанні чисельних методів скінчених різниць та скінчених елементів (див., наприклад, [5]), конкретизація моделі матеріалу відбувається лише на фінальному етапі розв'язання задачі.

Система інтегральних рівнянь задачі. Для випадку однорідного докритичного стану (1) – (3) в [1] побудовані представлення загальних розв'язків лінеаризованих рівнянь рівноваги через гармонічні потенціальні функції, від яких залежить від співвідношення коренів характеристичного рівняння для вибраної моделі матеріалу. В даній роботі досліджується випадок, коли характеристичне рівняння для кожного з матеріалів має *рівні корені* ($n_1^1 = n_2^1 = n_1^2 = n_2^2 = n$), а самі матеріали "1" і "2" є різними, проте такими, що описується однаковими пружними потенціалами.

Представивши (з урахуванням симетрії конфігурації відносно осі Ox_2) указані невідомі гармонічні потенціальні функції у вигляді косинус-розкладів Фур'є за координатою x_1 та записавши в їх термінах граничні умови задачі (4), після ряду викладок вихідна гранична задача зводиться до задачі на власні значення відносно параметра укорочення $\lambda_1^1 = \lambda_1^2 = \lambda_1 < 1$ для системи інтегральних рівнянь Фредгольма першого роду [4]

$$\begin{aligned} \int_0^1 \left[\int_0^\infty P_1(n^{-1/2} \beta \lambda) \frac{(\cos \lambda \eta - \cos \lambda) \cos \lambda \xi}{\lambda} d\lambda \right] f(\eta) d\eta + \\ + \int_0^1 \left[\int_0^\infty P_2(n^{-1/2} \beta \lambda) (\cos \lambda \eta - \cos \lambda) \cos \lambda \xi d\lambda \right] g(\eta) d\eta = 0, \\ \int_0^1 \left[\int_0^\infty Q_1(n^{-1/2} \beta \lambda) \frac{(\cos \lambda \eta - \cos \lambda) \cos \lambda \xi}{\lambda^2} d\lambda \right] f(\eta) d\eta + \\ + \int_0^1 \left[\int_0^\infty Q_2(n^{-1/2} \beta \lambda) \frac{(\cos \lambda \eta - \cos \lambda) \cos \lambda \xi}{\lambda} d\lambda \right] g(\eta) d\eta = \text{const}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\beta = h/a, \quad 0 \leq \xi < 1, \quad 0 \leq \eta \leq 1$$

відносно невідомих безрозмірних функцій $f(\xi)$, $g(\xi)$ ($P_{1,2}$, $Q_{1,2}$ – відомі функції).

Константа const , яка фігурує в (5), пов'язана з додатковою умовою

$$\int_0^1 g(\eta) d\eta = 0. \quad (6)$$

Параметр λ_1 (коефіцієнт укорочення вздовж осі Ox_1) характеризує докритичний стан та складним нелінійним чином входить до ядер інтегральних рівнянь. Чисельне дослідження системи інтегральних рівнянь (5), доповнених умовою (6), проводиться з використанням методу Бубнова-Гальоркіна.

Аналіз результатів. В якості прикладу наведемо результати числових досліджень одержаної задачі на власні значення для випадку, коли матеріали конструкційного тіла, що розглядається, описуються пружним потенціалом Бартенева – Хазановича (нестисливі тіла).

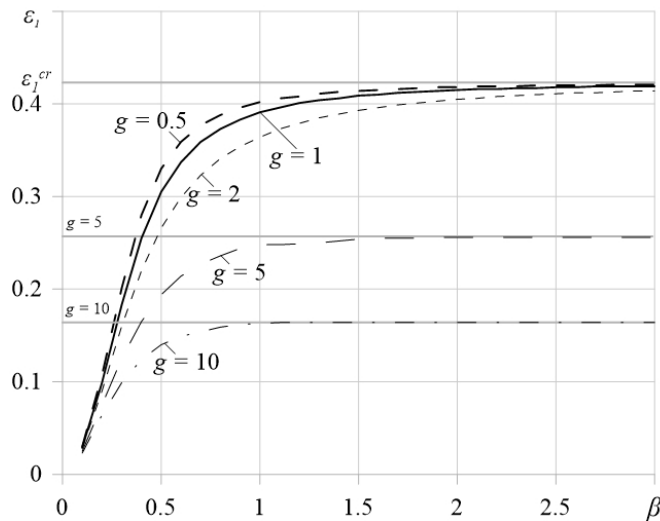


Рис. 3

На графіку рис. 3 зображено залежність значення критичного відносного укорочення $\varepsilon_1 = 1 - \lambda_1$ від значення відносної ширини смуги $\beta = h/a$ для різних значень $g = \mu_2/\mu_1$ відношення жорсткості матеріалу покриття до жорсткості матеріалу основи. Горизонтальні прямі на графіку рис. 3, відповідають значенням критичного відносного укорочення $\varepsilon_1^{st} = 1 - \lambda_1^{st}$ для *приповерхневої нестійкості кусково-однорідної півплощини* (якщо таке явище спостерігається, $g = 5; 10$) при відповідному значенні g або значенням критичного відносного укорочення $\varepsilon_1^{cr} = 1 - \lambda_1^{cr} = 0.423$ для *приповерхневої нестійкості однорідної півплощини* з матеріалом з пружним потенціалом Бартенева – Хазановича (якщо явище *приповерхневої нестійкості кусково-однорідної півплощини* не спостерігається, $g = 0.5; 1; 2$) при відповідному значенні g .

Перелік посилань

1. Гузь А.Н., Дышель М.Ш., Назаренко В.М. Разрушение и устойчивость материалов с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1992. – 456 с. (Неклассические проблемы механики разрушения в 4-х т., 5-и кн. Под общ. ред. А.Н. Гузя; Т.4, кн. 1).
2. Гузь А.Н. Об одном критерии разрушения твердых тел при сжатии вдоль трещин. Плоская задача // Докл. АН СССР. – 1981. – 259, №6. – С. 1315–1318.
- Гузь А.Н. Основы механики разрушения композитов при сжатии: в 2-х томах. – К.: «ЛИТЕРА», 2008. Т. 1. Разрушение в структуре материала. – 592 с.
3. Гузь А. Н., Назаренко В. М., Стародубцев И. П. Плоская задача разрушения материалов с двумя параллельными трещинами при сжатии вдоль трещин. – В кн.: Проблемы механики деформируемого твердого тела / Под ред. В. Г. Зубчанинова. – Калинин: КГУ, 1986. – С. 138—151.
4. Guz I.A. Investigation of the stability of a composite in compression along two parallel structural cracks at the layer interface // Int. Appl. Mech. – 1994. – 30, N 11. – P. 841–847.

УДК 620.1:621.643:662.769.2

Григорій Никифорчин, д.т.н., проф.; Ольга Звірко, д.т.н., проф., член-кореспондент НАН України; Олександр Цирульник, д.т.н., с.н.с.; Олег Венгринюк
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВОДНЕВОЇ КРИХКОСТІ ЕКСПЛУАТОВАНИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ

Анотація. Експлуатована 38 років на магістральному газопроводі трубна сталь 17Г1С з високим рівнем пластичності не зазнала відчутного водневого окрихчення за показниками пластичності. Водночас за випробувань методом J -інтеграла виявлено істотну чутливість сталі до водневої крихкості, яка зростала зі зменшенням швидкості навантаження зразків.

Ключові слова: трубна сталь, транспортування водню, водневе окрихчення, метод J -інтеграла, швидкість навантаження.

Hryhoriy Nykyforchyn, Ph.D., Prof.; Olha Zvirko, Ph.D., Prof.; Oleksandr Tsyurulnyk, Ph.D.; Oleh Venhryniuk

FEATURES OF THE APPLICATION OF APPROACHES OF FRACTURE MECHANICS FOR ASSESSMENT OF THE HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF EXPLOITED PIPELINE STEELS

Abstract. It was revealed that the low carbon pipeline steel after 38 years of operation on gas transit pipeline was not prone to hydrogen embrittlement at evaluating the plasticity indicators. However, a significant sensitivity of the steel to hydrogen embrittlement increasing with a decrease in the displacement rate of the specimens was observed using the J -integral method.

Keywords: pipeline steel, hydrogen transportation, hydrogen embrittlement, J -integral method, displacement rate.

Для оцінювання водневої крихкості конструкційних сталей розроблені різні способи [1], серед них ефективним вважається використання підходів механіки руйнування. Таку методологію досліджень застосовують і для трубних сталей, зокрема, з огляду встановлення деструктивного впливу наводнювання стінки труби з боку її зовнішньої поверхні на механічну поведінку матеріалу [2]. Останнім часом особливу увагу звертають на проблему водневої крихкості газопровідних сталей, пов'язану з транспортуванням існуючою мережею газопроводів водню чи суміші природного газу з воднем [3]. Це важливий аспект в енергетичній безпеці України, який супроводжується низкою викликів, пов'язаних з можливим порушенням цілісності труб через негативний вплив водню з боку їх внутрішньої поверхні [4]. До них належить підвищена наводнювальна здатність транспортованого середовища через інтенсифікацію як електрохімічного процесу виділення водню, так і дисоціації молекулярного водню [5, 6].

Використання існуючої газотранспортної мережі для транспортування водню зумовлює також необхідність врахування експлуатаційної деградації металу труб, яка посилює його чутливість до водневої крихкості [7, 8]. Це актуалізує оцінювання стану сталей з використанням підходів механіки руйнування, зокрема, в'язкості руйнування як механічного показника, особливо чутливого до наводнювання металу в околі вершини тріщини. Зазначимо також, що рівень в'язкості руйнування може слугувати і

розрахунковим параметром, що обмежує діаграми втомного руйнування з боку максимальних значень показника напружено-деформованого стану в околі вершини тріщини, характеризуючи механічну умову переходу від субкритичного до неконтрольованого її росту. З огляду на такий аналіз для оцінювання водневої крихкості експлуатованих трубних сталей у роботі використали підходи механіки руйнування.

Дослідили трубну сталь 17Г1С, аналог сталі API 5L X52, експлуатовану на магістральному газопроводі впродовж 38 років. Порівняли пластичність і в'язкість руйнування сталі за випроб зразків у повітрі без та після електролітичного наводнювання, яке реалізували в електроліті (водний розчин H_2SO_4 з $pH = 1$ з добавкою 10 г/л тіосечовини) за густини струму $0,05 \text{ mA/cm}^2$. Тривалість електролітичного наводнювання складала 50 год.

Вплив попереднього електролітичного наводнювання на пластичність сталі визначали за одновісного розтягу циліндричних зразків діаметром робочої частини 5 мм та довжиною 25 мм за типової для таких експериментів швидкості навантаження $3 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$. Експерименти не виявили значного прояву водневої крихкості: відносне звуження дещо знизилося, від 68% до 66%, а відносне видовження на рівні 25% взагалі не зазнало змін.

Враховуючи підвищену пластичність сталі, використали метод J -інтеграла [9] як один із методів нелінійної механіки руйнування для визначення в'язкості руйнування сталі. Навантажували триточковим згином балкові зразки товщиною 4 мм, в яких попередньо створювали втомні тріщини. Швидкість навантаження (прогину) ненаводнених зразків була типовою для таких експериментів 0,5 мм/хв, тоді як після наводнювання застосували різні швидкості: 0,5, 0,05 і 0,005 мм/хв. Випроб супроводжували реєстрацією діаграм зосереджена сила – прогин зразка, що склало основу для визначення рівня складової J -інтеграла в її нелінійній частині. Інший важливий показник, приріст тріщини в результаті активного статичного навантаження, визначали методом теплового відтінювання. За рівень в'язкості руйнування приймали значення J -інтеграла за приросту тріщини 0,2 мм ($J_{0,2}$). Результати експериментів наведені у таблиці.

Таблиця. В'язкість руйнування $J_{0,2}$ (Н/мм) експлуатованої сталі

Стан сталі	Швидкість навантаження, мм/хв		
	0,5	0,05	0,005
Без наводнювання	108	–	–
Після наводнювання	59	38	31

Окрихчувальний вплив водню трансформувал діаграми навантаження у бік зменшення ділянки відхилення від лінійності для заданого приросту тріщини, однак не такою мірою, щоби мати підстави для використання підходів лінійної механіки руйнування.

В таблиці наведено оцінки в'язкості руйнування експлуатованої сталі 17Г1С з урахуванням її наводнювання та різної швидкості навантаження зразків. Відзначимо, насамперед, істотне, майже вдвічі, зниження рівня $J_{0,2}$ навіть за порівняно високої швидкості навантаження 0,05 мм/хв, що вказує на високу чутливість використаного показника нелінійної механіки руйнування до окрихчувальної дії водню.

Зменшення швидкості навантаження посилює ефект водню і при мінімальній швидкості тріщиностійкість сталі падає втричі. Однак можна очікувати, що подальше зменшення швидкості зумовить втрату такого впливу, а то і протилежного ефекту зростання рівня тріщиностійкості. Справа в тому, що зменшення швидкості

навантаження супроводжується збільшенням тривалості експерименту, що означає покращення умов для десорбції водню з металу, тобто зниження в ньому його концентрації.

Таким чином, зменшуючи швидкість навантаження зразків при визначенні впливу попереднього наводнювання на тріщиностійкість сталей, необхідно враховувати перебіг двох протилежних процесів, з одного боку, покращені умови для транспорту водню в зону передруйнування в околі вершини тріщини, а з іншого – зниження загальної концентрації водню в металі через його десорбцію.

Висновки.

Експлуатована трубна сталь 17Г1С магістрального газопроводу з високим рівнем пластичності виявила незначну чутливість до водневої крихкості за зміною характеристик пластичності за її попереднього електролітичного наводнювання. Випробування на в'язкість руйнування методом J -інтеграла виявили її істотну чутливість до водневої крихкості, особливо за нижчої швидкості навантаження зразків.

Дослідження проведені завдяки грантовій підтримці проєкту № 2022.01/0099 Національним фондом досліджень України.

Перелік посилань

1. Hydrogen embrittlement as a conspicuous material challenge – comprehensive review and future directions / H. Yu, A. Díaz, X. Lu et al. // *Chemical Reviews*. – 2024. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00624
2. Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel // H. Nykyforchyn, O. Tsyurulnyk, O. Zvirko, M. Hredil // *Procedia Struct. Integr.* – 2020. – 28. – P. 896–902.
3. Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen / M. Dadfarnia, P. Sofronis, J Brouwer., S. Sosa // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2019. – 44(21). – P. 10808–10822.
4. Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network / H. Nykyforchyn, L. Unigovskiy, O. Zvirko et al. // *Procedia Struct. Integr.* – 2021. – 33. – P. 646–651.
5. Методика оцінювання впливу газоподібного водню на корозію та наводнювання сталей / О. І. Звірко, М. І. Греділь, О. Т. Цирульник, О. І. Венгринюк, Г. М. Никифорчин // *Фіз-хім. механіка матеріалів*. – 2024. – № 5. – С. 10–17.
6. Effect of tensile stress on the hydrogen adsorption of X70 pipeline steel / Z. Xu, P. Zhang, B. Zhang et al. // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2022. – 47(50). – P. 21582–21595.
7. Assessment of Operational Degradation of Pipeline Steels / H. Nykyforchyn, O Zvirko., I. Dzioba et al. // *Materials*. – 2021. – 14, 12:3247.
8. Zvirko O. I. In-service degradation of structural steels (A Survey) // *Mater. Sci.* – 2022. – 57(3). – P. 319–330.
9. Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness. ASTM. E 813 / In: *Annual Book of ASTM Standards*. – Vol. 03.01. – P. 713–727.

УДК 621.326

Вячеслав Сидяченко, к.т.н., с.досл., Андрій Котляренко, к.т.н., с.досл.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ НА ЗРАЗКАХ З РІЗНОЮ СКУТІСТЮ ДЕФОРМАЦІЙ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРА РОЗКРИТТЯ ВЕРШИНИ ТРІЩИНИ

Анотація. Встановлено, що при двовісному згині хрестоподібного зразка з короткою тріщиною зменшується скутість деформацій у вершині тріщини порівняно з стандартними зразками на тріщиностійкість. Зміну скутості деформацій проаналізовано на основі параметра розкриття вершини тріщини.

Ключові слова: в'язкість руйнування, скутість деформацій, розкриття вершини тріщини.

Viacheslav Sidyachenko, Ph.D.; Andrii Kotliarenko, Ph.D.

STUDY OF STATIC FRACTURE TOUGHNESS ON SPECIMENS WITH DIFFERENT CONSTRAIN BASED ON THE CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT PARAMETER

Abstract. It was established that during biaxial bending of a cruciform specimen with a short crack, the constrain of the crack tip decreases compared to standard fracture toughness specimen. The change in the constrain was analyzed based on the crack tip opening parameter.

Key words: fracture toughness, constrain, crack tip opening displacement.

Скутість деформацій, що характеризується здатністю елемента конструкції з тріщиною чинити опір пластичній деформації в околі її вершини, впливає на величину в'язкості руйнування матеріалів. Стандартні зразки з глибокою тріщиною на відцентровий розтяг C(T) і на триточковий згин SEN(B) мають високий ступінь тривісності напружень і відповідно рівень скутості деформацій в околі вершини тріщини, що забезпечує визначення нижньої огинаючої в'язкості руйнування. Для уточнення оцінки цілісності елемента конструкції з тріщиною необхідно розробити методологію розрахунку скутості деформацій у відповідності до геометрії зразка і типу навантаження. В даний час широко застосовуються параметри, що характеризують скутість деформацій у вершині тріщини на зразках при одновісному навантаженні, наприклад T -stress, A_2 , Q -stress, h , T_z [1]. Однак, двовісне навантаження, що діє на береги тріщини в ряді конструкційних елементів може спричинити зміну скутості деформацій, що може призвести як до надмірного консерватизму при розрахунках несучої здатності елемента конструкції з тріщиною так і навпаки.

Автори [2] запропонували параметр $\varphi = A_C / A_{Cref}$, де A_C – площа пластичної зони при руйнуванні, A_{Cref} – площа пластичної зони при руйнуванні референсного зразка, тобто зразка з максимальною скутістю деформацій. Проте застосування параметра φ для аналізу руйнування зразка при двовісному навантаженні не продемонструвало задовільного результату [1].

Один з найбільш цитованих в науковій літературі сучасних універсальних параметрів для характеристики скутості деформацій базується на розкритті вершини тріщини і визначається як відношення розкриття в зразку або елементі конструкції δ до розкриття в стандартному зразку (референсному) при плоскій деформації δ_{ref} при одному і тому рівні J -інтегралу, тобто при визначеній в'язкості руйнування при плоскій деформації (J_{ref}) [3, 4]. Для експериментальних даних, отриманих на матеріалах різних

класів, автори запропонували емпіричну кореляційну залежність для визначення в'язкості руйнування (J_c) в елементі конструкції за відомим значенням скутості деформацій A_d^* :

$$J_c = J_{ref} + 367.6[(A_d^* - 1) + 0.983]^{3.28} - 374.16, \quad (1)$$

де A_d^* визначається чисельно:

$$A_d^* = \delta_J / \delta_{Jref}.$$

Аналогічно на основі параметра A_d^* при узагальненні даних матеріалів різних класів пропонується визначити температуру T_0 :

$$T_0 = T_{0ref} - 170.3(A_d^* - 1), \quad (2)$$

де T_{0ref} – температура визначена за стандартом ASTM1921 на CT-1 зразках.

В даній роботі було здійснено верифікацію параметра A_d^* (1) для прогнозування в'язкості руйнування, що визначалась експериментально для сталі 15X2НМФАА на зразках з різною скутістю деформацій. В'язкість руйнування визначали на зразках: CT-1 (компактний стандартний зразок з довжиною тріщини $a/W=0,5$), SENT, з розміром поперечного перерізу 17×30 мм (зразок з крайовою тріщиною на розтяг, $a/W=0,5$), SENT 10×18 мм (зразок з крайовою тріщиною на розтяг, $a/W=0,5$), SENB 10×18 мм (зразок з крайовою тріщиною на триточковий згин, $a/W=0,133$) і CRSEN (хрестоподібний зразок на п'ятиточковий згин, $a/W=0,1$).

Експериментальні дані по в'язкості руйнування для CRSEN, SENB (10×18 мм, $a/W=0,133$), а також температурна залежність в'язкості руйнування для тріщин нормального відриву (Майстер крива) сталі 15X2НМФАА було запозичено з роботи [5] (рис.1). Оскільки CRSEN – хрестоподібний зразок на двовісний згин не є стандартним, на рис. 2 показано схему його навантаження при визначенні в'язкості руйнування.

Для побудови залежності розкриття вершини тріщини δ від J – інтегралу виконували для кожного з вищенаведених зразків скінчено-елементне моделювання в пружно-пластичній геометрично нелінійній постановці. На рис.3 (а-в) показано скінчено-елементні моделі зразків. Розмір скінчених елементів в околі вершини тріщини для всіх зразків був приблизно однаковий і за рекомендаціями роботи [3] становив $0,001$ мм. За методикою, викладеною в [3,4], обчислювали розкриття вершини тріщини δ_J , як відстань між точкою перетину прямої, проведеної з вершини тріщини з берегом тріщини, до горизонталі, як показано на рис. 4.

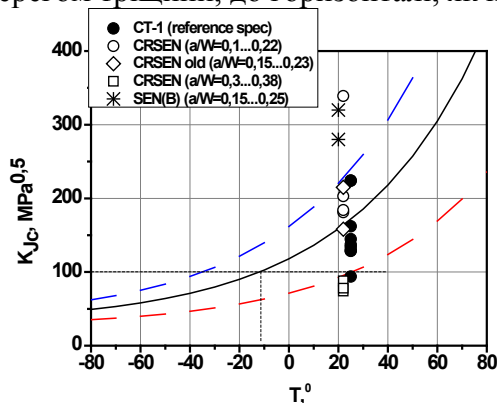


Рис.1. Майстер крива для сталі 15X2НМФА-А, побудована на CT-1 зразках, в'язкість руйнування на триточковий згин (SENB) і при двовісному згині (CRSEN) перераховані за стандартом ASTM E 1921–17a на CT-1 зразки.

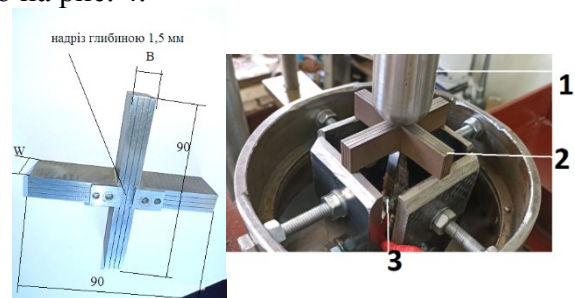


Рис.2. Схема навантаження малогабаритного хрестоподібного зразка на п'ятиточковий згин при статичних випробуваннях на в'язкість руйнування: 1 – навантажуючий шток, 2 – CRSEN зразок, 3 – екстензометр для реєстрації розкриття берегів тріщини.

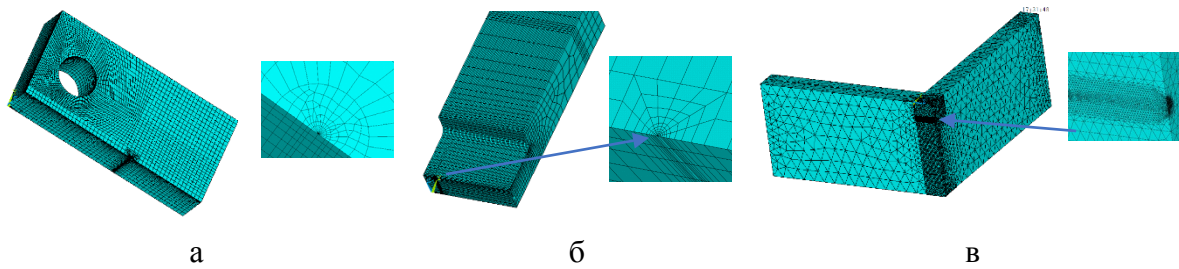


Рис.3. Скінчено-елементні моделі зразків: (а) на відцентровий згин (СТ-1), $a/W=0,5$; (б) на триточковий згин, $a/W=0,13$ (SEN(B)); (в) на двовісний згин, $a/W=0,15$ (CRSEN).

Для визначення параметра A_{α}^* за формулою (1) будували залежність $\delta/2$ від J – інтегралу (рис.5). Визначені величини в'язкості руйнування K_{Jc} , перераховані за J – інтегралом, для кожного зразку, а також параметр A_{α} наведено в табл.1, де відстежується певна закономірність: зі збільшенням скутості деформації зменшується параметр A_{α} і відповідно в'язкість руйнування. Так для SENB з короткою $a/W=0,133$ тріщиною в'язкість руйнування була максимальна, так як і параметр A_{α} . А двовісний згин хрестоподібного зразка CRSEN з короткою тріщиною $a/W=0,15$ дещо збільшує скутість деформацій і зменшує параметр A_{α}^* . Дані табл.1 засвідчили, що для уточнення розрахунку параметра A_{α}^* необхідно для хрестоподібного зразка CRSEN виконати розрахунки розкриття δ з використанням регулярної сітки в околі вершини тріщини.

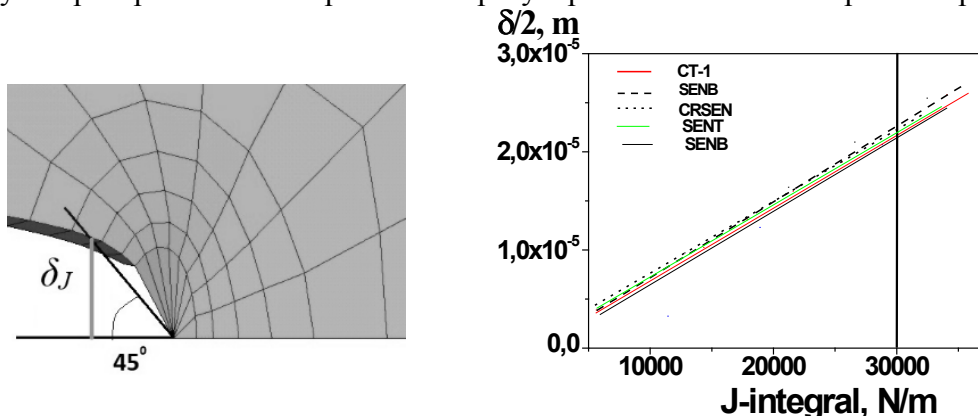


Рис.4. Чисельне визначення розкриття вершини тріщини.

Рис.5. Залежність J -інтегралу від розкриття вершини тріщини.

Таблиця 1 Результати аналізу скутості деформацій за параметром A_{α}^*

Тип зразка	CT-1, $a/W=0,5$	SENB, $a/W=0,15$	CRSEN, $a/W=0,15$	SENT, 17x30 мм, $a/W=0,5$	SENT, 10x18 мм, $a/W=0,5$
$K_{Jc}, MPa^{1/2}$ експер	130	280	200	120	150
$K_{Jc}, MPa^{1/2}$ розрах (1)	130	288	285	125	138
A_{α}^*	1	1,052	1,05	0,95	1,035

Порівнюючи дані для зразків різних розмірів з крайовою тріщиною на розтяг (SENT), можна помітити, що в'язкість руйнування і відповідно параметр скутості A_{α}^*

збільшується при зменшенні поперечного перерізу зразка, тобто зі зменшенням жорсткості напруженого стану в околі вершини тріщини.

Розрахункові значення K_{Jc} , оцінені за залежністю (1), показали відповідну закономірність з урахуванням полоси розкиду експериментальних результатів (табл.1).

За результатами скінченно-елементного моделювання зразків різної геометрії проаналізовано зміну параметра скрутності деформацій, що базується на розрахунках розкриття вершини тріщини нормального відриву та може застосовуватись в двопараметричних підходах для оцінки цілісності елементів конструкцій з урахуванням двовісності навантаження. Експериментально встановлено, що за умов мало масштабної текучості двовісне навантаження практично не впливає на величину характеристик тріщиностійкості, а за інших умов навпаки, причому вплив двовісності збільшується зі зменшенням відносної довжини тріщини. Зменшення в'язкості руйнування при двовісному згині у порівнянні з одновісним на малогабаритних хрестоподібних зразках узгоджується з даними отриманими раніше проф. Басом [6] на зразках товщиною 100 мм і пов'язане зі збільшенням скрутності деформацій по фронту тріщини при двовісному згині для коротких тріщин ($a/W < 0,2$). На основі експериментальних і чисельних досліджень визначено, що двовісне навантаження хрестоподібних зразків з короткою тріщиною ($a/W < 0,2$) зменшує температуру крихко-в'язкого переходу за Майстер кривою T_0 і відповідно знижує консерватизм оцінки T_0 на основі стандартних зразків на в'язкість руйнування.

Перелік посилань

1. Z. Chen, K. Kouzoumis, R. Kulka, I. Hadley, H. Coules, M. Mostafavi, "A novel unified constraint parameter based on plastic strain energy", *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 126, 103990 (2023).
2. M. Mostafavi, D.J. Smith, M.J. Pavier, "Reduction of measured toughness due to out-of-plane constraint in ductile fracture of aluminium alloy specimens", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 33 (11), 724–739 (2010).
3. J.Y. Xiao, G.Z. Wang, S.T. Tu, F.Z. Xuan, "Engineering estimation method of unified constraint parameters for semi-elliptical surface cracks in plates", *Eng. Fract. Mech.*, 229, 106935 (2020).
4. J.Y. Xiao, G.Z. Wang, J.X. Zhao, S.T. Tu, F.Z. Xuan, "A general correlation between ductile fracture toughness and unified constraint parameter for different materials", *Eng. Fract. Mech.*, 285, 109296, (2023).
5. Сидяченко В.Г., Котляренко А.А. Дослідження впливу коротких тріщин і двовісного навантаження на в'язкість руйнування корпусної реакторної сталі. Матеріали міжнародної наукової конференції "Актуальні проблеми механіки" до 145-річчя від дня народження С.П. Тимошенка (Електронний ресурс), Київ, Дніпро, Львів, Харків (2023), С.352-353.
6. B.R. Bass, W.J. McAfee, Paul Thomas Williams, W.E Pennell, "Fracture assessment of shallow-flaw cruciform beams tested under uniaxial and biaxial loading conditions", *Nuclear Eng. And Desing.* 188, 259-288 (1999).

УДК 629.7.036.34

Олег Добриденко, к.т.н., с.н.с.; Максим Стрела, Ph.D.

Державний науково-дослідний інститут авіації, Україна

**ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ
КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ
ВИКОНАННІ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОБІТ З ПРОДОВЖЕННЯ (ЗБІЛЬШЕННЯ)
РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ**

Анотація. За часи незалежності України в її державній авіації створено дієву систему підтримання справності авіаційної техніки та її комплектувальних виробів шляхом безпечного продовження (збільшення) ресурсних показників під час виконання ремонтних робіт на авіаційних ремонтних підприємствах. В статті розглянуто авторська методика виконання досліджень щодо визначення можливості продовження (збільшення) ресурсних показників виробам авіаційній техніці, за якими не здійснюється авторський нагляд. Зазначена методика має на озброєнні два основних напрямки: дослідження напружено-деформованого стану та експлуатаційно-статистичні дослідження. Найбільш детально та предметно розглянуто другу частину досліджень (експлуатаційно-статистичних), які складаються з методу кластеризації FOREL-I та статистичного методу розпізнавання образів. Наведено застосування зазначеного методу на п'яти літаках тактичної авіації, на яких виконувався капітальний ремонт та які потребували продовження (збільшення) ресурсних показників.

Ключові слова: продовження ресурсних показників, літаки тактичної авіації, класифікація технічного стану.

Oleg Dobridenko, Ph.D.; Maxim Strela, Ph.D.

**EXPERIENCE OF USING AND FEATURES OF APPLICATION OF THE
METHOD OF CLASSIFICATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF
AVIATION EQUIPMENT WHEN PERFORMING RESEARCH AND WORK ON
CONTINUATION (INCREASING) OF RESOURCE INDICATORS**

Abstract. During the time of Ukraine's independence, its state aviation created an effective system for maintaining the serviceability of aviation equipment and its components by safely extending (increasing) resource indicators during repair work at aviation repair enterprises. The article examines the author's method of carrying out research on determining the possibility of extending (increasing) the resource indicators of aircraft products, which are not supervised by the author. The specified technique has two main directions: stress-strain state research and operational-statistical research. The second part of the research (operational-statistical), which consists of the FOREL-I clustering method and the statistical method of pattern recognition, was considered in the most detailed and objective manner. The application of the specified method on five tactical aviation aircraft, which were overhauled and required an extension (increase) of resource indicators, is presented.

Keywords: continuation of resource indicators, tactical aircraft, classification of technical condition.

В галузі державної авіації України за часи незалежності створено дієву національну систему підтримання справності та льотної придатності авіаційної техніки, яка представляє собою замкнені науково, виробничо-технологічно, нормативно і методично забезпечені цикли її ремонту та продовження строків служби і збільшення ресурсу, переведення та супроводження її експлуатації за технічним станом. Вона базується на відповідній законодавчій та нормативно-правовій базі України, яка

регулює суспільні відносини її суб'єктів. До зазначеної системи входять органи державної влади, органи військового управління, підприємства авіаційної галузі та авіаремонтні заводи Акціонерного товариства “Українська оборонна промисловість”, галузеві науково-дослідні установи, головною з яких є Державний науково-дослідний інститут авіації (далі – ДНДІА), інститути Національної академії наук України, а також авіаційні частини, які безпосередньо здійснюють експлуатацію авіаційної техніки.

В свою чергу, ДНДІА виконує одну із найактуальніших задач сучасності в державній авіації України – продовження (збільшення) ресурсних показників авіаційної техніки (далі – АТ), за якими не здійснюється авторський нагляд.

Актуальність зазначених досліджень полягає в питанні значного вичерпання строків служби та ресурсів як планера в цілому, так і окремих його агрегатів, особливо тих, ресурс яких відрізняється від ресурсу планера. Ця проблема склалась на тих літальних апаратах (далі – ЛА), експлуатація яких не супроводжується Розробником.

В ході досліджень виявлено, що за наявних вхідних даних, дослідження напружено-деформованого стану можуть якісно надавати можливість отримувати інформацію щодо критичних точок в авіаційних конструкціях, в яких з найбільшою вірогідністю виникне дефект (втомна тріщина, руйнування). Експлуатаційно-статистичні дослідження, за наявності таких самих вхідних даних, надають можливість сформулювати повноцінні еталонні образи технічного стану, а саме технічно справного із запасом технічно-безпечного конструктивного ресурсу та технічно-небезпечного і забороненого до подальшої експлуатації. Цей факт дозволив виконати спробу визначати належність образу досліджуваної АТ до одного з образів технічного стану, що наведені вище. Також зазначені математичні дослідження підкріплюються методом експертів на стадії обговорення результатів. В загальному вигляді ця методика зображена на рисунку 1.

Зазвичай, дослідження напружено-деформованого стану достатньо виконати один раз, на першій ітерації досліджень об'єкта щодо можливості продовження призначених показників. Щодо виконання експлуатаційно-статистичних досліджень – їх потреба виникає під час кожної ітерації досліджень на об'єкті щодо можливості продовження призначених показників. Обумовлено це тим, що на кожен нову ітерацію об'єкт досліджень отримував нові впливи, які необхідно враховувати (години нальоту, кількість посадок, змінення параметрів матеріалу та інше). Саме тому в доповіді приділяється увага саме експлуатаційно-статистичним дослідженням.

Відповідно до методики, що наведена на рисунку 1, експлуатаційно-статистичні дослідження використовують методи кластеризації (FOREL-I) та класифікації технічного стану (статистичний метод розпізнавання образів). Впродовж року на авіаційно-ремонтні підприємства України надійшло на ремонт п'ять літаків тактичної авіації (досліджувані літаки: L_1, L_2, L_3, L_4, L_5). Літаки вичерпали свої ресурсні показники потребували виконання капітального ремонту. ДНДІА виконувало науково-технічне супроводження робіт і досліджень щодо можливості збільшення призначеного строку служби та встановлення нового міжремонтного ресурсу планеру, а також продовження призначеного строку служби і збільшення призначеного ресурсу агрегатам шасійної групи.

Для виконання досліджень за методом кластеризації “FOREL-I” та статистичного методу розпізнавання образів для кожного досліджуваного літака обрано від 12 до 15 літаків одного з ним типу, які експлуатуються та мають запаси ресурсних показників. В якості визначальних параметрів, які найбільш впливають на визначення його технічного стану обрано – повний строк служби літака у роках $T_{сс,роки}$, напрацювання з початку експлуатації у годинах нальоту $N_{снэ,год}$ та інтенсивність експлуатації $\alpha_{год/роки}$, що дорівнює відношенню напрацювання з початку

експлуатації до повного строку служби.

Виконання досліджень за методом кластеризації “FOREL-I” дозволило розділити літаки на два образи технічного стану, а саме стани “добрі” та “граничні” (рис. 2).

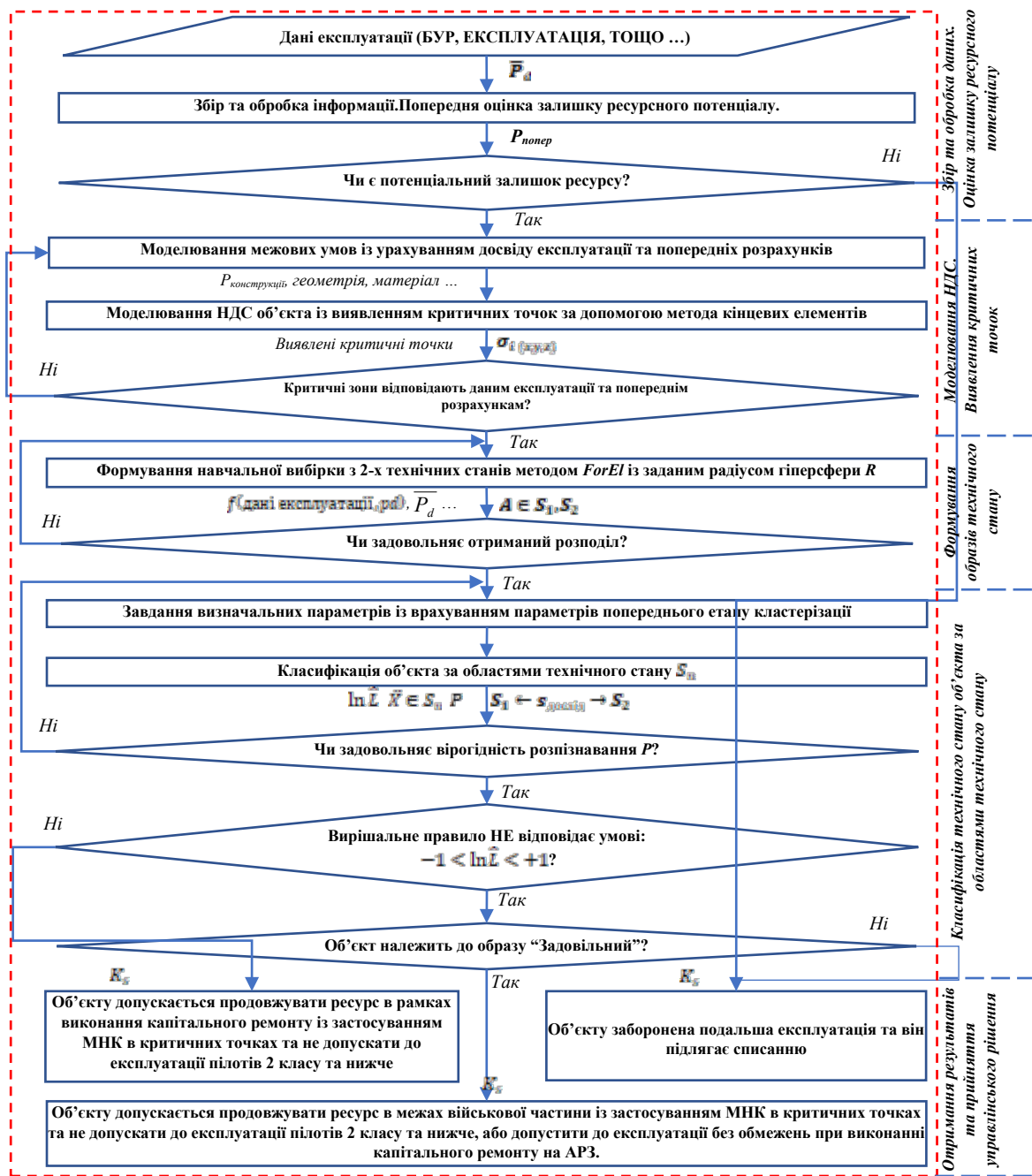


Рисунок 1 – Методика виконання досліджень для визначення можливості подальшої експлуатації досліджуваного об'єкта за межами призначених ресурсних показників

Виконання досліджень за статистичним методом розпізнавання образів дозволило віднести досліджувані літаки до одного з технічних образів, “добрих” або “граничних” (рис. 3).

Виконання досліджень за розглянутою методикою для визначення можливості продовження ресурсних показників підтвердило свою ефективність на практиці. Завдяки проведеним раніше дослідженням напружено-деформованого стану, на літаках

виявлено низку критичних місць, за якими виконується додатковий огляд під час експлуатації. Вищезазначені літаки наразі експлуатуються в Повітряних Силах Збройних Сил України і виконують бойові завдання.

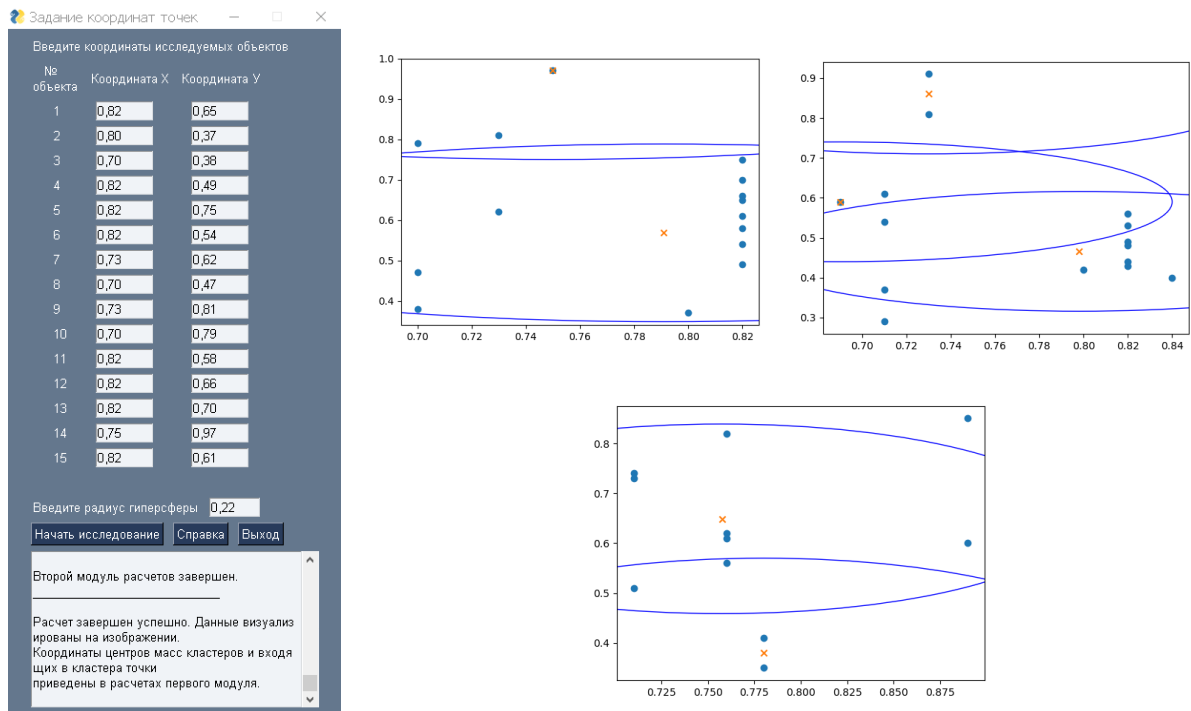
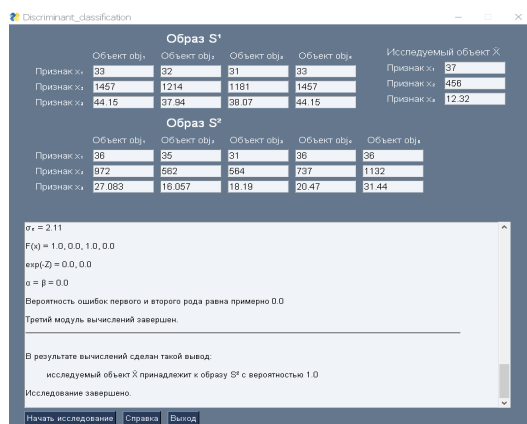


Рисунок 2 – Робочий інтерфейс програми кластеризації “FOREL-I” та результат кластеризації із обраних літаків



Досліджуваний літак	Значення $\ln \hat{L}$	Належність до класу	Вірогідність розпізнавання
L_1	-84,562	Добрі	1,0
L_2	-52,388	Добрі	0,99
L_3	19,883	Граничні	0,99
L_4	-47,67	Добрі	0,99
L_5	-6,6704	Добрі	0,83

Рисунок 3 – Робочий інтерфейс програми статистичного розпізнавання образів із введеними даними та отриманими розрахунками

Зазначена методика має перспективи розвитку в таких напрямках: перший напрямок – це подальше удосконалення програмного забезпечення (перш за все – це реалізація принципу “нуль-один-безліч” в другому алгоритмі та вивід більш якісного зображення в першому алгоритмі); другий напрямок – потребує проведення окремих досліджень, що дозволить більш якісно з’ясувати визначальні параметри різних типів літаків із різною вхідною інформацією.

УДК 539.432

Георгій Цибаньов, д.т.н.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ОПИС ЗАРОДЖЕННЯ І РОСТУ ТРІЩИНИ ВТОМИ З ГЛАДКОЇ ПОВЕРХНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ КРИВОЇ ВТОМИ

Анотація. Раніше нами запропоновано розрахункову побудову лінії Френча (ЛФ), довговічності до якої прийнято за момент зародження тріщини, яка проросла від поверхні гладкого зразка до міцного бар'єру – границі зерна полікристала. Опис росту тріщини до ЛФ і після неї виконано степеневою функцією, яка використовує параметри запропонованої кривої втоми. За прийнятого розміру вихідного дефекту, визначеного розміру структурної одиниці (розміру зерна), відомого чи розрахованого розміру тріщини перед остаточним руйнуванням розрахована кінетика росту тріщини.

Ключові слова: зародження і ріст втомної тріщини; структурний бар'єр; опис кінетики росту коротких тріщин.

Georgiy Tsybanyov, Ph.D.

DESCRIPTION OF FATIGUE CRACK NUCLEATION AND GROWTH FROM A SMOOTH SURFACE USING FATIGUE CURVE PARAMETERS

Abstract. This paper presents a method for describing the stages of fatigue crack nucleation and initial growth in a smooth specimen. For this purpose, the parameters of the French line, the modified fatigue curve and the characteristic structural size of the polycrystal were used.

Key words: fatigue crack nucleation and growth; structural barrier; description of short crack growth kinetics.

Вступ. За багатоциклової втоми вихідна інформація про властивості матеріалу представляється кривою втоми за симетричного циклу навантаження. Однак, дослідження процесу втоми за останні роки свідчать про недостатність такої оцінки з огляду на те, що представлена у такому вигляді довговічність містить сумарне циклічне пошкодження на різних стадіях втоми, які розрізняються своїми механізмами пошкодження. Основні стадії втоми, які визначають багатоциклову довговічність матеріалів, - це інкубація тріщини і її послідовний ріст за механізмом короткої тріщини, що утруднює використання методів лінійної механіки руйнування у зв'язку з недотриманням її постулатів. У цьому зв'язку запропоновано підхід до використання параметрів модифікованої кривої втоми для визначення стадії інкубації тріщини та кінетики її росту за механізмом короткої тріщини.

Залежності для опису інкубації і росту тріщини. В роботі [1] нами представлено моделювання втомного пошкодження сталей за багатоциклового навантаження гладких зразків, де за параметр пошкодження прийнято зміну границі витривалості у процесі втоми з розрахунковим визначенням її поточного значення. Так як стандартно визначена границя витривалості матеріалу представляє собою напруження, за якого не розповсюджується мікротріщина, яка зародилася у процесі циклічного напруження до бази випробувань, то очевидно, що до початку циклічного навантаження, коли тріщина ще відсутня, границя витривалості у матеріалу була б вищою, ніж після зародження мікротріщини. Виходячи з такого уявлення і базуючись на літературних джерелах, запропоновано залежності для опису поточного зниження границі витривалості у процесі втоми: від вихідної величини до стандартно визначеної – як стадія інкубації тріщини, і далі від цієї величини і до руйнування. Довговічність до моменту інкубації тріщини визначається розрахунковою ЛФ і пов'язана з проростанням

мікротріщини від початкового дефекту через слабкі мікроструктурні бар'єри (границі субструктури) до міцного бар'єру – границі зерна. За напружень вище границі витривалості після проходження границі зерна йде подальше зниження границі витривалості, обумовлене ростом короткої тріщини.

Опис кінетики росту тріщини a_{1c} на стадії інкубації (від $n=0$ до $n = N_{Fr}$, N_{Fr} – довговічність до лінії Френча, n – поточна кількість циклів навантаження) прийнято у вигляді степеневої функції, подібної до використаної у [1]:

$$a_{1c} = a_0 \cdot \left(c - \frac{b_1 n}{N} \right)^k, \quad (1)$$

де a_0 – початковий дефект при $n=0$, з якого проходить інкубація початкової тріщини; $c = 1$ одержано за умови $n=0$; b_1 – коефіцієнт порохований за умови $a_{1c} = a_d$ при $n = N_{Fr}$; a_d – розмір мікротріщини на границі витривалості; k – показник степеню у модифікованій кривій втоми.

На другій стадії ріст тріщини a_{2c} (від $n = N_{Fr}$ до $n=N$) описано за залежністю:

$$a_{2c} = a_d \cdot \left(c - \frac{b_2 n}{N} \right)^k, \quad (2)$$

де постійні c і b_2 визначені за умов $a_{2c} = a_d$ при $n = N_{Fr}$ та $a_{2c} = a_f$ при $n=N$, a_f – розмір тріщини при руйнуванні зразка.

З використанням наведених залежностей виконано розрахунки кінетики росту тріщин у гладких зразках і наведено порівняння з експериментальними даними роботи [2] для сталі 34CrMo4 (рис. 1). Такі ж розрахунки виконані для першої стадії втоми.

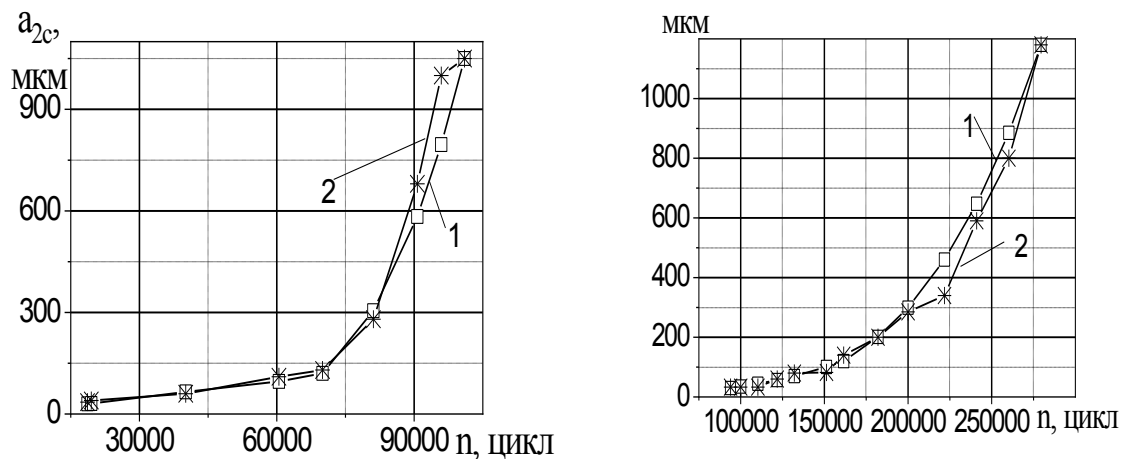


Рис.1. Розрахункова (1) і експериментальна (2) кінетика росту тріщини за залежністю (2) при $\sigma_a = 348,44$ МПа, $N = 101000$ цикл (а) і $\sigma_a = 313,32$ МПа, $N = 279500$ цикл.

Як видно з наведених рисунків, запропонований метод опису росту коротких тріщин у гладкому зразку дозволяє описати експериментальні дані з задовільним наближенням, що дозволяє вести розрахунковий моніторинг втомного пошкодження.

Перелік посилань

1. Цибаньов Г.В., “Розрахункове визначення лінії Френча (ЛФ) сталей з використанням експериментальних даних для побудови кривої втоми. Повід.2. Конкретизація методу та оцінка похибок розрахунку”, Пробл. міцн., №4, 2023, с. 39-46.
2. Polak J. Plastic strain-controlled short crack growth and fatigue life, Int. Journ. Fatigue, 27, 2005, p. 1192–1201.

УДК 620.192.49

Павло Марущак, д.т.н., проф.; Володимир Дзюра, д.т.н., проф.; Олена Марущак
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

БАГАТОМАСШТАБНА КЛАСИФІКАЦІЯ МОРФОЛОГІЧНИХ СКЛАДОВИХ ПОВЕРХНІ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ

Розглянуто алгоритми розпізнавання та обчислення параметрів втомних борозенок, що забезпечило можливість порівняння їх функціональності для забезпечення достовірності фрактографічного контролю стадійності росту втомних тріщин в полікристалічних матеріалах.

Ключові слова: фрактографія, втомні борозенки, циклічна тріщиностійкість

Pavlo Maruschak, Volodymyr Dzyura, Olena Maruschak

MULTI-SCALE CLASSIFICATION OF MORPHOLOGICAL COMPONENT SURFACES OF FATIGUE DESTRUCTION

Algorithms for recognizing and calculating the parameters of fatigue striations were considered, which provided an opportunity to compare their functionality to ensure the reliability of fractographic control of the stages of fatigue cracks growth in polycrystalline materials.

Key words: failure analysis, fatigue striations, fatigue crack resistance.

Аналіз залишкової довговічності конструкцій тривалої експлуатації, збільшення ресурсу роботи, прогнозування їх роботоздатності за циклічного навантаження потребують дослідження, узагальнення та накопичення даних про циклічну тріщиностійкість, кінетику і мікромеханізми руйнування матеріалів. Особливу роль при цьому відіграють методи фрактографічного аналізу, які забезпечують фізико-механічну інтерпретацію параметрів циклічної тріщиностійкості визначених за кінетичною діаграмою втомного руйнування. Кількісний фрактографічний аналіз різних зон втомного руйнування зосереджений на виявленні зв'язку мікроструктури матеріалу з його міцністю та здатністю опиратися поширенню тріщини. Одним з пріоритетних напрямків аналізу поверхонь втомного руйнування є застосування методів машинного навчання, які забезпечують можливість автоматизувати процес вилучення кількісної інформації з зображень одержаних методами скануючої електронної мікроскопії.

Метою даного огляду є систематизація наявних методів досліджень механізмів РВТ та кількісного аналізу втомних борозенок автоматизованими та інтелектуалізованими методами. Інформативність кількісного фрактографічного аналізу зростає за умови наявності на кожному структурному рівні притаманних йому елементів рельєфу, які є складовими морфології зламу для певного масштабу, рис. 2.

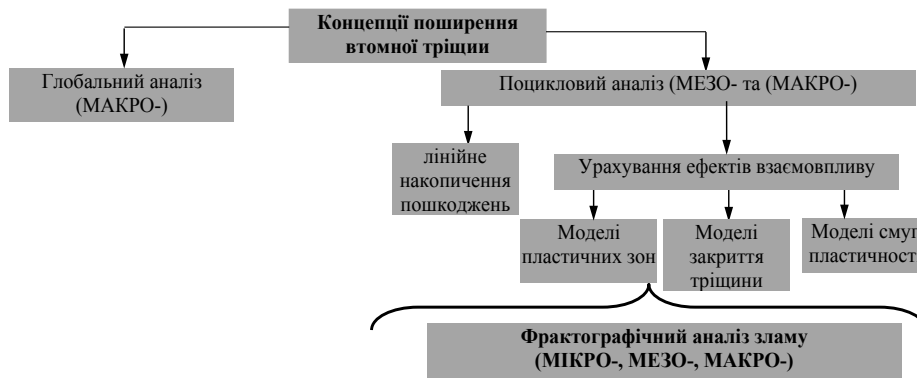


Рис. 1. Схема опису тріщиностійкості полікристалічного зразка та відповідні масштабні рівні опису процесів деформування і руйнування

Злам при цьому є своєрідним накопичувачем інформації, який містить дані про мікромеханізми руйнування матеріалу на різних масштабних рівнях. Втомний злам з одного боку відображає мікромеханізми руйнування матеріалу в локальному об'ємі, а з іншого дозволяє встановити причини поломки аналізованого об'єкту. Закономірності РВТ на макрорівні, аналізували ґрунтуючись на кінетичних діаграмах втомного руйнування матеріалу, на яких експериментальні результати представлені в координатах: «швидкість РВТ - розмах коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН) у вершині втомної тріщини».

Встановлено, що РВТ притаманні такі закономірності:

- поширення втомної тріщини є дискретним процесом;
- одним з основних механізмів періодичного підростання втомної тріщини є втомні борозенки.
- геометричні параметри втомних борозенок визначаються НДС у вершині тріщини під час її поширення та параметрами циклічного навантаження (частотою, асиметрією, тощо)

Вивчення взаємозв'язку макро-, мезо- та мікрорівнів руйнування потребує розроблення нових інструментальних методів, що описують морфологічні характеристики процесу, рис. 2. Тому, фрактографічний аналіз зламу є «розшифруванням» цього запису. Важливо наголосити, що термін «мікрофрактографія» традиційно використовують без виділення мезоскопічного рівня. Разом з тим, його введення відіграє важливу роль в аналізі руйнування, і забезпечує глибшу систематизацію морфологічних утворень аналізованих поверхонь РВТ, рис. 2.

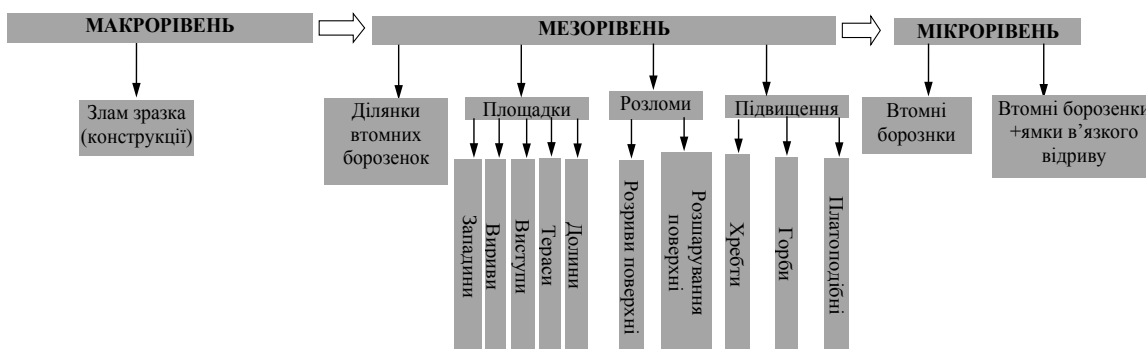


Рис. 2. Схема структурних рівнів руйнування при РВТ та притаманні їм морфологічні утворення зламу

Слід зазначити, що аналізований фрагмент поверхні руйнування на мікрорівні є локальною ділянкою, а втомні борозенки не завжди мали чіткий профіль. Загалом поширення тріщини є набагато складнішим явищем, ніж просто формування смуг просування тріщини з чітко визначеним інтервалом, що помітно з невідповідностей між кроком втомних борозенок та макроскопічною швидкістю росту тріщини. РВТ супроводжувався формуванням розривів у різних площинах, виникненням вторинних мікротріщин. Саме тому мезорельєф поверхні руйнування займає проміжне місце між макро- та мікрорівнем.

За результатами огляду та систематизації наявних досліджень механізмів поширення втомних тріщин в полікристалічних матеріалах та кількісного аналізу втомних борозенок було систематизовано:

- методологічні особливості фактографічного опису механізмів РВТ на макро, мезо- та мікрорівнях, охарактеризовано їх ознаки та параметри, проаналізовано механізми формування та сформульовано методологічні вимоги до вимірювання;

- ручні та автоматизовані описи зламів та морфологічних структур на основі візуального співставлення та порівняння елементів будови поверхні руйнування, це забезпечило можливості їх кількісного опису та оцінювання;

- методи визначення геометричних характеристик і структурно-лінгвістичного опису морфології зламів поверхні РВТ, що створило передумови їх уніфікованого оцінювання та стандартизацію параметрів, які їх характеризують;

Секція: НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН

УДК 620.178.15/179.119

Павло Булах, к.т.н.; Володимир Швець, к.т.н.; Анатолій Рутковський, к.т.н.; Володимир Данилюк, к.т.н.; Євген Кондряков, к.т.н.; Андрій Котляренко, к.т.н.
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРУБЧАТИХ ЗРАЗКІВ ІЗ СТАЛІ 40ХН2МА

Анотація. Приведено результати досліджень щодо оцінки впливу різних режимів обробки за технологією іонно-плазмового азотування на підвищення зносо- та корозійної стійкості зразків трубчастих елементів конструкції виготовлених із сталі 40ХН2МА, що працюють в умовах динамічного, термоциклічного навантаження та впливу навколишнього середовища.

Ключові слова: однорідність, модифікований шар, іонно-плазмово азотування, корозійна стійкість, зносостійкість, твердість, метод LM-твердості.

Pavlo Bulakh, Ph.D.; Volodymyr Svhets, Ph.D.; Anatolii Rutkovskiy, Ph.D.; Volodymyr Danylyuk, Ph.D.; Ievgen Kondryakov, Ph.D.; Andrii Kotliarenko, Ph.D.

ASSESSING THE EFFECT OF ION-PLASMA THERMOCYCLIC NITRIDATION ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF TUBULAR SAMPLES MADE FROM 40KH2MA STEEL

Abstract. The results of studies on the assessment of the impact of different treatment regimes using ion-plasma nitriding technology on the enhancement of wear and corrosion resistance of samples of tubular structural elements made of 40XH2MA steel, which operate under conditions of dynamic, thermocyclic loading, and environmental exposure, are presented.

Keywords: homogeneity, modified layer, ion-plasma nitriding, corrosion resistance, wear resistance, hardness, LM-hardness method.

Особливі екстремальні умови експлуатації вузлів та агрегатів різної техніки призводять до зменшення строку їх надійної експлуатації, тому в теперішній час продовжують розвиватись методи підвищення їх міцності, зокрема, шляхом зміцнення поверхневого шару з використанням новітніх методів модифікування поверхні матеріалу, що за рахунок дифузійних процесів дозволяють формувати необхідні зміни властивостей матеріалу у глиб від поверхні деталі на зазначену відстань.

Для зміни механічних властивостей поверхневого шару металу елементів конструкцій в Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України була розроблена технологія іонного-плазмового термоциклічного азотування (ІПТА) [1, 2], яка має ряд основних переваг порівняно з відомими методами азотування, а саме: висока якість зміцненого модифікованого поверхневого шару і відсутність деформації деталі після застосування процесу; прискорення загальної тривалості процедури обробки і, як наслідок, зниження енерговитрат.

В представленому дослідженні вирішується задача підвищення зносо- та корозійної стійкості зразків трубчастих елементів конструкції виготовлених із сталі 40ХН2МА ($D=28$ мм, $\delta=10$ мм) (рис.1), що працюють в умовах динамічного і термоциклічного навантаження, а також додаткового впливу навколишнього середовища. Під дією представлених вище умов роботи, елементи конструкції змінюють свої робочі характеристики, що може призвести до зниження строку їх експлуатації.



Рисунок 1 –Трубчатий зразок, оброблений за технологією ПТА.

У роботі проведено серію досліджень з оцінки впливу різних режимів обробки ПТА на експлуатаційні характеристики (їх зміна) та технічний стан трубчастих зразків з метою досягнення оптимальних експлуатаційних властивостей.

Оцінку проводили за допомогою розроблених експериментальних методик та унікального експериментального обладнання.

Для оцінки впливу технології ПТА на корозійну стійкість зразків було розроблено конструкцію та виготовлено кліматичну камеру, що дає можливість відтворити необхідну експозицію соляного туману і умови, що відповідають стандарту ДСТУ ISO 9227:2015 [3] (рис. 2). Для проведення випробувань на зносостійкість спроектовано та виготовлено спеціальне устаткування для кріплення трубчастих зразків на газово-повітряному стенді ПК80М [4].

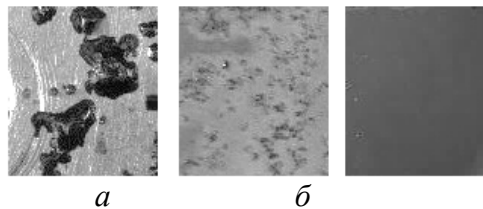


Рисунок 2 – Приклади зразків без обробки (а) та оброблених за різними режимами технології ПТА (б, в) після випробувань за ДСТУ ISO 9227:2015.

Висновки щодо контролю металу зразків, як у вихідному стані, так і після кожного режиму обробки ПТА проводили на основі комплексний підходу, що включає металографічний аналіз та розроблений і стандартизований в Інституті метод ЛМ-твердості, де за параметр, який відображає ступінь розсіювання характеристик металу, прийнято коефіцієнт гомогенності металу m [5, 6]:

$$m = 0,4343 \times d(n) \times \left[\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

де $d(n)$ – параметр, який визначають залежно від кількості n вимірювань; H_i - значення твердості за i -м вимірюванням; $\overline{\lg H}$ – середнє значення логарифма твердості за результатами n вимірювань.

Контроль твердості здійснювався по тридцяти вимірах на поверхні зразків. За значення твердості брали середнє арифметичне значення.

Оскільки стабільність одержуваних при масових випробуваннях характеристик твердості значною мірою залежить від однорідності структури металу, то контроль можна проводити за параметрами розсіювання зазначених характеристик. Чим більша неоднорідність структури матеріалу, тим більше розсіювання вимірюваних параметрів. Великим значенням коефіцієнта гомогенності відповідає низький рівень розсіювання характеристик фізико-механічних властивостей і краще впорядкування структури. Розраховані значення коефіцієнтів гомогенності приведені в таблиці нижче.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів гомогенності після різних режимів іонно-плазмового термоциклічного азотування.

	Режим ПТА–1	Режим ПТА–2	Режим ПТА–3
Твердість, HRC	34,3	47,2	36,2
Коефіцієнт гомогенності, m	72,5	120,1	83,3

Зіставляючи значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла після окремих технологічних операцій можна оцінити якість обробки металу по всій поверхні зразка. На рис. 3 наведено гістограми зміни твердості та гомогенності матеріалу зразків при різних режимах азотування.

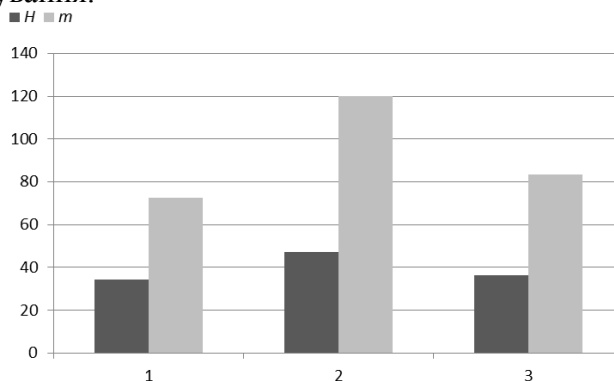


Рисунок 3 – Зміна твердості та гомогенності матеріалу зразків при різних режимах ПТА: 1 - ПТА-1; 2 - ПТА-2; 3 – ПТА-3.

Як бачимо, з представлених результатів (рис. 3), для контролю якості термічної та хіміко-термічної обробки матеріалу виробу така фізико-механічна характеристика, як твердість, є слабчутливою до структурних перетворень в металі. Більш показовим за інформативністю та достовірністю може бути параметр розсіювання значень твердості (коефіцієнт гомогенності), одержаних за результатами масових вимірів в однакових умовах. Найбільш однорідним виявився поверхневий шар, оброблений за режимом ПТА-3. Даний режим азотування підвищує однорідність поверхневого шару більш ніж в 1,5 рази, що підвищить міцність та ресурс досліджуваних виробів, що підтверджують і металографічні дослідження.

Таким чином, на основі проведених комплексних досліджень, проведено оптимізацію параметрів обробки ПТА трубчастого зразка із сталі 40ХН2МА, що дозволяє підвищити його стійкість до корозії, термодинамічного навантаження та зменшити розсіяння пошкоджень і, як наслідок, покращити експлуатаційні характеристики та збільшити довговічність конструкції.

Перелік посилань

1. Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский О достоинствах технологии вакуумного азотирования. Оборудование и инструмент. 2005. № 12. С. 20 - 21.
2. Ляшенко Б. А., Рутковский А. В., Мирненко В. И., Радько О. В. Газотермоциклическое ионное азотирование в импульсном режиме поверхностных слоёв стальных деталей газотурбинных двигателей. Проблемы динамики і міцності в газотурбобудуванні: матер. 3-ї міжнар. наук. - техн. конф. (29 - 31 трав. 2007 р., НАН України, Ін-т пробл. Міцності, м. Київ). Київ, НАН України, Ін-т пробл. міцності. 2007. С. 121 - 122.
3. ДСТУ ISO 9227:2015 Випробування на корозію в штучних атмосферах. Випробування соляним туманом (ISO 9227:2012, IDT)
4. Kondryakov, E. O., V. E. Danylyuk, and V. V. Kharchenko. "Fracture Energy Characteristics of High-Strength Steels Penetrated with Armor-Piercing Strikers at Velocities Up to 1000 m/s." *Strength of Materials* (2023): 1-9
5. ДСТУ 7793-15 Матеріали металеві. Визначення рівня розсіяних пошкоджень методом ЛМ-твердості. К.: ДП «Укр. НДНЦ», 2016. 16 с.
6. О. М. Maslo, Р. О. Bulakh, V. P. Shvets, and A. A. Kotlyarenko, "Application of the LM-Hardness method to assess the current material state of structural elements", *Strength Mater.*, vol. 54, pp. 30–640, Nov. 2022.

УДК: 539.3

Григорій Габрусєв, к.ф.-м.н., доц.; Ірина Габрусєва, к.т.н.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОЦІНКА МІЦНОСТІ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ ПЛИТИ ПРИ ВТИСНЕННІ ІНДЕНТОРА СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Анотація. Постановку та розв'язок задачі проведено із використанням лінеаризованих співвідношень нелінійної теорії пружності. Попередньо деформовану плиту змодельовано попередньо напруженим шаром. Проаналізовано вплив форми індентора, товщини плити та її початкових деформацій на величину та характеристики контактних напружень і вертикальних переміщень на поверхні плити. Аналіз проведено для випадку стисливого (потенціал Бартенева – Хазановича) та нестисливого (потенціал гармонічного типу) тіла.

Ключові слова: попередньо деформована плита, контактні напруження, вертикальні переміщення, індентер.

Hryhorii Habrusiev, Ph.D., Assoc. Prof.; Iryna Habrusieva, Ph.D.

STRENGTH ESTIMATION OF THE PRELIMINARY STRESSED PLATE WHEN PRESSING A COMPLEX FORM INDENTER

Abstract. The formulation and solution of the problem were carried out using linearized relations of the nonlinear elasticity theory. The predeformed plate was modeled by a prestressed layer. The influence of the indenter shape, the plate thickness and its initial deformations on the magnitude and characteristics of contact stresses and vertical displacements on the plate surface was analyzed. The analysis was carried out for the case of compressible (Bartenev – Khazanovich potential) and incompressible (harmonic-type potential) solids.

Keywords: predeformed plate, contact stresses, vertical displacements, indenter

Розрахунок на міцність елементів конструкцій та деталей машин є одним із найважливіших етапів їх проектування. Мінімізація похибки розрахунку вимагає врахування максимальної кількості факторів, які впливають на контактну взаємодію тіл, зокрема наявність початкових напружень або деформацій.

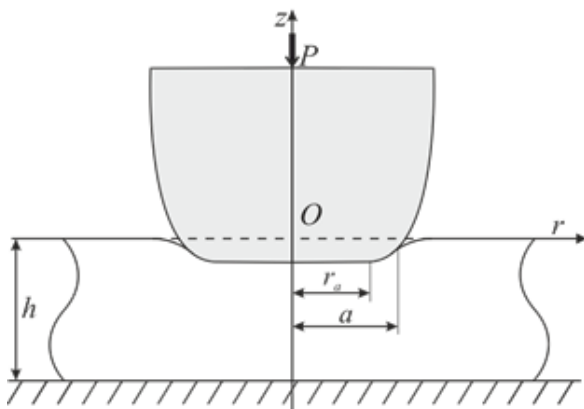


Рис. 1. Схема контакту

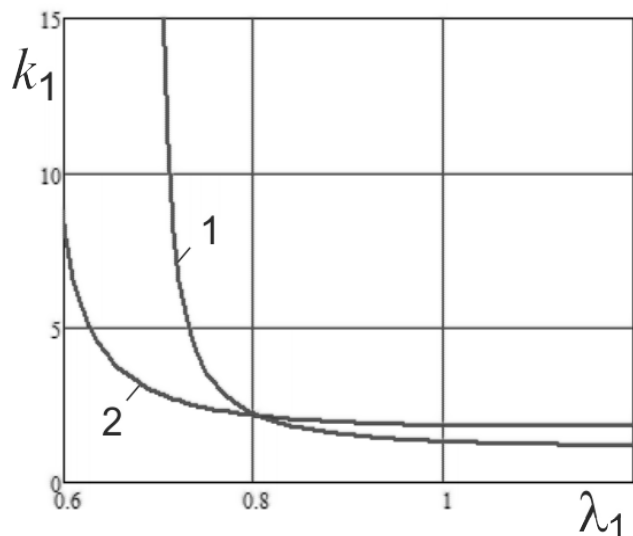


Рис. 2. Залежність k_1 від λ_1

Розглянемо задачу втиснення із постійною силою P індентора складної форми у попередньо напружену плиту, яка лежить без тертя на жорсткій основі. Індентер утворено обертанням вітки параболи та відрізка прямої, яка перпендикулярна до осі параболи та лінії дії сили, навколо лінії дії сили. Плиту будемо моделювати попередньо напруженим ізотропним шаром у рамках лінеаризованої постановки задачі теорії пружності.

Виберемо циліндричну систему координат (O, r, θ, z) так, щоб координатна площина (O, r, θ) співпадала із серединною площиною плити, а вісь Oz – із віссю симетрії індентора (рис. 1).

Граничні умови поставленої задачі матимуть вигляд

$$\begin{aligned} \sigma_{rz}(r, 0) &= 0, 0 \leq r < \infty; & \sigma_{rz}(r, -h) &= 0, 0 \leq r < \infty; \\ \sigma_{zz}(r, 0) &= 0, a \leq r; & u_z(r, -h) &= 0, 0 \leq r < \infty. \\ u_z(r, 0) &= f(r), 0 \leq r \leq a; \end{aligned}$$

Функція $f(r)$ описує форму індентора.

Розв'язання задачі проведено із використанням розробленої методики [1–2]. Парні інтегральні рівняння, що виникають у результаті задоволення граничних умов, розв'язано за допомогою подання шуканих функцій контактних напружень у вигляді частинної суми ряду за функціями Бесселя з невідомими коефіцієнтами a_n^* , для визначення яких будуються скінченні системи лінійних алгебричних рівнянь.

Остаточно функція розподілу контактних напружень має вигляд

$$\sigma_{zz}(r, 0) = -\frac{P}{2\pi} \frac{\sum_{n=1}^N a_n^* J_0\left(\frac{\lambda_n}{a} r\right)}{\sum_{n=1}^N a_n^* K_n}, \quad (1)$$

а вертикальні переміщення точок граничної площини плити визначаються співвідношеннями

$$u_z(r, 0) = -\frac{k_1 P}{2\pi} \frac{\sum_{n=1}^N a_n^* \int_0^\infty \Delta(\alpha) \Psi_n(\alpha) J_0(\alpha r) d\alpha}{\sum_{n=1}^N a_n^* K_n}, \quad (2)$$

де λ_n – додатні нулі функції $J_0(r)$, $K_n = \int_0^a r J_0\left(\frac{\lambda_n}{a} r\right) dr$, $\Psi_n(\alpha) = \int_0^a r J_0\left(\frac{\lambda_n}{a} r\right) J_0(\alpha r) dr$.

Коефіцієнт k_1 , який входить до співвідношень (1) – (2), характеризує вплив початкових деформацій та залежить від структури пружного потенціалу. Зокрема, у випадку потенціалу Бартенєва-Хазановича (нестисливі тіла)

$$k_1 = \frac{2(1+\nu)}{E} \frac{\lambda_1^{\frac{7}{2}}}{3\lambda_1^3 - 1},$$

де ν – коефіцієнт Пуассона, E – модуль Юнга матеріалу плити, λ_1 – параметр лінійного видовження. Останнє співвідношення прямує до нескінченності при $3\lambda_1^3 - 1 = 0$, тобто при $\lambda_1 \rightarrow \lambda_{kp} \approx 0.693$. Значення λ_{kp} відповідає поверхневій нестійкості при рівномірному двовісному стиску. При цьому, як випливає зі (1) та (2), вертикальні переміщення точок граничних площин плити необмежено зростають, а контактні напруження відсутні. Отже, спостерігається такий механічний ефект: при наближенні

λ_1 до критичного значення λ_{kp} у плиті виникають явища «резонансного характеру», які були виявлені Олегом Миколайовичем Гузем при розв'язанні задач крихкого руйнування матеріалів з початковими напруженнями [3].

Аналогічний ефект спостерігається і у тілах із пружним потенціалом гармонічного типу (стисливі тіла), для якого

$$k_1 = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1(2+\nu) - (1+\nu)}$$

Для різних матеріалів критичні значення λ_{kp} є різними, оскільки залежать від ν . Зокрема, при $\nu = 0.3$ «резонансні» явища спостерігаються при $\lambda_1 \rightarrow \lambda_{kp} \approx 0.565$.

На рис. 2 ілюструється графічна залежність k_1 від параметра лінійного видовження λ_1 для випадку наявності у плиті пружного потенціалу Бартенєва-Хазановича (крива 1) та потенціалу гармонічного типу (крива 2). З наведених графіків випливає, що вплив початкових напружень на вертикальні переміщення як для стисливих, так і для нестисливих тіл значно вищий у випадку попередніх деформацій стиску ($\lambda_1 < 1$), ніж у випадку попередніх деформацій розтягу ($\lambda_1 > 1$).

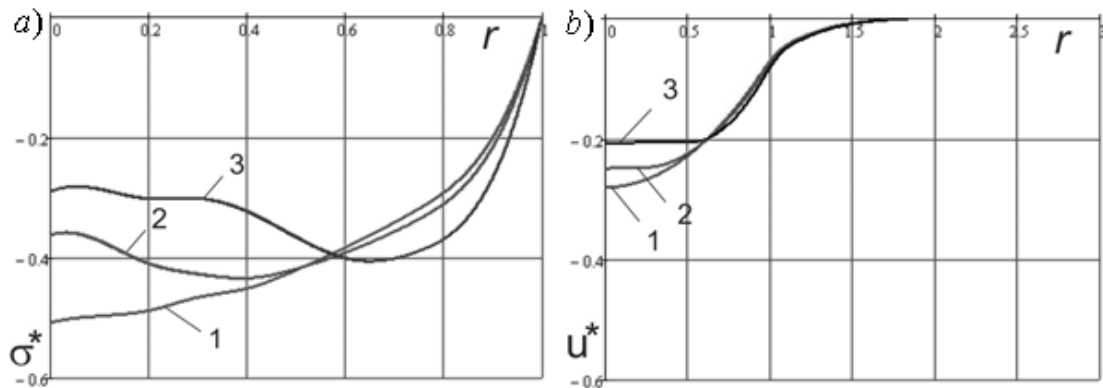


Рис. 3. Розподіл контактних напружень (а) та вертикальних переміщень (б) при різних значеннях параметра r_a

На рис. 3 наведено графіки функцій $\sigma^*(r) = \sigma_{zz}(r, 0)/P$ та $u^*(r) = u_z(r, 0)/P$ для випадку параболічного індентора, відсутності попередніх напружень у шарі $\lambda_1 = 1$, та $a = 1$ при різних значеннях параметра r_a : $r_a = 0$ – крива 1, $r_a = 0.2$ – крива 2, $r_a = 0.5$ – крива 3. Очевидно, що форма індентора суттєво впливає на рівень і характер розподілу контактних напружень. Зокрема, за відсутності плоскої частини в основі індентора, екстремальні значення контактних напружень спостерігаються в центрі контактної області. Поява ж плоскої частини призводить до зсуву екстремальних значень до краю контактної області та зменшує їх абсолютну величину.

На рис. 4 а) зображено графік функції, що описує розподіл контактних напружень для випадку тиску параболічного індентора. Графік функції, що описує вертикальні переміщення точок верхньої граничної площини шару для того ж випадку, побудовано на рис. 4 б). Пунктирна крива показує випадок тиску індентора на півпростір [2], крива 1 відповідає тиску аналогічного індентора із тією ж силою на шар товщиною $h = 0.5$, крива 2 – $h = 1$, крива 3 – $h = 2$. Як видно з малюнків уже при $h = 2$, тобто якщо товщина шару вдвічі більше радіуса контактної ділянки, розподіл контактних напружень для шару близький до відповідного розподілу для півпростору. Тобто

подальше збільшення товщини шару не призведе до істотного зменшення контактних напружень.

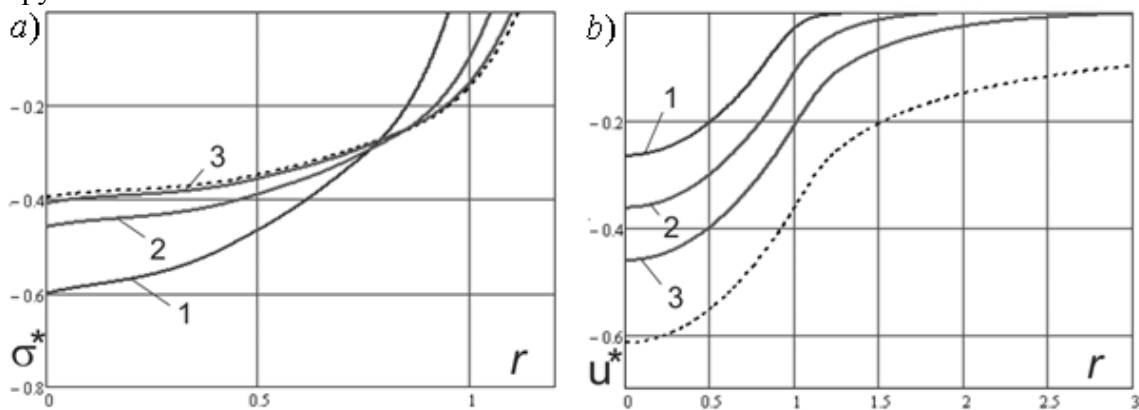


Рис. 4. Розподіл контактних напружень (а) та вертикальних переміщень (b) при різних значеннях товщини шару

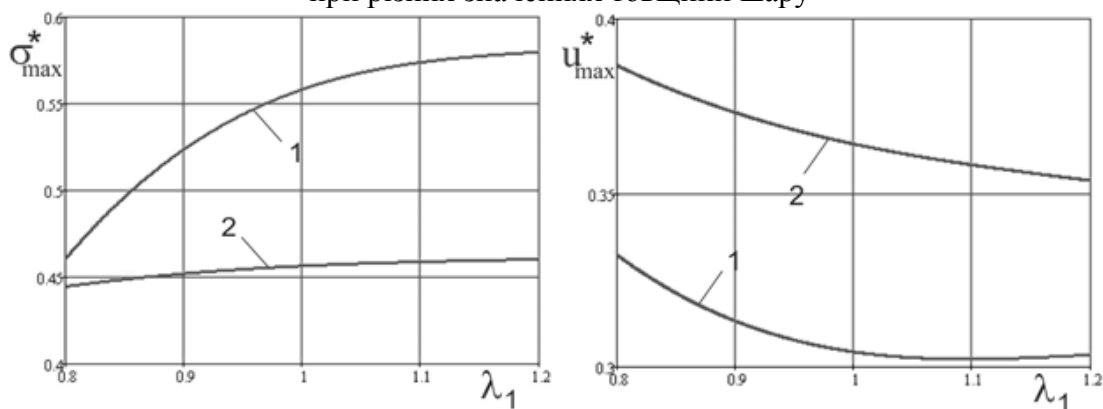


Рис. 5. Екстремальні значення контактних напружень та вертикальних переміщень

На рис. 5 проілюстровано залежність екстремальних значень контактних напружень та вертикальних переміщень точок верхньої граничної площини шару від лінійного видовження λ_1 для випарку тиску параболічного індентора. Криві 1 відповідають нестисливому шару з наявним пружним потенціалом Бартенєва-Хазановича, а криві 2 – стисливому шару з потенціалом гармонічного типу.

Наявність у шарі залишкових деформацій розтягу викликає звуження площі контакту, збільшення абсолютної величини контактних зусиль і зменшення вертикальних переміщень. Величина індукованих змін залежить від типу пружного потенціалу. Наявність у шарі залишкових деформацій стиснення, у свою чергу, викликає розширення площі контакту, зменшення абсолютної величини контактних напружень і збільшення вертикальних переміщень.

Перелік посилань

1. Габрусєва І.Ю. Контактна задача про стиснення ізотропного шару двома параболоїдальними штампами з урахуванням поля залишкових деформацій / Б.Г. Шелєстовський, І.Ю. Габрусєва // Вісник ТНТУ. – 2014. – 73.№1. – С. 44-52.
2. Habrusiev, N.V., Habrusieva, I.Y. & Shelestovskyi, B.H. Contact Interaction of a Prestrained Thick Plate with Parabolic Punch. J Math Sci 263, 129–137 (2022).
3. Гузь О. М. Контактна взаємодія пружних тіл з початковими напруженнями: Навч. посібник / Гузь О. М., Бабич С. Ю., Рудницький В. Б. – К: Вища школа, 1995. – 304 с.

УДК 621.326

Дмитро Герус

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

СИНУСОЇДАЛЬНІ ЗУБЧАСТІ КОЛЕСА. ПЕРЕВАГИ, ОСОБЛИВОСТІ, ЗАСТОСУВАННЯ

Анотація: В даній роботі розглянуто переваги та особливості синусоїдальних зубчастих коліс, їх застосування.

Ключові слова: синусоїдальні зубчасті колеса, розподіл навантаження, дедендум, зношування.

Dmytro Gerus

SPUR GEARS. ADVANTAGES, FEATURES, APPLICATION

Abstract: This work examines the advantages and features of sinusoidal gears and their application.

Keywords: spur gear, load distribution, dedendum, wear.

Використання евольвентних зубчастих коліс вже довгий час переважає у промисловості. Це пов'язано з поступовим розвитком винаходу Ейлера протягом століть і важливими вдосконаленнями як у технологіях виробництва, так і в матеріалах. Це відображається у високій якості та навантажувальній здатності.

Однак даний тип зубчастих коліс має свої недоліки. Оскільки евольвентні зубчасті колеса передають енергію через опукло-опуклий контакт, при наближенні до базового діаметру виникають високі контактні навантаження в цій зоні. Крім того, в шестернях з малою кількістю зубів бічна поверхня дедендума порівняно коротка. Це призводить до надмірних втрат на ковзання і тертя, а також до передчасного виходу з ладу. Також, проблемою є підрізання в ділянці дедендума.

Рішенням є використання синусоїдального профілю зубця.

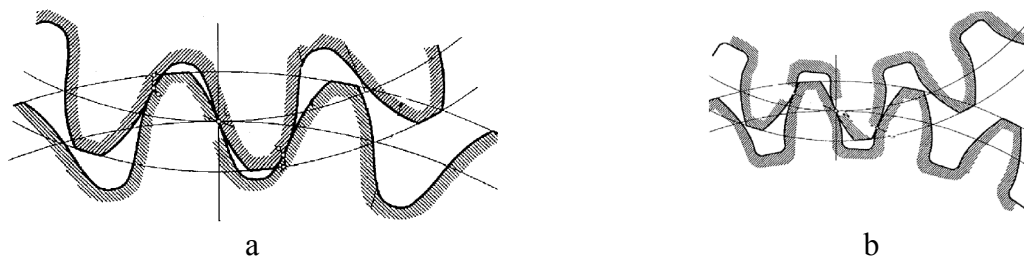


Рис. 1. Зачеплення (а) синусоїдальної зубчастої пари, (б) евольвентної пари.

Як можна спостерігати на Рис. 1, синусоїдальне зубчасте колесо має відносно довшу дедентальну частину бічної поверхні зуба шестерні (порівняно з евольвентною передачею), яка входить в зачеплення з вершиною спареного зубчастого колеса. Окрім цього, тип контакту замінюється на опукло-вгнутий, що в свою чергу забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження по профілю зуба, включаючи зону дендуму, зменшуючи ризик локалізованого навантаження та збільшуючи довговічність.

Також можна зазначити наступні переваги синусоїдальних зубчастих коліс:

- Можливість формоутворення за двома параметрами, що визначають криву бічної поверхні рейки, які можуть бути використані для модифікації зубців, наприклад, кут нахилу, товщина зубців тощо.
- Циліндричні прямозубі S-подібні передачі можуть працювати з малою кількістю зубців - до 6 або навіть 4.

- Менші шум та вібрації: Синусоїдальні зубчасті колеса мають меншу тенденцію до вироблення шуму та вібрацій під час роботи порівняно з евольвентними аналогами. Це робить їх більш привабливими для застосування у високопродуктивних та чутливих пристроях.

- Більша товщина контактної масляної плівки, що обумовлено більшими відносними швидкостями в контакті.

- Порівняно менші радіуси кривизни, що означає менший контактний тиск.

- Різниця між довжиною дедендума шестерні та довжиною додаткового зубчастого колеса вказує на величину ковзання. А менше ковзання означає меншу роботу тертя і менше виділення тепла, що має особливе значення для пластмасових передач.

З останнього пункту можна визначити одне з основних, на даний момент, застосувань синусоїдальних коліс – високопродуктивні пластикові зубчасті колеса.

Проведені раніше дослідження показали, що синусоїдальні зубчасті колеса показували себе краще під час випробування на втому, аналізу навантажень та замірювань показників теплового сліду (Рис. 2.)

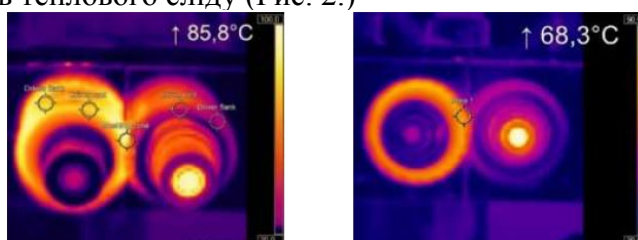


Рис. 2. Температурний слід синусоїдальної(зліва) та евольвентної(справа) зубчастої пари

Одним з недоліків синусоїдальних зубчастих коліс, є складність виготовлення зубонарізного інструменту для обробки класичними методами зубонарізання, що напряму впливає на собівартість виготовленої деталі. У зв'язку з цим у Львівській політехніці розроблено та обґрунтовано новий метод виготовлення зубчастих коліс, який отримав назву радіально-колового методу (РКМ). Даний метод дозволяє використовувати відносно дешеву дискову фрезу у поєднанні з осью подачею та ексцентриситетом фрези відносно осі інструментального шпинделя. Для даного методу найкраще застосовувати 5-координатні оброблювальні центри, проте за потреби можна провести незначну модернізацію серійного обладнання.

У висновку можна зазначити що синусоїдальні зубчасті колеса мають такі вагомі переваги, як: підвищена міцність, вищі максимальні режими роботи, низький рівень шуму та краще змащування. Всі ці фактори свідчать про те, що дослідження та розвиток даної теми потребує підвищеної уваги та обговорення в науковій спільноті.

Перелік посилань

1. G. Hlebanja, «Gradual development of S-shaped gears», MATEC Web Conf. Vol. 366, No. 01001, 2022.

2. G. Hlebanja, M. Erjavec, M. Hriberšek, L. Knez, S. Kulovec, “Theory and Applications Based on S-Gear Geometry”. in Radzevich, S.P. Eds. Recent Advances in Gearing. Springer, Cham, pp. 51-87, 2022.

3. І. Є. Грицай, Д. А. Герус, “Використання радіального-колового методу нарізання зубчастих коліс для відновлення та ремонту приводів та передач машин і обладнання”, Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць XII Міжнародної науково-практичної конференції, Івано-Франківськ – Яремче, 5 лютого – 9 лютого 2024 року. – 2024. – С. 79–80.

УДК 629.735.017.1

Борис Карпінос¹, д.т.н., проф.; Андрій Бологін², к.т.н., с.н.с.; Георгій Горохов², к.т.н., с.н.с.; Юрій Манулін²

¹ Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Україна

² Державний науково-дослідний інститут авіації, Україна

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Анотація. Розроблено метод прийняття рішень прогнозування довговічності силових елементів планера повітряних суден на основі використання даних експлуатації та ремонту.

Ключові слова: строк служби, експлуатаційна надійність, планер повітряного судна.

Boris Karpinos, Ph.D., Prof.; Andrii Bolohin, Ph.D.; Heorhii Horokhov, Ph.D.; Yurii Manulin

A METHODOICAL APPROACH TO PREDICTING THE DURABILITY OF AIRCRAFT STRUCTURES BASED ON THE USE OF AIRCRAFT OPERATION AND REPAIR DATA

Abstract. A decision-making method for forecasting the durability of airframe power elements based on the use of operation and repair data has been developed.

Keywords: service life, operational reliability, airframe

Проблемні питання обґрунтування довговічності авіаційних конструкцій та визначення можливості подальшої експлуатації старіючих повітряних суден (ПС) досліджувались в багатьох науково-технічних роботах. В доповіді розглянуто методичний підхід побудови математичної моделі прийняття рішень прогнозування технічного стану планера ПС шляхом комбінованого застосування математичних статистичних методів обробки інформації та неформальних експертних оцінок.

В якості інформаційного показника можливості продовження призначеного строку служби приймається ймовірність β_{CE} руйнування силових елементів (СЕ), як узагальненого показника технічного стану планера ПС.

Постановка задачі прогнозування можливості продовження строку служби на час ΔT_{PP} для конкретного ПС передбачає визначення кількості пошкоджень планера ПС, при якій ще виконуються вимоги безпеки польотів, а саме: ймовірність β_{CE} виникнення аварійної ситуації внаслідок утворення концентраторів напруження (втомних тріщин, місць корозії) не повинна бути більше значення $\beta = 1.0 \times 10^{-6}$ на одну годину польоту.

Аналітичні залежності в математичній моделі прогнозу довговічності СЕ конструкції планера ПС побудовано на основі логарифмічного нормального закону розподілу ймовірності руйнування $\beta_{CE}(\Delta T_{PP})$ та результатів статистичного аналізу даних експлуатації головної групи ПС, які відносно ПС, що досліджується, мають випереджальні значення календарного строку служби t_K , нальоту t_P та рангу пошкоджень R_{II} .

Для визначення головної групи ПС застосовано методи кластерного аналізу в трьохвимірному просторі значень t_K , t_P та рангу пошкоджень R_{II} .

В результаті проведення порівняльного аналізу визначаються СЕ з рангом максимального ступеня пошкоджуваності R_{II}^{MAX} , що і є підставою для прийняття рішень стосовно залишкової довговічності СЕ.

За результатами аналізу на інтегральному рівні опису конструкції планера ПС опосередкованих значень ознак пошкодження R_{II} , таких як загальна кількість тріщин M_{TP} , пошкоджених заклепок $M_{ЗАК}$, місць корозії $M_{КР}$, виконується обчислення значень інтенсивності появи відмов СЕ у вигляді тріщин $\lambda_{TP} = \frac{M_{TP}}{t_P}$, пошкоджених заклепок $\lambda_{TP} = \frac{M_{ЗАК}}{t_P}$, появи місць корозії $\lambda_{КР} = \frac{M_{КР}}{t_K}$ в залежності від часу нальоту t_P та строку t_K експлуатації.

Вказані параметри інтенсивності λ_{TP} , $\lambda_{ЗАК}$, $\lambda_{КР}$ характеризують в цілому ранг пошкодження R_{II} планера ПС.

З метою оцінки можливості дотримання умов безпеки польотів впродовж інтервалу прогнозу ΔT_{PP} знаходиться рішення інтегрального рівняння для отримання оцінки "a" математичного сподівання параметру "a": $a = a_{ПРОГНОЗ} = a_1$:

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\lg(\Delta T_{PP})} e^{-(x-a)^2/(2\sigma^2)} dx - \beta_{БП} = 0$$

де $\beta_{БП}$ - граничне значення ймовірності руйнування СЕ впродовж інтервалу прогнозу ΔT_{PP} ; x - втомна довговічність в кількості годин нальоту t_P за даними експлуатації; a - математичне сподівання логарифмів довговічності; σ - середнє квадратичне відхилення логарифмів довговічності, при цьому приймається, що $\sigma = 0,15$ для алюмінієвих сплавів.

Обчислення значень випадкової величини a_1 в математичній моделі виконано з використанням ряду припущень, одним з яких є необхідність лінійної пропорційної зміни параметру "a = a_{ПРОГНОЗ}" відповідно діапазону змін значень результатів контролю появи пошкоджень λ_{TP} , $\lambda_{ЗАК}$, $\lambda_{КР}$.

Таким чином, на основі даних технічної експлуатації кластера головної групи ПС перевіряються умови забезпечення безпеки польотів.

В подальшому для прийняття рішень щодо довговічності конкретного ПС необхідно виконати розрахунки, в яких передбачити сумісне використання результатів статистичного аналізу кластера головної групи ПС та оцінок експертів.

Аналіз розташування даних t_K , t_P , R_{II} в трьохвимірному просторі координат дозволяє для кластера головної групи прийняти припущення щодо наявності лінійної регресійної залежності поміж випадковими значеннями t_K , t_P , R_{II} .

Доцільність вказаного припущення та адекватність математичної лінійної регресійної моделі процесу реальної експлуатації ПС головної групи підтверджується значенням вибіркового коефіцієнта кореляції, який вказує на тісний зв'язок даних експлуатації.

$$\text{Лінія прогнозу має вигляд рівняння: } t_K(t_P) = K t_{ПРОГНОЗ} \times t_P + B_{ПРОГНОЗ}.$$

Коефіцієнти рівняння обчислюються шляхом застосування комбінованого методу, який передбачає поєднання методів математичного та евристичного прогнозу.

Значення коефіцієнта $Kut_{PROGNOZ}$ отримано на підставі припущення щодо обчислення середнього значення двох куткових коефіцієнтів: Kut_{REG} та Kut_{EKC} .

Згідно методу математичного прогнозу обчислено значення коефіцієнтів лінії регресії, верхньої та нижньої границі лінії регресії з довірчим інтервалом 0,001.

Метод евристичного прогнозу дозволяє отримати значення куткового коефіцієнта Kut_{EKC} в результаті експертної оцінки технічного стану ПС. Обробку даних прогнозних оцінок експертів доцільно проводити на основі методу нечіткого логічного висновку, так як експерти приймають рішення в умовах деякої невизначеності стосовно впливу факторів реальної експлуатації.

В якості прикладу на рисунку показано застосування методичного підходу до прийняття рішення щодо можливості продовження призначеного строку служби умовного ПС №1234 після виконання ремонту.

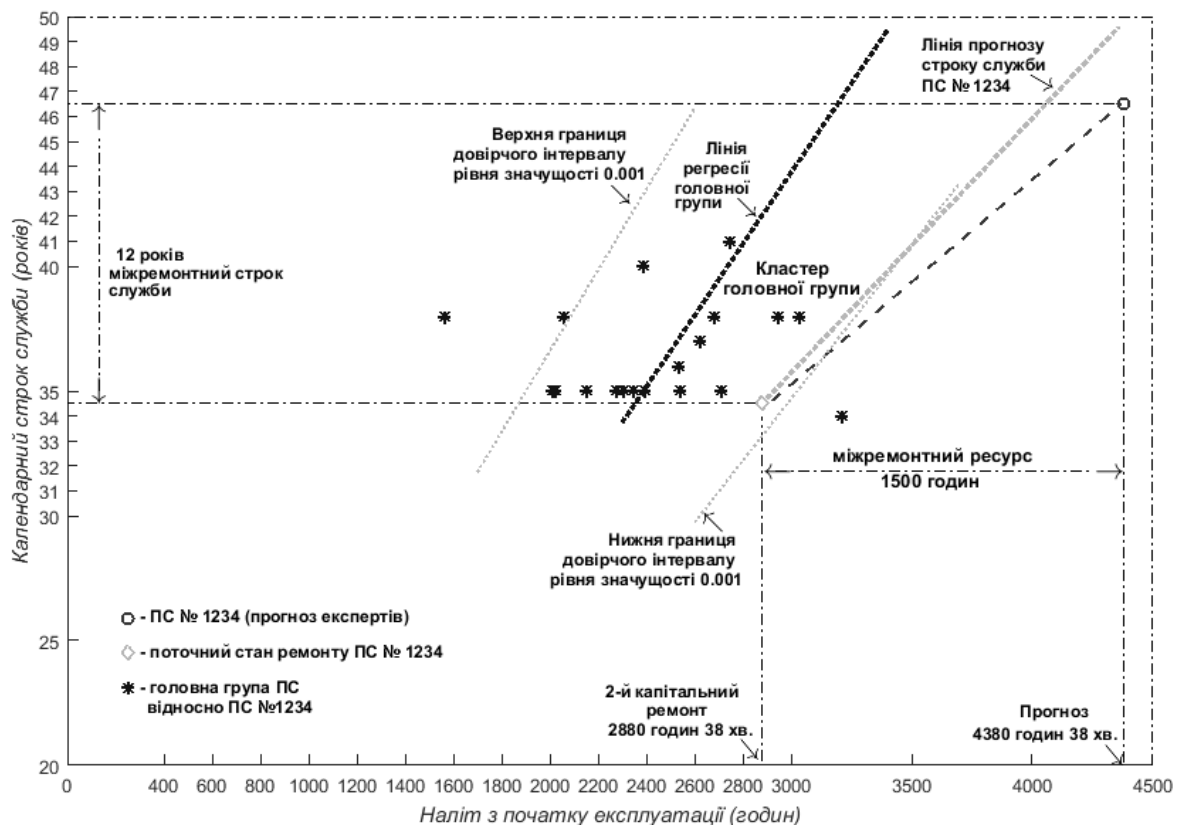


Рис.1 – Порівняльний аналіз прогнозованих ресурсних показників ПС №1234 з ресурсними показниками головної групи ПС

Реалізація на практиці методичного підходу прийняття рішень прогнозування довговічності СЕ планера ПС в процесі технічної експлуатації дозволить отримувати науково обгрунтовані строки продовження призначених показників і визначати для системи управління інженерно-авіаційної служби часові інтервали виконання переліків необхідних профілактичних робіт.

УДК 621.891

Андрій Гупка, к.т.н., доц.; Віктор Аулін, д.т.н., проф.; Петро Стухляк, д.т.н., проф.; Роман Лещук, к.т.н., доц.; Ігор Ярема, к.т.н., доц.; Валерій Буховець, к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ТРИБОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ СПРЯЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Анотація. Проаналізовано умови експлуатації важконавантажених трибоспряжень автомобілів. Розроблена комплексна методика дослідження та обґрунтовано вибір кінетичних критеріїв оцінювання процесів в зоні фрикційного контакту. Підтверджена трибологічна інформативність параметрів контактної електроопору трибоспряження.

Ключові слова: трибометр, трибоспряження, експлуатаційна надійність, транспортні засоби, кінетичні критерії оцінювання.

Andrii Gupka, Ph.D., Assoc. Prof.; Viktor Aulin, Ph.D., Prof.; Petro Stuhlyak, Ph.D., Prof.; Roman Leshchuk, Ph.D., Assoc. Prof.; Ihor Yarema, Ph.D., Assoc. Prof.; Valery Bukhovets, Ph.D., Assoc. Prof.

TRIBOLOGICAL ASPECTS OF OPERATIONAL RELIABILITY OF HEAVY- LOADED COUPLINGS OF VEHICLE PARTS

Abstract. The operating conditions of heavily loaded car tribo couplings are analyzed. A comprehensive research methodology has been developed and the choice of kinetic criteria for evaluating processes in the frictional contact zone has been substantiated. The tribological informativeness of the parameters of the contact electrical resistance of tribocoupling is confirmed.

Keywords: tribometer, tribo coupling, operational reliability, vehicles, kinetic assessment criteria.

Основними робочими та найбільш відповідальними механізмами, системами та агрегатами транспортних засобів являються вузли тертя. У важких умовах, під час експлуатації автомобіля працюють деталі спряжень циліндро-поршневої групи, шатунної групи, колінчастий вал з корінними та шатунними підшипниками, коробки швидкостей, редуктори, різноманітні передачі, гальмівні механізми, механізми рульового керування та інші. Експлуатаційна надійність та ефективність транспортних засобів суттєво залежить від технічного стану даних вузлів та агрегатів і визначається їх трибологічною ефективністю.

Для вирішення практичних задач триботехніки (підбір матеріалів пар тертя та методів їх зміцнення, визначення оптимальних концентрацій добавок в мастило) необхідне визначення діапазону структурно енергетичної пристосовуваності (СЕП) і критичних точок переходу до пошкоджуваності. У зв'язку з малими значеннями величини зносу I (в діапазоні СЕП) застосування традиційних методів його вимірювання малоефективне. Крім цього, фіксація величини I за певний період дослідження не розкриває кінетики і взаємозв'язку процесів, які його зумовили. Фізичною основою кореляційної залежності між параметрами контактної електроопору (КЕО R), I , μ коефіцієнта тертя та температуру в зоні тертя T являється наявність на поверхнях тертя в діапазоні СЕП оптимальних по складу, будові, властивостях дисипативних вторинних структур (ДВС) з максимальною зносостійкістю $I \rightarrow \min$ і високими діелектричними властивостями $R \rightarrow \max$.

Одним із найбільш чутливих кінетичних методів контролю процесів тертя та зношення являється метод вимірювання КЕО R трибоспряження. Контролюючи

основні триботехнічні показники (інтенсивність зношення I , коефіцієнт тертя μ , температуру в зоні тертя T), параметр КЕО R враховує весь комплекс механічних, фізико-хімічних, термодинамічних, структурно-енергетичних явищ в зоні фрикційного контакту, інформує про кінетику зміни параметрів I , μ , T безпосередньо під час дослідження. Основними перевагами даного методу являються:

1. Мінімальні витрати часу для визначення і контролю діапазону нормального тертя та зношення - діапазон СЕП (експресність методу);
2. Зв'язок параметрів КЕО R з механічними, фізико-хімічними, термодинамічними, структурно-енергетичними процесами в зоні фрикційного контакту (комплексність методу);
3. Можливість контролю кінетики структурних перетворень матеріалів поверхневих шарів елементів пар тертя (утворення, трансформації та руйнування ДВС);
4. Можливість кількісної та якісної оцінки основних процесів поверхневого руйнування згідно загальної класифікації видів тертя та зношення (універсальність методу), створення єдиного банку триботехнічних даних для розробки загальної теорії тертя та зношення.

До основних переваг даного методу відносяться також висока чутливість і точність, можливість його використання не тільки в лабораторних, а й у виробничих умовах. Висока чутливість методу звільняє від необхідності форсованих режимів дослідження, які порушують дійсну природу трибологічних взаємодій. Крім цього коректними можуть бути тільки ті методи дослідження, ті критерії оцінки, фізична суть яких відповідає природі досліджуваного явища, а роздільна здатність співрозмірна масштабу досліджуваного процесу. З практичної точки зору в основі любого методу повинні бути: простота, наглядність, надійність та інформативність.

Дослідження проводились, як на серійних, так і на спеціально спроектованому трибометрі (рис. 1). Схема контакту диск-торець пальця, при силових параметрах навантаження в діапазонах: швидкість ковзання $V=0,12\dots 11\text{м/с}$, питома навантаження $P = 0,3\dots 35\text{ МПа}$ з можливістю їх плавної зміни. Конструкція вузла тертя та механізму навантаження дозволяє зменшити вплив динамічних навантажень на досліджуваний зразок при перехідних процесах і реверсивному характері взаємного переміщення. Система змащування - автоматизована з можливістю подачі як рідких, так і пластичних мастил. Досліджувались зразки (06 мм, $l = 25\text{ мм}$), виготовлені із сталі 45 (42...45 HRc, $Ra = 0,125\text{ мкм}$), бронзи ОЦС 5-5-5. мастило - інактивне вазелінове масло, а також вазелінове масло з добавками присадки (2%), Англамол 99.

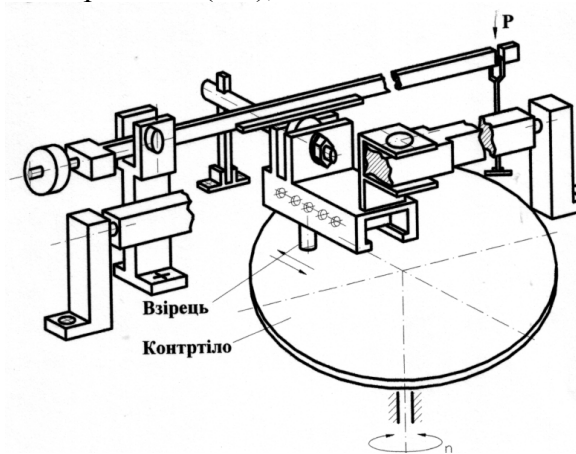


Рисунок 1 - Схема вузла тертя та механізму навантаження трибометра

Вимірювання інтенсивності зносу, коефіцієнта тертя, температури проводилось традиційними методами, величини КЕО вимірювались за допомогою спеціально

розробленої схеми. За контрольне значення вказаних параметрів приймалось їх стабільне значення після кожного етапу навантаження. Структура поверхонь тертя (тип та властивості ВС) досліджувались на електронному мікроскопі CamScan 44DB, з приставкою Line 860.

В діапазоні СЕП властивості ДВС, їх геометричні параметри, співвідношення площі ВС до загальної площі досліджуваного зразка, їхній характер формоутворення та руйнування змінюється в широких діапазонах під впливом дії комплексу зовнішніх параметрів, що засвідчує про широкі можливості їх внутрішньої перебудови. Для оцінки структурно-енергетичного та темодинамічного стану ДВС запропоновано наступні критерії параметра КЕО R (рис. 2).

Де ΔR - величина падіння параметра КЕО після кожного етапу навантаження, ($\Delta P, \Delta V$);

$R_{вих}$ ~ вихідне (стабільне) значення параметра КЕО;

Δt - час стабілізації параметра КЕО після кожного етапу навантаження.

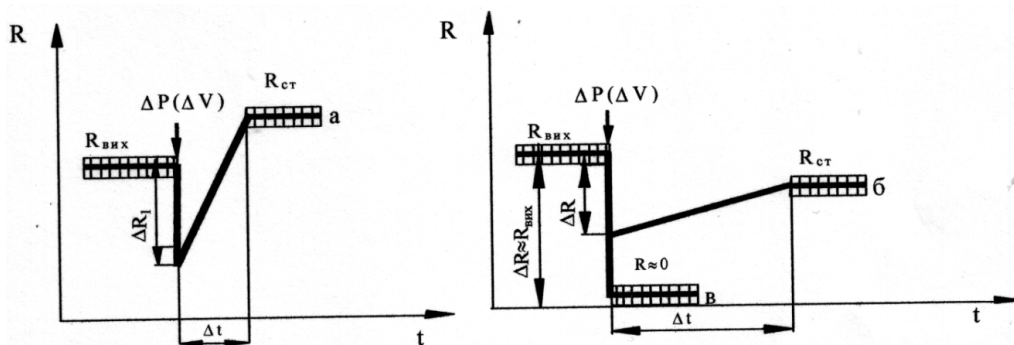


Рисунок 2 - Характер зміни параметрів $\Delta R/R_{вих}$, Δt в залежності від режимів тертя та зношення: *a* - режим припрацювання, *б* - режим СЕП, *в* - режим об'ємної деструкції.

В діапазоні СЕП критерії $\Delta R / R_{вих}$, Δt стабільні і мінімальні (оптимальні властивості ВС), в діапазонах припрацювання або об'ємної деструкції значення даних параметрів максимальні. Після кожного етапу навантаження ($\Delta P, \Delta V$) відбувається падіння вихідного значення КЕО ($R_{вих}$) на певну величину ΔR з подальшою його стабілізацією на іншому рівні ($R_{ст}$) через певний період часу (Δt). Для досліджуваних пар тертя встановлено наступні значення даних параметрів: режим СЕП - $\Delta R/R_{вих} \approx 0,15...0,55$, $\Delta t \approx 12...20$ хв.; режим припрацювання - $\Delta R/R_{вих} \approx 0,60... 0,85$, $\Delta t \approx 25...40$ хв.; режим об'ємної деструкції - $\Delta R/R_{вих} \approx 1$, $\Delta t \rightarrow \infty$.

Запропоновані кінетичні критерії дозволяють проводити безперервний контроль процесами тертя та зношення, кінетикою утворення, трансформації та руйнування ВС і в сукупності з в структурно-енергетичним аналізом поверхонь тертя, розробити комплексну методику дослідження для розкриття фізичної суті процесів в зоні фрикційного контакту.

Перелік посилань

1. Aulin, V., Gypka, A., Liashuk, O., Stukhlyak, P., & Hrynkiv, A. (2024). A comprehensive method of researching the tribological efficiency of

couplings of parts of nodes, systems and aggregates of cars. *Problems of Tribology*, 29(1/111), 75–83. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-75-83>.

2. Gupka A. The tribology of the car: Research methodology and evaluation criteria / O. Lyashuk ,, Y. Pyndus , V. Gupka , M. Sivravska , M. Stashkiv // ICCPT 2019: Current Problems of Transport : Proceedings of the 1st International Scientific Conference , May 28-29, 2019, Ternopil , Ukraine . R. - 231-237. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3387620>.

УДК 539.4

Вячеслав Дегтярев, к.т.н., с.н.с.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦЬ ВИТРИВАЛОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ МІЦНОСТІ З ЗАЛИШКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

Анотація. Запропоновано методу, яка дозволила на прикладі аналізу діаграм граничних напружень циклу зварних з'єднань сталей Ст.3сп, 09Г2С та 14ХМНДФР показати, що в досліджуваному діапазоні середніх напружень циклу та усталених залишкових напружень зварні з'єднання більшої міцності мають вищі значення границі витривалості, яка інтенсивніше зростає зі збільшенням відносних значень середнього напруження циклу.

Ключові слова: зварне з'єднання, границя витривалості, усталене залишкове напруження, середнє напруження циклу, середня амплітуда циклу.

Viacheslav Dehtiarev, Ph.D.

THE METHOD OF DEDERMINING THE ENDURANCE LIMITS OF WELDET JOINTS OF STEEL OF DIFFERENT STRENGTHS WITH RESIDUAL STRESSES

Abstract. A methodology was proposed that made it possible to establish that in the studied range of average cycle stresses and stable residual stresses, welded joints of greater strength have higher values of the endurance limit.

Keywords: welded joint, endurance limit, stable residual stress, average cycle stress.

Раніше встановлено, що діаграма граничних напружень циклу (ДГНЦ) стикового з'єднання сталі більшої міцності з високими залишковими напруженнями (ЗН) розтягу після їх поєднання в суміщеному вигляді є продовженням діаграми менш міцного з'єднання. Подання результатів досліджень у вигляді суміщених діаграм дозволило визначити галузі раціонального використання сталей різної міцності. Оскільки вихідні ЗН зростають пропорційно границі плинності основного матеріалу σ_T , то, незважаючи на однакові одержувані значення границь витривалості σ_R до певного рівня значень коефіцієнта асиметрії циклу $R\sigma$, у зварних з'єднаннях сталей більшої міцності значення усталених залишкових напружень $\sigma_{ост}^y$ також будуть більшими. Враховуючи те, що величина $\sigma_{ост}^y$ за інших рівних умов відіграє основну роль у зниженні опору втомі, порівнювати результати випробувань зварних з'єднань сталей, що містять різний рівень $\sigma_{ост}^y$, не цілком обґрунтовано. Крім цього, не враховується той факт, що однакові границі витривалості зварних з'єднань різної міцності отримують при неоднаковому відношенні середнього напруження циклу σ_m до границі плинності матеріалу.

У зв'язку з цим були проведені дослідження, які дозволили зіставити опір втомі зварних з'єднань сталей різного рівня міцності, що містять однаковий рівень граничних усталених залишкових напружень, в діапазоні зміни $R\sigma$, при якому, як зазначалося, спостерігався збіг діаграм.

Аналіз проведено на прикладі випробувань стикових зварних з'єднань низьковуглецевої Ст.3сп ($\sigma_T = 300$ МПа), низьколегованої 09Г2С ($\sigma_T = 340$ МПа) та низьколегованої високоміцної 14ХМНДФР ($\sigma_T = 600$ МПа) сталей. Максимальні вихідні ЗН склали, залежно від рівня міцності сталі, 0,75-0,85 від σ_T та відповідають

260, 290 та 450 МПа у зварних з'єднаннях сталей Ст.3сп, 09Г2С та 14ХМНДФР відповідно.

Раніше отримані результати втомних випробувань стикових зварних з'єднань вищезгаданих сталей з високими ЗН показали, що в діапазоні зміни $R\sigma$ від -1 до 0,6 границі витривалості збігаються. Оскільки похила частина діаграм паралельна лінії проведеної під кутом 45, це вказує на те, що гранична амплітуда не залежить від середнього напруження циклу. Це означає, що по-перше, при однакових значеннях σ_R в зварних з'єднаннях сталей різної міцності значення σ_{ocm}^y будуть різними, по-друге, незважаючи на однакові величини граничних напружень їх відношення до границі плинності матеріалу досліджуваних сталей буде різним.

У зв'язку з цим, якщо представити ДГНЦ зварних з'єднань у відносних координатах, можна побачити (Рис. 1), що вже спочатку при однакових відносних значеннях середніх напружень σ_m/σ_T вони розходяться. При цьому сталі більшої міцності мають більш високі відносні значення границі витривалості, змінюючи кут нахилу діаграми у вигляді прямих більшою мірою. Подання даних у такому вигляді дозволяє, враховуючи механічні властивості досліджуваних сталей, аналізувати отримані результати у порівняних умовах випробувань. У загальному вигляді рівняння для кожної прямої можна записати як

$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_{-1}} = 1 + \kappa \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right).$$

де $\sigma_{-1} = 60$ Мпа - границя витривалості зварного стикового з'єднання з залишковими напруженнями при симетричному циклі навантаження, $\kappa = \sigma_{Ti}/\sigma_{-1}$ - кут нахилу прямих.

Це дає можливість визначення ДГНЦ зварних з'єднань досліджуваних сталей, знаючи рівняння однієї з них.

В якості прикладу у таблиці наведено розрахункові значення границь витривалості зварних з'єднань досліджуваних сталей при різних значеннях σ_m/σ_T . Аналіз табличних даних показав, що при однаковому відношенні σ_m/σ_T , тобто при випробуваннях у порівняних умовах, у міру підвищення міцності сталі границя витривалості збільшується. Причому зі збільшенням цього відношення різниця між границями витривалості зростає.

Таблиця. Границі витривалості зварних з'єднань досліджуваних сталей.

Сталь	Границі витривалості σ_R , МПа при різних σ_m/σ_T				
	0	0,1	0,3	0,5	0,7
Ст.3сп	60	90	150	210	270
09Г2С	60	94	162	230	298
14ХНДФР	60	120	240	360	480

Відомо, що зі зростанням середнього напруження циклу за умови досягнення максимальних напружень (з урахуванням залишкових) границі плинності матеріалу відбувається зниження вихідних ЗН до рівня усталених. Враховуючі проведені раніше дослідження, які дозволили визначити діаграми граничних напружень циклу або граничних амплітуд циклу зварних з'єднань з різною величиною σ_{ocm}^y , а також використовуючи результати випробувань зварних з'єднань без ЗН, можна визначити граничні напруження зварних з'єднань досліджуваних сталей при однаковому рівні

σ_{ocm}^y . Враховуючи експериментальні та розрахункові дані, чутливість стикових зварних з'єднань до σ_{ocm}^y представлялась у вигляді залежності між відношенням граничної амплітуди циклу до відповідної границі витривалості та величиною граничних усталених залишкових напружень. В даному випадку розглядалися найцікавіші характеристики - мінімальна гранична амплітуда σ_a^y та відповідне їй граничне напруження циклу, при яких реалізується єдиний граничний цикл напружень. З аналізу результатів слід, що в з'єднаннях сталей з більш високими механічними властивостями однакові значення σ_a^y/σ_R досягаються при більш високих значеннях σ_{ocm}^y . Ця різниця зростає у міру підвищення σ_a^y/σ_R . Наприклад, $\sigma_a^y/\sigma_R = 0,5$, що відповідає $R\sigma = 0$, в з'єднаннях сталей Ст.3сп і 14ХМНДФР можна отримати при σ_{ocm}^y , рівних 170 і 440 МПа відповідно.

Користуючись отриманими даними, неважко встановити залежності границь витривалості зварних з'єднань досліджуваних сталей від граничних усталених залишкових напружень за умови, що зварні з'єднання сталей різної міцності мають однакову мінімальну граничну амплітуду циклу від зовнішнього навантаження, яка дорівнює 60 МПа. Аналіз представлених результатів дозволив зіставити границі витривалості зварних з'єднань низьковуглецевої і низьколегованих сталей різної міцності, що містять однакові значення σ_{ocm}^y (Рис. 2). З підвищенням усталених залишкових напружень вони зменшуються для досліджуваних зварних з'єднань. Однак границі витривалості зварних з'єднань сталей з більш високими механічними властивостями залишаються завжди вищими у всьому дослідженому діапазоні зміни σ_{ocm}^y . Наприклад, при зміні σ_{ocm}^y від 50 МПа до 200 МПа границя витривалості зварного з'єднання низьколегованої високоміцної сталі в порівнянні з низьковуглецевою вище в 2,2 та 4 рази відповідно. Якщо при σ_{ocm}^y , рівному 200 МПа, зниження границі витривалості зварного з'єднання низьковуглецевої сталі відбувається в 3 рази, то для зварного з'єднання високоміцної сталі тільки в 1,5 рази.

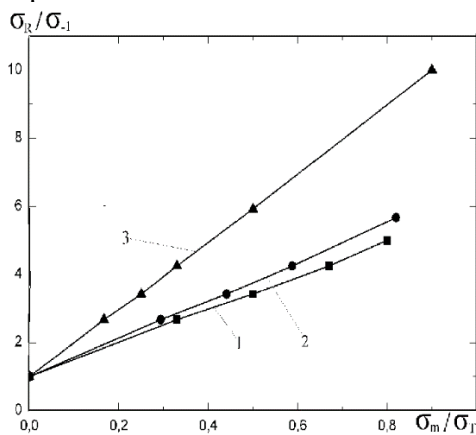


Рис.1. Залежності між відносними значеннями границь витривалості зварних з'єднань сталей Ст.3сп (1), 09Г2С (2), 14ХМНДФР (3) та середніх напружень циклу.

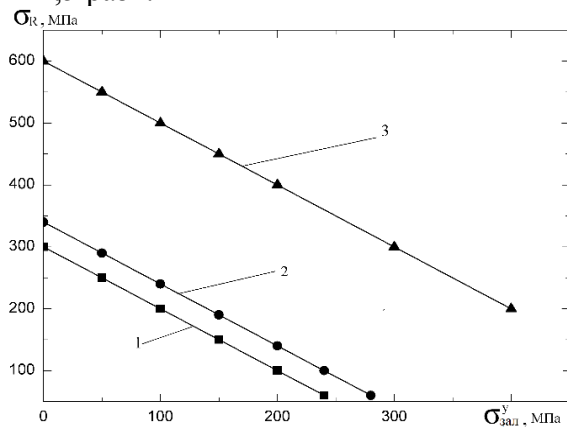


Рис.2. Залежність границь витривалості стикових з'єднань сталей Ст.3сп (1), 09Г2С (2) та 14 14ХМНДФР (3) від граничних усталених залишкових напружень.

Таким чином, отримані дані дозволили зіставити граничні напруження в зварних з'єднаннях, враховуючи їх механічні властивості і рівень усталених залишкових напружень, що може допомогти у виборі сталі при відомій величині напружень від зовнішнього навантаження.

УДК 539.3

Сергій Кобельський, к.т.н., с.н.с.

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ВПЛИВ УРАХУВАННЯ ПЛАСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ МЕТАЛУ НА ОПІР РУЙНУВАННЮ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

Анотація. У рамках змішаної проєкційно-сіткової схеми методу скінченних елементів досліджено декілька варіантів урахування пластичної анізотропії металу для оцінення її можливого впливу на опір руйнуванню корпусу реактора ВВЕР-1000.

Ключові слова: метод скінченних елементів, змішана схема, анізотропія, опір руйнуванню.

Serhiy Kobelsky, Ph.D.

INFLUENCE OF TAKING INTO ACCOUNT THE ANISOTROPIC PROPERTIES OF THE MATERIAL ON THE FRACTURE RESISTANCE OF THE VVER-1000 REACTOR VESSEL

Abstract. Within the framework of the mixed projection-grid scheme of the finite element method, several options for taking into account the anisotropic properties of the material are considered to assess its possible effect on the fracture resistance in comparison with consideration only in the isotropic formulation.

Keywords: finite element method, mixed scheme, anisotropy, fracture resistance.

В Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України (ІПМіц ім. Г.С. Писаренка НАН України) розроблено комплекс розрахункових методів та алгоритмів для розв'язання актуальних прикладних задач механіки деформованих конструкцій, що зазнають впливу інтенсивного механічного навантаження, підвищених температур та нейтронного опромінення за умов експлуатаційних і аварійних режимів навантажування. В основу розрахункового аналізу покладено концепцію змішаного методу скінченних елементів для розв'язання узагальнених крайових задач механіки у тривимірному поставленні, що описуються рівняннями стану еволюційного типу за теоріями термо-в'язко-пластичності та радіаційної повзучості з урахуванням деформаційної історії термосилового навантажування, радіаційних ефектів зміцнення, розпухання і повзучості, пластичної анізотропії та докритичного пошкодження матеріалу [1].

Для урахування анізотропних властивостей металу прийнято модель, згідно з якою головні осі девіатора напружень збігаються з осями анізотропії в кожній точці тіла, що перебуває у пластичному стані. Рівняння між компонентами напружень та пластичних деформацій для ортотропного середовища прийняті у такому вигляді [2]:

$$\begin{aligned} \lambda_{11kl} \sigma_{kl} &= \frac{2 \bar{\sigma}_i}{3 \varepsilon_i^p} \varepsilon_{11}^p, & \lambda_{1212} \tau_{12} &= \frac{1 \bar{\sigma}_i}{3 \varepsilon_i^p} \gamma_{12}^p, \\ \lambda_{22kl} \sigma_{kl} &= \frac{2 \bar{\sigma}_i}{3 \varepsilon_i^p} \varepsilon_{22}^p, & \lambda_{2323} \tau_{23} &= \frac{1 \bar{\sigma}_i}{3 \varepsilon_i^p} \gamma_{23}^p, \\ \lambda_{33kl} \sigma_{kl} &= \frac{2 \bar{\sigma}_i}{3 \varepsilon_i^p} \varepsilon_{33}^p, & \lambda_{1313} \tau_{13} &= \frac{1 \bar{\sigma}_i}{3 \varepsilon_i^p} \gamma_{13}^p, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\bar{\sigma}_i$ - інтенсивність девіатора напружень для модельного ізотропного тіла, ε_i^p - інтенсивність пластичних деформацій, ε_{ii}^p , γ_{ij}^p , σ_{kl} , τ_{ij} - компоненти тензорів

пластичних деформацій та напружень анізотропного тіла, λ_{ijkl} – компоненти тензора анізотропії ($i, j, k, l = 1, 2, 3$).

Рівняння (1) містять дев'ять незалежних параметрів анізотропії ($\lambda_{33kl} = -\lambda_{11kl} - \lambda_{22kl}$), з яких вісім є невідомими і можуть бути визначені із шести простих базових випробувань на розтяг та зсув. Значення коефіцієнта анізотропії $\lambda_{1111} = 2/3$ визначено з умови збігання кривих у координатах інтенсивність напружень – інтенсивність деформацій для анізотропного тіла і відповідного йому модельного ізотропного тіла.

Виходячи з вкрай обмежених результатів експериментальних досліджень закономірностей пружно-пластичного деформування анізотропних металевих матеріалів за умови складного напруженого стану, доцільно розглянути декілька варіантів урахування пластичної анізотропії металу, щоб оцінити їх можливий вплив на опір руйнуванню порівняно з аналізом лише в ізотропному поставленні.

Запропоновано таку процедуру розв'язання крайової задачі теорії пластичності для врахування анізотропних властивостей матеріалу. Отже, представимо тензор головних осей напружень у вигляді

$$[T] = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2l_1m_1 & 2l_1n_1 & 2m_1n_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2l_2n_2 & 2m_2n_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2l_3n_3 & 2m_3n_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & l_1m_2 + m_1l_2 & l_1n_2 + n_1l_2 & m_1n_2 + n_1m_2 \\ l_1l_3 & m_1m_3 & n_1n_3 & l_1m_3 + m_1l_3 & l_1n_3 + n_1l_3 & m_1n_3 + n_1m_3 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & l_2m_3 + m_2l_3 & l_2n_3 + n_2l_3 & m_2n_3 + n_2m_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де l_i, m_i, n_i – компоненти векторів головних площинок ($i = 1, 2, 3$),

Окрім того, прийемо, що матриця параметрів анізотропії має вигляд

$$[\lambda] = \begin{pmatrix} t_1 + t_2 & -t_1 & -t_2 \\ -t_3 & t_3 + t_4 & -t_4 \\ -t_5 & -t_6 & t_5 + t_6 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

за умови $t_1 + t_2 \geq t_3 + t_4 \geq t_5 + t_6$.

Тоді у разі покрокового розв'язання задачі теорії пластичності після визначення поточного стану вектора переміщень можна обчислити компоненти симетричного тензора деформацій, який представимо у векторній формі:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ Y_{xy} \ Y_{xz} \ Y_{yz}\}. \quad (4)$$

Компоненти симетричного тензора активних деформацій визначаються так

$$\{\varepsilon_a\} = \{\varepsilon_x - \varepsilon_{xp} \ \varepsilon_y - \varepsilon_{yp} \ \varepsilon_z - \varepsilon_{zp} \ Y_{xy} - Y_{xyp} \ Y_{xz} - Y_{xzp} \ Y_{yz} - Y_{yzp}\}, \quad (5)$$

тому компоненти девіатора тензора активних деформацій мають такий вигляд:

$$\{\varepsilon_d\} = \{\varepsilon_{xa} - \varepsilon_0 \ \varepsilon_{ya} - \varepsilon_0 \ \varepsilon_{za} - \varepsilon_0 \ Y_{xya} \ Y_{xza} \ Y_{yza}\}, \quad (6)$$

де $\varepsilon_0 = (\varepsilon_{xa} + \varepsilon_{ya} + \varepsilon_{za})/3$.

Позначимо $\{\varepsilon'_d\}$ девіатор активних деформацій, отриманий шляхом повертання вектора $\{\varepsilon_d\}$ на кути головних площин:

$$\{\varepsilon'_d\} = [T] \cdot \{\varepsilon_d\}. \quad (7)$$

Тоді після дії на нього матриці параметрів анізотропії $[\lambda]$ та зворотного повертання девіатор активних деформацій набуде вигляду:

$$\{\varepsilon''_d\} = [T'] \cdot [\lambda] \cdot [T] \cdot \{\varepsilon_d\}. \quad (8)$$

Після додавання середньої деформації ε_0 можна прийти до тензора активних деформацій та продовжити розв'язання пружно-пластичної задачі, визначивши нове значення січного модуля зсуву G .

Далі потрібно обчислити компоненти вектора девіатора напружень $\{\widehat{\sigma}_d\}$ через компоненти вектора девіатора деформацій $\{\varepsilon_d\}$

$$\{\widehat{\sigma}_d\} = \{\varepsilon_{dx}'' \cdot 2G \quad \varepsilon_{dy}'' \cdot 2G \quad \varepsilon_{dz}'' \cdot 2G \quad \gamma_{xy}'' \cdot G \quad \gamma_{xz}'' \cdot G \quad \gamma_{yz}'' \cdot G\} \quad (9)$$

та отримати новий вектор напружень $\{\sigma\}$, який буде використано для обчислення похибки на поточному кроці розв'язання задачі теорії пластичності.

Зауважмо, що вектор (8) залишається девіатором тільки у випадку, якщо матриця параметрів анізотропії має вигляд (3), тобто сума коефіцієнтів у рядку цієї матриці дорівнює нулю, хоча сама вона може бути і несиметричною.

Будемо розглядати такі варіанти матриці параметрів анізотропії $[\lambda]$:

$$1: [\lambda_1] = \begin{pmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{pmatrix}, \quad 2: [\lambda_2] = \begin{pmatrix} 4/5 & -2/5 & -2/5 \\ -2/5 & 4/5 & -2/5 \\ -2/5 & -2/5 & 4/5 \end{pmatrix},$$

які надалі будемо називати Анізотропія_1 та Анізотропія_2.

Значення $-1/3$ коефіцієнта в матриці $[\lambda_1]$ наведено в [3] для сплаву АМг6. Коефіцієнти матриці $[\lambda_2]$ обирали довільно.

Для аналізу опору руйнуванню корпусу реактора ВВЕР-1000 досліджували обраний режим аварійного охолодження із вкрапленням постульованої піднаплавної колової тріщини, розташованої на рівні четвертого зварного шва, глибиною 25 мм зі співвідношенням напівосей 0,3. Результати зіставляли з отриманими для ізотропної моделі. Розрахункові значення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) визначали методами G -інтеграла [4] та віртуального закриття тріщини (VCCT) [5].

Для визначення максимально допустимої критичної температури крихкості металу використано такі підходи: дотичної точки [6], теплового опресування [6–7], спадної гілки [4].

У таблиці 1 наведено величини критичної температури крихкості, визначені для моделей, які було розглянуто. У табл. 2 наведено найбільш консервативні відносні оцінки у разі визначення максимально допустимої критичної температури крихкості.

Таблиця 1. Визначення величина $T_{ккд}$ для колової тріщини

Модель	Метод визначення КІН			
	G	%	VCCT	%
підхід дотичної точки				
Ізотропна	95	100,00	99	100,00
Анізотропія_1	91	95,79	107	108,08
Анізотропія_2	95	100,00	111	112,12
підхід теплового опресування				
Ізотропна	54	100,00	56	100,00
Анізотропія_1	56	103,70	64	114,29
Анізотропія_2	47	87,04	54	90,43
підхід спадної гілки				
Ізотропна	78	100,00	79	100,00

Анізотропія_1	72	92,31	78	98,73
Анізотропія_2	62	79,49	68	86,08

Таблиця 2. Найбільш консервативні відносні оцінки у разі визначення максимально допустимої критичної температури крихкості

$\Delta T_{кр}$, %	Підхід	Модель	Метод
86,79	дотичної точки	Анізотропія_2	G-інтеграл
87,04	теплового опресування	Анізотропія_2	G-інтеграл
79,49	спадної гілки	Анізотропія_2	G-інтеграл

Висновки. Розвинуто загальну теорію змішаної схеми методу скінченних елементів для розв’язання актуальних прикладних задач механіки пружно-пластичного деформування з урахуванням деформаційної історії термосилового навантажування та пластичної анізотропії металу. Запропоновано та реалізовано модифікацію процедури розв’язання крайової задачі теорії пластичності для врахування пластичної анізотропії металу.

Через відсутність експериментальних даних щодо анізотропних властивостей реакторної сталі марки 15X2НМФ, яка є основним металом корпусу ядерного реактора ВВЕР-1000, проаналізовано два варіанти матриці параметрів пластичної анізотропії.

Зроблено висновки про властивості коефіцієнтів цієї матриці:

- сума коефіцієнтів у рядку матриці повинна дорівнювати нулю;
- матриця не обов’язково повинна бути симетричною.

Як свідчить аналіз результатів, отриманих внаслідок проведення чисельного експерименту з використанням запропонованих моделей урахування пластичної анізотропії металу, оцінки визначення максимально допустимої критичної температури крихкості виявились консервативнішими порівняно з отриманими тими же методами для ізотропної моделі, що свідчить про необхідність проведення натурних випробувань для отримання достовірніших даних.

Перелік посилань

1. Чирков А.Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины, 2003. – 250 с.
2. Ковальчук Б.И., Лебедев А.А., Уманский С.Э. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций. – К.: Наук. думка, 1987. – 280 с.
3. Ковальчук Б.И. К теории пластического деформирования анизотропных материалов. – Пробл. прочности. 1975, №9, – С. 8-12.
4. Харченко В.В., Чирков А.Ю. и др. Методы расчетного анализа в задачах прочности элементов оборудования реакторных установок ВВЭР. – К.: ІПМіц ім. Г.С.Писаренка НАН України, 2018. – 294 с.
5. Rybicki E.F., Kanninen M.F. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. – Engng. Fract. Mech. 1977: 9(4): 931-938.
6. Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment // IAEA-TECDOC-1627. – Vienna, 2010. – 229 p.
7. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in VVER NPPs «VERLIFE». – Version 2008. – 275 p

УДК 621.326

Віктор Ковальов, д.т.н., проф.; Яна Васильченко, д.т.н., проф.; Галина Клименко, д.т.н., проф.; Максим Шаповалов, к.т.н., доц.; Микола Шаповалов
Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РІЗЦІВ МАГНІТОІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ

Анотація. У важкому машинобудуванні різальний інструмент з твердого сплаву грає ключову роль у забезпеченні ефективного виробництва. Для підвищення продуктивності та тривалості служби інструменту, необхідно здійснювати пошук нових технологій обробки. У цьому контексті, метод обробки імпульсним магнітним полем набуває все більшого значення через свою спроможність впливати на властивості матеріалу.

Ключові слова: надійність, магнітоімпульсна обробка, збірний різець, твердий сплав

Viktor Kovalov, Ph.D., Prof.; Yana Vasylchenko, Ph.D., Prof.; Galyna Klymenko, Ph.D., Prof.; Maksym Shapovalov, Ph.D., Assoc. Prof.; Mykola Shapovalov

INCREASING THE RELIABILITY OF THE CUTTERS MAGNETIC PULSE TREATMENT

Abstract. In heavy engineering, carbide cutting tools play a key role in ensuring efficient production. To increase productivity and tool life, it is necessary to search for new processing technologies. In this context, pulsed magnetic field machining is becoming increasingly important due to its ability to influence material properties.

Keywords: reliability, magnetic pulse machining, prefabricated cutter, carbide

Однією з перспективних технологій підвищення міцності, ресурсу й експлуатаційних властивостей металевих виробів для різних галузей техніки є обробка імпульсним магнітним полем (ОІМП). Розробляються технології зміцнення методом магнітоімпульсної обробки різних матеріалів, досліджується вплив магнітної обробки на структуру й властивості оброблюваних виробів, визначаються режими обробки для різних умов [1].

Ефект підвищення якості від ОІМП пояснюється метастабільним станом системи структури твердого сплаву й резонансним відгуком її компонентів на динамічний електромагнітний вплив. При обробці твердих сплавів вивчався вплив ОІМП на структуру й властивості складових компонентів. Відомо, що міцність твердих сплавів багато в чому визначається сполучною фазою. Спостереження за поширенням руйнуючої тріщини показали, що в твердих сплавах марок ВК і ТТК руйнуюча тріщина поширюється, в основному, по кобальтовій фазі, а в двокарбідних титановольфрамкобальтових твердих сплавах руйнуюча тріщина поширюється, в основному, по фазі $(Ti,W)C$, кобальтова складова може гальмувати руйнуючу тріщину. Кобальтова фаза твердих сплавів являє собою твердий розчин вольфраму та вуглецю в кобальті. Упорядковане розташування атомів відрізняється більш низькою внутрішньою енергією в порівнянні з неупорядкованим, особливо, якщо розподіл атомів по певних вузлах кристалічних ґрат відбувається при порівняно низькій температурі, коли ентропія, пов'язана з неупорядкованістю, відіграє менш істотну роль.

Під дією магнітного поля міграція атомів у металах відбувається більш складним образом у порівнянні з дифузією тільки при термічному або імпульсному впливах і залежить як від величини й характеру магнітного поля, так і магнітних характеристик матеріалів, що дифундують. Зокрема, досить добре вивчений ефект

прискорення дифузії у твердій фазі феромагнетиків (якщо феромагнітні атоми або дифузанта, або матриці пов'язані з виникненням рушійної сили переносу магнітної природи. Значно менш зрозуміла зміна швидкості переносу у випадку слабких магнітних полів і неферомагнітних металів або сплавів, хоча такий вплив експериментально підтверджений для випадків дифузії як у твердій, так і в рідкій фазі [2].

Накладення змінного магнітного поля приводить, як було відзначено, до розширення дифузійної зони, що є прямим доказом прискорювального впливу зазначеного фактора. Відомо, що змінне магнітне поле викликає індукційні струми [3].

Зміна властивостей кобальтової фази при ОІМП зводиться до перебудови атомів під впливом магнітного поля. Енергія, необхідна для рекристалізації або виділення дисперсної фази, вище енергії магнітного поля, що створює ефект ОІМП. Отже, ОІМП не може впливати на фазовий состав або текстуру матеріалу. Однак виділення фази, кристалізація або напруги можуть розвиватися уздовж таких кристалографічних напрямків, що енергія кристалізації або виділення буде мінімальна в певному напрямку, що залежить від напрямку магнітного поля.

У будь-якому матеріалі концентрація буде змінюватися приблизно періодично відносно середнього значення (одномірний випадок):

$$C(x) = C_0 + C_m \cos(\pi x/l).$$

Це відповідає зміні концентрації на відстані l уздовж осі x від максимального значення $C_0 + C_m$ до мінімального $C_0 - C_m$. Ці градієнти будуть поступово зменшуватися за рахунок переміщення розчиненого елемента з областей з більш високою концентрацією в області з більш низькою концентрацією. Якщо коефіцієнт дифузії не залежить від состава, то

$$C(x, t) = C_0 + C_m \cos(\pi x/l) \exp(-\pi^2 D t/l^2).$$

Це означає, що перехід від концентрації C до кінцевої концентрації C_0 у будь-якому об'ємі зразка

$$C - C_0 \approx \exp(-t/\tau),$$

де τ – час релаксації.

Зменшенню τ сприяє збільшення коефіцієнта дифузії і зменшення відстані l між максимумами й мінімумами концентрації.

Для кубічних кристалічних ґраток коефіцієнт дифузії:

$$D = \frac{1}{6} \Gamma \alpha^2,$$

де Γ – частота перескоків атомів, α – період кристалічної ґратки.

Частота перескоків:

$$\Gamma = z \nu \exp\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right),$$

де z – кількість сусідніх атомів, ν – частіть коливань у даному напрямку, яка приведе до перескоків атомів; ΔG – зміна вільної енергії кристалічної ґратки.

Проведені дослідження впливу ОІМП на надійність різців при лабораторних та експлуатаційних випробуваннях токарних різців. Випробування проводилися відповідно до методики тривалих випробувань на надійність різального інструменту [4] на токарному верстаті мод. КЖ16274Ф3 модульними різцями висотою державки $H = 45$ мм при обробці валка зі сталі 90ХФ з режимами: $t = 12$ мм, $S = 1,6$ мм/об., $\nu = 52$ м/хв. Підвищення міцності твердосплавного інструмента після ОІМП пояснюється зменшенням розтягувальних напружень у кобальтовій фазі, що перешкоджає

поширенню руйнуючих тріщин у кобальтовій фазі твердого сплаву, тобто веде до підвищення його міцності (рис.1).

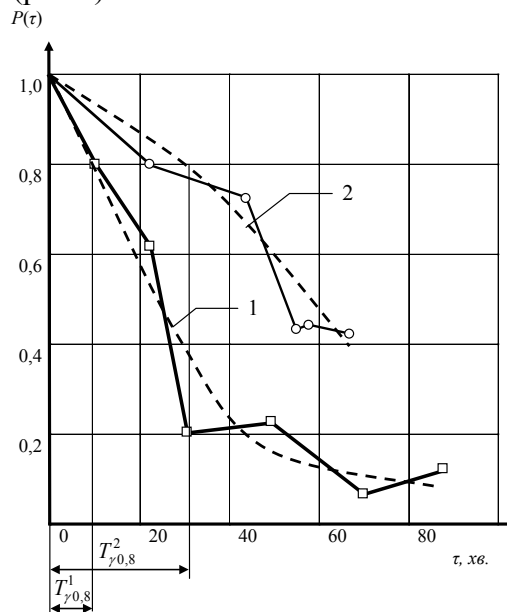


Рис. 1. Результати аналізу безвідмовної роботи токарних різців пластинами Т5К10 при порівняльних випробуваннях 1 – Т5К10, 2 – Т5К10+ОІМП
 — статистичні — — — теоретичні

Аналіз показав збільшення середнього періоду стійкості зміцненого інструмента, а також зменшення коефіцієнта варіації стійкості інструмента й зміни закону розподілу стійкості з Вейбула до нормального, що дало змогу підвищити γ -відсотковий період стійкості від 7 до 35 хв. при підвищенні середнього періоду в 1,6 рази, що особливо важливо для верстатів зі ЧПК.

Аналіз результатів порівняльних експлуатаційних випробувань збірних твердосплавних різців, з пластинами зміцнених ОІМП показав змінення показників надійності: коефіцієнт варіації стійкості знизився в 2,33 рази, середній період стійкості підвищився у 1,6 рази, гама-процентний період стійкості для $\gamma = 80\%$ підвищився у 3,5 рази, що особливо важливе для важких токарних верстатів з ЧПК.

Для оцінки впливу ОІМП на стабільність різальних властивостей пластин для чорнового точіння виготовлених із твердих сплавів на прикладі сплаву Т5К10 проаналізована зміна їх мікротвердості до і після обробки, загальна картина якої представлена на рис. 2.

Вимір мікротвердості поверхневого шару проводився за допомогою приладу ПМТ-3. Величина навантаження на індентор становила $P = 0,5$ Н.

Величину мікротвердості визначали по формулі:

$$H_{\mu} = \frac{1854P}{d^2},$$

де P – навантаження на індентор, Н; d – розмір діагоналі відбитка, мкм.

На підставі аналізу розподілу мікротвердості на поверхні досліджуваного твердого сплаву було отримано, що після ОІМП чисельне значення її збільшується в середньому від $\bar{H} = 16100$ МПа до $\bar{H} = 16900$ МПа, а також коефіцієнт варіації значень мікротвердості знижується від 0,13 до 0,07 (значимість відмінностей середніх значень коефіцієнта варіації перевірений за критерієм Стьюденту). для твердих сплавів існує значення напруженості магнітного поля при ОІМП, при якому відбувається

максимальне переміщення дифракційних ліній кобальтової фази й збільшення інтенсивності лінії (100) Co, яке дорівнює близько $1,8 \cdot 10^5$ А/м.

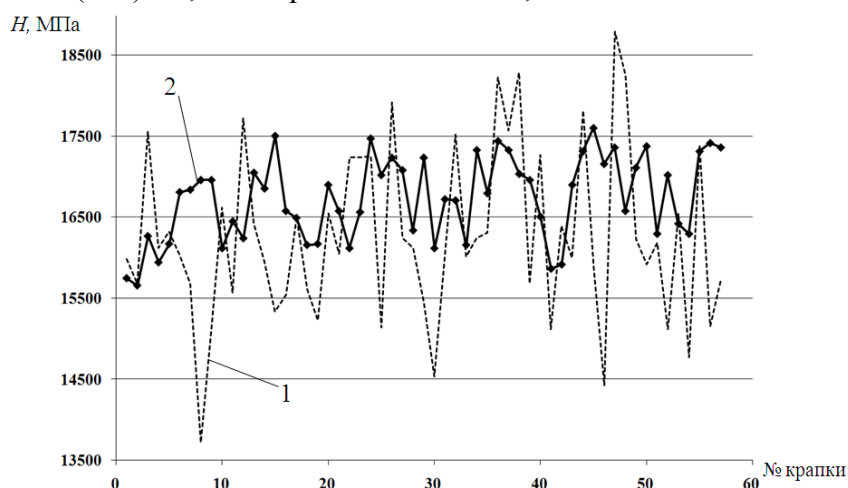


Рис. 2. Порівняльна картина виміру мікротвердості поверхні зразків з твердого сплаву Т5К10: 1 – без ОІМП, 2 – після ОІМП

Підвищення міцності твердосплавних різальних пластин для токарних різців, обробленого імпульсним магнітним полем, пояснюється стабілізацією балансу напруг у кобальтовій фазі й перешкоджає поширенню руйнуючих тріщин, що веде до підвищення його міцності. Експлуатаційні тривалі випробування різальних пластин Т5К10 збірного токарного різця довели, що ОІМП підвищує стабільність роботи різального інструменту, про що свідчить зменшення діапазону розсіювання стійкості від 6–94 до 22–66 хв. і зменшення коефіцієнту варіації від 0,7 до 0,3. Визначені раціональні режими ОІМП твердих сплавів для отримання структури, яка має максимальні значення міцності. Напруженість магнітного поля при цьому дорівнює $1,8 \cdot 10^5$ А/м.

Перелік посилань

1. Soroka O., Rodichev I., Shabetia O., Kovalov V., Vasilchenko Y., Shapovalov M. Strength of tool materials. Modern trends in material processing : collective monograph / Edited by Predrag Dašić. Vrnjačka Banja, 2018. Pp. 185–217. ISBN 978-86-6075-065-7.

2. Родічев Ю. М., Сорока О. Б., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Прискорені випробування різальних пластин при інтенсивному контактному навантаженні. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. Краматорськ, 2018. № 1 (43). С. 181–187.

3. Shapovalov M. Kovalov V., Vasylichenko Y. Increase the productivity of hard-alloy tools for heavy machine tools by processing impulse magnetic field (Підвищення продуктивності твердосплавних інструментів для важких верстатів шляхом обробки імпульсним магнітним полем). Вісник ТНТУ. Тернопіль, 2018. № 4 (92). С. 52–59.

4. Шаповалов М. В., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В. Вплив результатів виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів, зміцнених ОІМП на підвищення ефективності технологічного процесу різання. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. Харків, 2018. Вип. 4 (6). С. 84–92

УДК 621.791.927.93

Юрій Кусков¹, д.т.н., с.н.с.; Валерій Проскудін¹, к.т.н.; Антон Нетяга¹, к.т.н., м.н.с.; Ігор Чірков²; Віктор Бовсуновський³

¹ Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

² ТОВ «ВКФ «Кривбастехмаш», Україна

³ ТОВ «НВП «Промкомплект», Україна

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ОБЛАДНАННЯ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ У СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

Анотація. Представлено результати виконання електрошлакових наплавок електродом великого перерізу та дробом у струмопідвідних кристалізаторах різного перерізу.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопідвідні кристалізатори, довговічність обладнання.

Yuriy Kuskov, Ph.D.; Valeriy Proskudin, Ph.D.; Anton Netyaga, Ph.D.; Ihor Chirkov, Viktor Bodsunovskyi

INCREASING THE DURABILITY OF WORKING BODIES OF MINING AND METALLURGICAL COMPLEX EQUIPMENT BY ELECTROSLAG SURFACING IN A CURRENT-CARRYING CRYSTALLIZER

Abstract. The results of electroslag surfacing with a large-section electrode and shot in current-carrying crystallisers of different cross-sections are presented.

Keywords: electroslag surfacing, current-carrying crystallisers, equipment durability.

Обладнання гірничо-металургійного комплексу часто експлуатується в складних умовах підвищеного абразивного зношування з різним ступенем ударного впливу. Зазвичай для експлуатації в таких умовах робочі органи обладнання виготовляють зі сталі 110Г13Л або термічно зміцнених низьковуглецевих низьколегованих сталей. Однак ці матеріали не забезпечують необхідної довговічності – під час експлуатації втрачають великі маси металу. Для вирішення цього складного завдання можна використовувати електрошлакове наплавлення (ЕШН), що має підвищену продуктивність і дає змогу якісно наплавляти шари зносостійкого металу великої товщини. Проте звичайні способи ЕШН не завжди дають змогу досягти позитивних результатів як з погляду стійкості напавленого металу, так і міцності з'єднання основного та напавленого металу.

В ІЕР ім. Є.О. Патона розроблено оригінальну технологію ЕШН як дротами, електродами великого перерізу, так і дискретними матеріалами (дробом), наплавлення здійснюється з використанням так званого струмопідвідного кристалізатора (СПК). Кристалізатор являє собою секційний водоохолоджуваний пристрій, характерними ознаками якого є можливість як завгодно довго самостійно підтримувати електрошлаковий процес і забезпечення обертання шлакової ванни в горизонтальній площині. Завдяки першій особливості дзеркало шлакової ванни залишається відкритим для подачі наплавочних матеріалів різного виду, зокрема, дискретних; при цьому унеможливується жорсткий зв'язок між подачею наплавочного матеріалу в шлакову ванну та режимом наплавлення. Обертання ж шлаку забезпечується тільки завдяки особливому конструктивному виконанню пристрою, без допомоги будь-якого додаткового зовнішнього впливу. Можливо використовувати як виготовлювальне, так і відновлювальне наплавлення.

На даний час експлуатуються СПК різних розмірів і перетину: круглого – \varnothing 60...200 мм, і квадратного – 200x200 і 250x250 мм.

Виготовлювальне наплавлення в СПК круглого перерізу \varnothing 150 мм електродом і дробом з високохромистого чавуну було здійснене з метою зміцнення бічного футерування щоквої дробарки СМД-111. При цьому на листи зі сталі марки Ст3 наплавляли локально розташовані шари чавуну товщиною \sim 20 мм (рис. 1). Отримані біметалеві футерування показали стійкість під час дроблення базальту \sim у 2 рази вищу, ніж у тих, що зазвичай застосовуються зі сталі 110Г13Л.



Рис. 1 Наплавлена футеровка щоквої дробарки

За допомогою відновлювального наплавлення в СПК квадратного перерізу (200x200 мм) було відремонтовано нижню поверхню ковша навантажувача ємністю 15 м³ фірми "Caterpillar". На зони ковша, що особливо зношуються, було приварено необхідних розмірів біметалеві сталі-чавунні армувальні елементи, вирізані з наплавлених біметалевих заготовок (мал. 2), що дали змогу під час експлуатації практично повністю зберегти футерувальні зносостійкі листи, які застосовують для захисту робочої поверхні ковша від зношування.



Рис. 2 Ківш навантажувача «Caterpillar» ємністю 15 м³, зміцнений зносостійкими листами і біметалевими армуючими елементами (світлого кольору)

УДК 621.891

Олег Маковкін. к.т.н., доц.; Ігор Вальчук

Хмельницький національний університет, Україна

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОШЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

Анотація. У ході наших досліджень в області автомобільної техніки було виявлено систематичні закономірності та особливості зношування конструкційних матеріалів, зі зносостійкими покриттями, які були нанесені за різними технологіями, у залежності від зміни режимів тертя. Наші дослідження привели до виявлення фізичних параметрів трибологічних властивостей та їх зміни в процесі тертя.

Ключові слова: знос, зносостійкі покриття, автоматичне вимірювання, товщина покриттів, хімічний склад.

Oleg Makovkin, Ph.D., Assoc. Prof., Igor Valchuk

AUTOMATED CONTROL OF COATING THICKNESS TO PREDICT WEAR OF PARTS

Abstract. In the course of our research in the field of automotive technology, systematic patterns and features of wear of structural materials with wear-resistant coatings that were applied using different technologies, depending on the change in friction modes, were revealed. Our research led to the identification of physical parameters of tribological properties and their changes in the friction process.

Keywords: wear, wear-resistant coatings, automatic measurement, coating thickness, chemical composition.

За останні десятиліття зносостійкі покриття широко використовуються в різних галузях, виконуючи різноманітні функції в умовах від хімічного складу до методів нанесення. Це важливо, оскільки розробка таких покриттів є еквівалентною створенню нового матеріалу з унікальними властивостями.

Під час розробки нових покриттів важливе лабораторне дослідження зносостійкості, яке дозволяє прогнозувати тривалість роботи трибопари з покриттям. Формування вторинних структур під впливом умов і режимів тертя є ключовим завданням, оскільки це визначає товщину покриття.

Недостатня або занадто велика товщина покриття може суттєво впливати на результат: відмінність у показниках адгезії та недостатній трибологічний ефект від першого випадку, або ризик розриву через внутрішні напруження від другого випадку. Тобто, товщина покриття грає вирішальну роль у досягненні бажаних показників зносостійкості.

Встановлення характеру та динаміки процесу зношування покриття з плином часу є важливим аспектом. Зношуючи необхідну та достатню товщину покриття дозволяє ефективно впливати на результати експлуатації, а виявлення оптимальних значень гарантує максимальні показники зносостійкості. Способи визначення зносостійкості покриттів, спрямовані на встановлення трибологічних характеристик, відіграють ключову роль у цьому процесі.

Під час обробки зразка може відбутися зміна внутрішньої структури на його поверхні або в певних частинах через неконтрольовані високі тиски та температури. Такі впливи можуть обмежувати результати досліджень і використовувати їх лише для порівняльного аналізу. У автомобільній сфері ці фактори можуть спричинити значні похибки у висновках щодо матеріалів та покриттів. Використання стандартних методик

дозволяє встановити трибологічні властивості як покриття, так і базового матеріалу, але це може призводити до отримання середніх значень, оскільки розмежування зношування бази та покриття може бути складним.

В автомобільній галузі існують трибологічні пари, такі як покриття - основа або покриття - покриття (у випадку багат шарових покриттів), які демонструють високу стійкість до зношування, незважаючи на невелику товщину (декілька мікрометрів). Дослідження показують, що зі збільшенням товщини покриттів навіть невеликий знос може стати більш інтенсивним [1-5]. Це підтверджує, що для оцінки трибологічних характеристик покриттів слід використовувати саме трибологічні методи, а не будь-які інші підходи.

Один із способів захисту вузла тертя від зношування в автомобільній сфері полягає у використанні зносостійких покриттів за допомогою різноманітних технологічних методів. Нанесення композитних та багат шарових покриттів виконується різними способами, такими як спікання порошків, наплавлення, гальванічні методи та інші.

Мета і постановка задачі

Метою цього дослідження є відстеження процесу зменшення товщини покриття під впливом зношування та аналіз зміни трибологічних показників під час експлуатації, зосереджуючись на контексті автомобільної техніки.

Виклад матеріалів досліджень

Дослідження проводились на сталі ХВГ (хімічний склад представлено в табл. 1) за допомогою модернізованої трибомашини УМТ 2168 [7], спеціально адаптованою для автомобільної тематики. Це дозволило автоматично фіксувати та записувати трибологічні показники, такі як лінійне зношування, момент тертя та середня температура в зоні тертя з частотою 0,5 секунди, без необхідності знімати зразок з установки. Отримані дані оброблялися на комп'ютері для подальшого аналізу результатів.

Таблиця 1 Хімічний склад досліджуваних сталей

Марка Сталі	Хімічний склад, % (ваговий)									
	C	Si	Cu	Mn	Ni	P	Cr	S	W	Mo
ХВГ	0,90	0,10	<0,3	0,80	<0,3	<0,0	0,90	<0,0	1,20	<0,3
	-	-	0	-	5	3	-	30	-	0
	1,05	0,40		1,10			1,20		1,60	

Сталь була піддана термічній обробці, в результаті чого твердість за шкалою Роквелла становила HRC 55. Після цього зразки були піддані шліфуванню для видалення обезвуглецьованого шару, досягаючи шорсткості Ra від 0,8 до 1,6.

Дослідження проводились за схемою сухого тертя диск-палець з сферичною поверхнею (див. рис. 1), що має переваги для автомобільної тематики: відсутність необхідності в припрацюванні, відсутність перекосів та похибок базування, можливість досягання високих питомих тисків в зоні контакту.

Основна мета досягається завдяки обраній сферичній робочій поверхні зразка, яка не потребує додаткового припрацювання. Фіксація зношування здійснюється за допомогою датчика лінійного переміщення, що дозволяє визначити границю зношування покриття та основи без переривання процесу тертя.

Вимоги до робочій поверхні зразка включають 100% прилягання до контртіла та негайне припрацювання, що досягається за допомогою використання сферичної поверхні тертя (див. рис. 1).

Проведені ряд експериментів дозволили виявити кілька ключових областей зношування на зразках з покриттями, які можна умовно позначити на рис. 1: а) точка контакту зразка з контртілом на етапі початкового тертя, відзначена як переріз I-I та точка А (в даному моменті відбуваються максимальні питомі тиски), що забезпечує негайне припрацювання та 100% подальше прилягання контактуючих поверхонь; б) область зношування безпосередньо покриття, відзначена як переріз II-II та площина В; в) перехідна зона загального зношування матриці та покриття, відзначена як переріз III-III, зношування покриття (площина С) та основи (площина D).

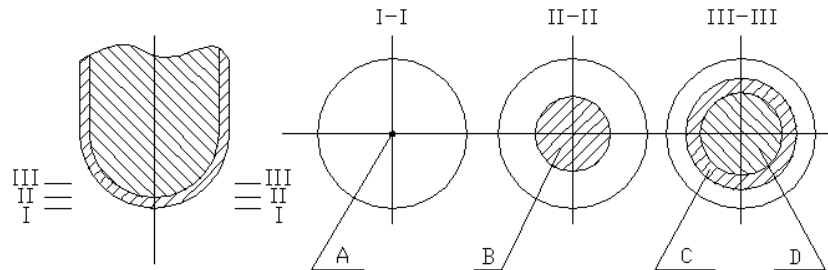


Рис. 1. Стадії зношування зразка з покриттям

Для оцінки стійкості до зношування використовували зразки з термічно зміцненої сталі ХВГ (HRC 55). Контртіло виконане з високовуглецевої термічно зміцненої сталі У10А HRC 62. Випробування проводились за схемою тертя "диск - палець" зі сферичною формою контакту (див. рис. 1). Покриття AlN-ZrB₂ було нанесено на зразок методом електроіскрового легування з товщиною приблизно 0,1 мм. Режим випробування включав початковий питомий тиск 1300 МПа та швидкість ковзання 0,67 м/с. Ці експерименти важливі для автомобільної галузі, оскільки дозволяють визначити ефективність матеріалів у вузлах тертя та забезпечити оптимальні характеристики для автомобільних деталей.

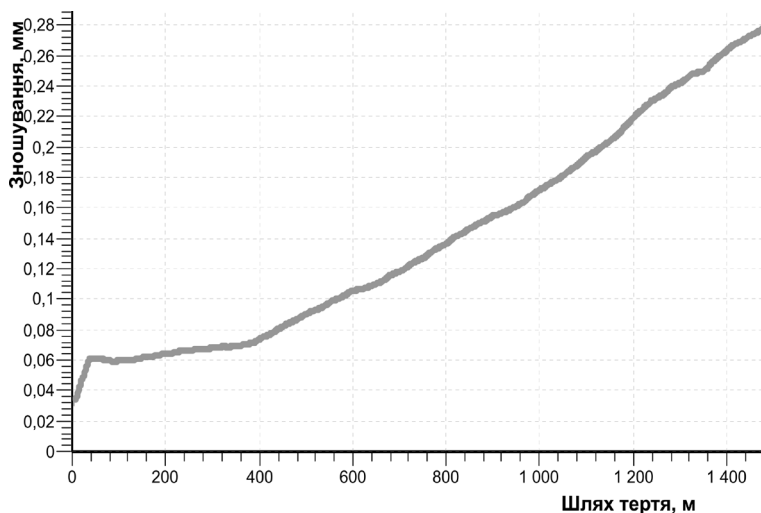


Рис. 2 Зміна величини лінійного зношування від шляху тертя

Як ілюстровано на рисунках 2–4, представлені дані, отримані під час тертя. На рисунку 2 зображено лінійне зношування покриття та основи, що можна розчленувати на три етапи: 1) 0 ... 30 м, 2) 30 ... 400 м, 3) 400 ... ∞. З відомостей про витрати матеріалу при нанесенні покриття відомо, що товщина покриття становить приблизно 0,1 мм. Перегин кривої при досягненні шляху тертя 400 м відповідає зношуванню величиною $h = 0,08$ мм (рисунку 2), після чого інтенсивність зношування збільшилась. Тобто

фактична товщина покриття становить 0,08 мм. Також проведено визначення трибологічних властивостей цього покриття та особливостей його трибологічної поведінки під час тертя та зношування.

Окрім зазначених трибологічних характеристик, технічні можливості обладнання дозволяють встановлювати процес зміни коефіцієнта тертя, середньої температури у зоні тертя та інтенсивності зношування. Загальновідомо, що коефіцієнт тертя для певної трибопари при незмінних умовах тертя є сталим. На рисунку 3 видно, що коефіцієнт тертя зазнає змін. Ця зміна пов'язана із зношуванням покриття на відстані 250 м шляху тертя, від 250 до 400 м — зношуванням, частковим контактом мікрориступів основи (шорсткість). Кількість мікрориступів від 250 до 400 м поступово збільшувалась, а отже, частка площі контакту покриття зменшувалась, що призводило до зміни коефіцієнта тертя та температури (рисунок 3, 4).

Є випадки, коли точно визначити межу між основою та покриттям стає викликом, і тому необхідно розглядати комплекс трибологічних характеристик, таких як коефіцієнт тертя, температура в області тертя та інтенсивність зношування. Для отримання більш точних даних щодо товщини покриття, особливо у випадку дифузійних покриттів, виникає важкість через плавний перехід від більш насиченого шару до менш насиченого.

Визначення товщини такого шару виявляється непростим завданням, оскільки існує гладкий перехід від твердої поверхні до менш твердої основи. Зміна твердості визначається за допомогою твердоміра на розрізаному та спеціально підготовленому зразку. Ця методика виявляється досить трудомісткою, особливо важко розрізати зразок та підготувати його, вимагаючи спеціального обладнання та високої кваліфікації лаборанта.

З рисунків 3 і 4 видно, що відносна стабільність трибологічних параметрів відбувається приблизно після 500 метрів (усереднена штрихована крива), що пояснюється інертністю температурних показників та залишків продуктів тертя. Це має важливе значення для автомобільної галузі, оскільки дозволяє визначити ефективність матеріалів у вузлах тертя та забезпечити оптимальні характеристики для автомобільних деталей.

Перелік посилань

1. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. - М.: Машиностроение, 1986. - 192 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. -М.: Машиностроение, 1993. -336с.
3. Верещака А.С. Основные аспекты применения и совершенствования режущих инструментов с износостойкими покрытиями // СТИН 2000. -№9. С.33-40
4. Солдатенков И. А.//Трение и износ. 1985. Т. 6, № 2. С. 247—254.
5. Солдатенков И. А.//Трение и износ. 1986. Т. 7, № 3. С. 452—459.
7. Я.М. Гладкий, А.А. Таранчук, О.М. Маковкін, О.А. Лаба. Автоматизація досліджень процесу тертя та зношування // Вісник Хмельницького національного університету, 2005. -№1. -12-16с

УДК 536.2

Михайло Михайлишин, к.ф.-м.н., доц.; Володимир Михайлишин

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТОНКИХ ОБОЛОНОК

Анотація: В роботі отримано початково-крайову задачу теплопровідності для тонких пласти і оболонок в припущенні про поліноміальний розподіл температури за товщиною довільного порядку.

Ключові слова: теплопровідність, пластина, оболонка, початково-крайова задача

Mykhailo Mykhailyshyn, Ph.D., Assoc. Prof.; Volodymyr Mykhailyshyn

EQUATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF THIN SHELLS

Abstract. In the work, the initial-boundary value problem of thermal conductivity for thin layers and shells is obtained under the assumption of a polynomial distribution of temperature along the thickness of an arbitrary order.

Keywords: thermal conductivity, plate, shell, initial boundary value problem

Дослідження напружено-деформованого стану тонких елементів конструкцій, які працюють в умовах інтенсивного нерівномірного нагріву, потребує попереднього визначення температурного поля. Однією з проблем, які при цьому виникають, є приведення трьохмірної задачі теплопровідності до деякої двохмірної задачі теплопровідності для тонких пластин і оболонок. Більшість авторів використовують припущення про постійність температури за товщиною, або про лінійний розподіл температури по товщині. Ці припущення не завжди оправдуються. Особливо великі похибки при визначенні температурного поля pojawiaються в початкові моменти інтенсивного одностороннього нагріву, як це має місце, наприклад, при індукційному наплавленні.

Приведення просторової задачі теплопровідності до двохмірної проводилося багатьма авторами при використанні різних припущень. В роботі [1] використовується операторний метод в комплексі з методом усереднення температури по товщині стінки. Отримані наближені рівняння, які відповідають лінійному і кубічному розподілу температури по товщині оболонки. В роботі [2] зміна температури за товщиною оболонки апроксимується поліномами довільного порядку. Визначення температурного поля зводиться до розв'язування системи диференціальних рівнянь відносно деяких інтегральних за товщиною характеристик температурного поля. Ці рівняння не враховують термопружного розсіювання енергії і внутрішніх джерел тепла, що важливо в задачах індукційного нагріву.

Використаємо рівняння теплопровідності в криволінійних координатах [1]

$$\Delta_1 t - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\gamma_\varepsilon}{\alpha} \frac{\partial e}{\partial \tau} - \frac{W_0}{\lambda}, \quad (1)$$

де

$$\Delta_1 = \frac{1}{H_1 H_2} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{H_2}{H_1} \frac{\partial}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{H_1}{H_2} \frac{\partial}{\partial \beta} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(H_1 H_2 \frac{\partial}{\partial \gamma} \right) \right], \quad (2)$$

$$H_1 = A(1 + k_1 \gamma), \quad H_2 = B(1 + k_2 \gamma), \quad H_3 = 1, \quad -\frac{h}{2} \leq \gamma \leq \frac{h}{2},$$

$\lambda, \alpha = \frac{\lambda}{c_m}$ – коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності,
 $e(\alpha, \beta, \gamma, \tau)$ – об'ємне розширення,

γ_t – коефіцієнт термопружного розсіювання, $W_0(\alpha, \beta, \gamma, \tau)$ – густина джерел тепла.

Розписуючи останній член в операторі Δ_1 і нехтуючи членами $k_1\gamma$ і $k_2\gamma$ порівняно з одиницею, після деяких перетворень рівняння (1) приведеється до вигляду

$$\Delta t - k^2 t + \frac{\partial^2 t}{\partial \gamma^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\gamma_t}{a} \frac{\partial e}{\partial \tau} - \frac{W_0}{\lambda}, \quad (3)$$

де

$$\Delta = \frac{1}{AB} \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{B}{A} \frac{\partial}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\frac{A}{B} \frac{\partial}{\partial \beta} \right) \right], \quad k = \frac{k_1 + k_2}{2}. \quad (4)$$

Шукаємо р'язв'язок рівняння (3) у вигляді [2]

$$t(\alpha, \beta, \gamma, \tau) = \sum_{i=0}^m T_i(\alpha, \beta, \tau) \gamma^i. \quad (5)$$

Введемо позначення

$$\theta_p = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} t \gamma^p d\gamma, \quad E_p = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} e \gamma^p d\gamma, \quad W_p = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} W_0 \gamma^p d\gamma. \quad (6)$$

Помножимо рівняння (3) на $\gamma^p d\gamma$ і проінтегруємо по товщині оболонки. Після доволі громіздких перетворень отримаємо

$$\begin{aligned} & \Delta \theta_p - k^2 \theta_p + p(p-1) \theta_{p-2} - \\ & - \frac{1}{2AB} \left(\frac{h}{2} \right)^p \left\{ \frac{B}{A} \frac{\partial h}{\partial \alpha} \left[\frac{\partial t_+}{\partial \alpha} + (-1)^p \frac{\partial t_-}{\partial \alpha} \right] + \frac{A}{B} \frac{\partial h}{\partial \beta} \left[\frac{\partial t_+}{\partial \beta} + (-1)^p \frac{\partial t_-}{\partial \beta} \right] \right\} + \\ & + \left(\frac{h}{2} \right)^p \left[\frac{\partial t_+}{\partial \gamma} - (-1)^p \frac{\partial t_-}{\partial \gamma} \right] - p \left(\frac{h}{2} \right)^{p-1} [t_+ - (-1)^{p-1} t_-] - \frac{1}{a} \frac{\partial \theta_p}{\partial \tau} = \frac{\gamma_t}{a} \frac{\partial E_p}{\partial \tau} - \frac{W_p}{\lambda} \end{aligned} \quad (7)$$

Тут позначено $t_+ = t(h/2)$, $t_- = t(-h/2)$.

Нехай на лицьових поверхнях $\gamma = \pm h/2$ виконуються умови конвективного теплообміну із зовнішнім середовищем:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial t}{\partial n} &= -\alpha_- (t - t_c^-) \text{ при } \gamma = -h/2, \\ \frac{\partial t}{\partial n} &= -\alpha_+ (t - t_c^+) \text{ при } \gamma = h/2. \end{aligned} \quad (8)$$

Враховуючи умови (8) можна показати, що

$$\frac{\partial t}{\partial \gamma} \left(\mp \frac{h}{2} \right) = \frac{\partial t_{\mp}}{\partial \gamma} = \pm \frac{\alpha_{\mp} A_0}{2\lambda AB} (t_{\mp} - t_c^{\mp}) \mp \frac{1}{2AB} \left(\frac{B}{A} \frac{\partial t_{\mp}}{\partial \alpha} \frac{\partial h}{\partial \alpha} + \frac{A}{B} \frac{\partial t_{\mp}}{\partial \beta} \frac{\partial h}{\partial \beta} \right),$$

де позначено

$$A_0 = \sqrt{(2AB)^2 + \left(B \frac{\partial h}{\partial \alpha} \right)^2 + \left(A \frac{\partial h}{\partial \beta} \right)^2}.$$

Після підстановки знайдених виразів в рівняння (7), останнє приведеється до такого виду

$$\Delta\theta_p - k^2\theta_p + p(p-1)\theta_{p-2} - \left(\frac{h}{2}\right)^{p-1} \left\{ \frac{h}{2} \cdot \frac{A_0}{2\lambda AB} [\alpha_+(t_+ - t_c^+) + (-1)^p \alpha_-(t_- - t_c^-)] + p[t_+ - (-1)^{p-1}t_-] \right\} (9)$$

$$-\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta_p}{\partial \tau} = \frac{\gamma_t}{\alpha} \frac{\partial E_p}{\partial \tau} - \frac{W_p}{\lambda}.$$

На контурі оболонки теж використовуємо умови конвективного теплообміну із зовнішнім середовищем

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\alpha_3(t - t_{zc}).$$

Після перетворення цієї умови з врахуванням (6) дістанемо відповідні умови для функцій θ_p

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial n} = \frac{-\alpha_3}{\lambda} (\theta_p - \theta_{zp}) + \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial n} \left(\frac{h}{2}\right)^p [t_+ + (-1)^p t_-]. \quad (10)$$

Тут позначено

$$\theta_{zp} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} t_{zc} \gamma^p dy,$$

t_{zc} – температура зовнішнього середовища зі сторони контура оболонки.

Якщо в початковий момент часу виконується умова

$$t = t_0(\alpha, \beta, \gamma) \text{ при } \tau = 0,$$

то після перетворення вона прийме вигляд

$$\theta_p = \theta_{0p} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} t_0(\alpha, \beta, \gamma) \gamma^p dy \text{ при } \tau = 0, \quad (11)$$

Таким чином задача звелася до початково-крайової задачі (9-11) відносно температурних моментів θ_p , $p = 0, 1, 2, \dots$. Однак в праві частини рівнянь (9) і граничної умови (10) входять величини

$$t_{\pm} = t\left(\pm \frac{h}{2}\right) = \sum_{l=0}^m T_l(\alpha, \beta, \tau) \left(\pm \frac{h}{2}\right)^l.$$

Підставляючи (5) у вираз для θ_p (6), знайдемо

$$\theta_p = \sum_{l=0}^m T_l \left(\frac{h}{2}\right)^{l+p+1} \cdot \frac{1 + (-1)^{l+p}}{l+p+1}. \quad (12)$$

Обмежуючись деякою кількістю членів ряду m в (11), отримаємо систему алгебраїчних рівнянь, з якої можна визначити функції $T_l(\alpha, \beta, \tau)$ через θ_p . Для прикладу, коли $m = 3$, рівняння (11) запишуться

$$\begin{aligned} \theta_0 &= hT_0 + \frac{h^3}{12}T_2, & \theta_1 &= \frac{h^3}{12}T_1 + \frac{h^5}{80}T_3, \\ \theta_2 &= \frac{h^3}{12}T_0 + \frac{h^5}{80}T_2, & \theta_3 &= \frac{h^5}{80}T_1 + \frac{h^7}{448}T_3. \end{aligned}$$

Розв'язавши отриману систему рівнянь відносно T_l , $l = 1, 2, 3$, знайдемо

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{3}{h} \left(\frac{3}{4}\theta_0 - \frac{5}{h^2}\theta_2 \right), & T_1 &= \frac{15}{h^3} \left(5\theta_1 - \frac{28}{h^2}\theta_3 \right), \\ T_2 &= -\frac{15}{h^3} \left(\theta_0 - \frac{12}{h^2}\theta_2 \right), & T_3 &= -\frac{140}{h^5} \left(3\theta_1 - \frac{20}{h^2}\theta_3 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Враховуючи (12) і (5) дістанемо

$$t_{\pm} = t \left(\pm \frac{h}{2} \right) = \frac{3}{h} \left(-\frac{\theta_0}{2} + \frac{10}{h^2} \theta_2 \right) \pm \frac{5}{h^2} \left(-3\theta_1 + \frac{28}{h^2} \theta_3 \right). \quad (14)$$

Підставляючи знайдені значення в рівняння (9) і позначивши $\alpha^{\pm} = \alpha_+ \pm \alpha_-$, отримаємо наступну систему рівнянь

$$\begin{aligned} & \Delta\theta_0^{(j+1)} - k^2\theta_0^{(j+1)} - \frac{1}{a} \frac{\partial\theta_0^{(j+1)}}{\partial\tau} - \frac{\gamma_t}{a} \frac{\partial E_0}{\partial\tau} + \frac{W_0}{\lambda} - \\ & - \frac{1}{\lambda} \left\{ 3 \left(-\frac{\theta_0^{(j+1)}}{2} + \frac{10}{h^2} \theta_2^{(j)} \right) \alpha^- + \frac{5}{h^2} \left(-3\theta_1^{(j)} + \frac{28}{h^2} \theta_3^{(j)} \right) \alpha^+ - \alpha_+ t_c^+ + \alpha_- t_c^- \right\} = 0, \\ & \Delta\theta_1^{(j+1)} - \left(k^2 - \frac{30}{h^2} \right) \theta_1^{(j+1)} - \frac{1}{a} \frac{\partial\theta_1^{(j+1)}}{\partial\tau} - \frac{\gamma_t}{a} \frac{\partial E_1}{\partial\tau} + \frac{W_1}{\lambda} - \\ & - \frac{h}{2\lambda} \left\{ 3 \left(-\frac{\theta_0^{(j+1)}}{2} + \frac{10}{h^2} \theta_2^{(j)} \right) \alpha^- + \frac{5}{h^2} \left(-3\theta_1^{(j+1)} + \frac{28}{h^2} \theta_3^{(j)} \right) \alpha^+ - \alpha_+ t_c^+ + \alpha_- t_c^- \right\} = 0, \\ & \Delta\theta_2^{(j+1)} - \left(k^2 + \frac{60}{h^2} \right) \theta_2^{(j+1)} + 5\theta_0^{(j+1)} - \frac{1}{a} \frac{\partial\theta_2^{(j+1)}}{\partial\tau} - \frac{\gamma_t}{a} \frac{\partial E_2}{\partial\tau} + \frac{W_2}{\lambda} - \\ & - \frac{h^2}{4\lambda} \left\{ 3 \left(-\frac{\theta_0^{(j+1)}}{2} + \frac{10}{h^2} \theta_2^{(j+1)} \right) \alpha^- + \frac{5}{h^2} \left(-3\theta_1^{(j+1)} + \frac{28}{h^2} \theta_3^{(j)} \right) \alpha^+ - \alpha_+ t_c^+ + \alpha_- t_c^- \right\} = 0, \\ & \Delta\theta_3^{(j+1)} - \left(k^2 + \frac{15}{h^2} \right) \theta_3^{(j+1)} + \frac{57}{2} \theta_1^{(j+1)} - \frac{1}{a} \frac{\partial\theta_3^{(j+1)}}{\partial\tau} - \frac{\gamma_t}{a} \frac{\partial E_3}{\partial\tau} + \frac{W_3}{\lambda} - \\ & - \frac{h^3}{8\lambda} \left\{ 3 \left(-\frac{\theta_0^{(j+1)}}{2} + \frac{10}{h^2} \theta_2^{(j+1)} \right) \alpha^- + \frac{5}{h^2} \left(-3\theta_1^{(j+1)} + \frac{28}{h^2} \theta_3^{(j+1)} \right) \alpha^+ - \alpha_+ t_c^+ + \alpha_- t_c^- \right\} = 0, \end{aligned}$$

Таким чином ми отримали початково-крайову задачу для знаходження θ_p , $p = 0, 1, 2, 3$. Для цього потрібно розв'язати отриману систему рівнянь при граничних умовах (10) і початкових умовах (11). Враховуючи (14) граничні умови (10) запишуться так

$$\begin{aligned} \frac{\partial\theta_p^{(j+1)}}{\partial n} &= \frac{-\alpha_3}{\lambda} \left(\theta_p^{(j+1)} - \theta_{3p} \right) + \frac{3}{h} \left(\frac{h}{2} \right)^p \frac{\partial h}{\partial n} \left(-\frac{\theta_0^{(j+1)}}{2} + \frac{10}{h^2} \theta_2^{(j+p/2)} \right), \quad p = 0, 2; \\ \frac{\partial\theta_p^{(j+1)}}{\partial n} &= \frac{-\alpha_3}{\lambda} \left(\theta_p^{(j+1)} - \theta_{3p} \right) + \frac{5}{h^2} \left(\frac{h}{2} \right)^p \frac{\partial h}{\partial n} \left(-3\theta_1^{(j+1)} + \frac{28}{h^2} \theta_3^{(j+(p-1)/2)} \right), \quad p = 1, 3. \end{aligned}$$

Зауважимо, що для розв'язування задачі використовується метод ітерацій. Значення функцій θ_p на нульовій ітерації приймаються рівними нулю.

Перелік посилань

1. Термопружність тонких оболонок / Я.С. Підстригач, Р.М. Швець. – К., «Наукова думка», 1978. – 344 с.
2. Теорія пружно-пластичних оболонок при неізотермічних процесах навантаження / Ю.М. Шевченко, І.В. Прохоренко. – К., «Наукова думка», 1981. – 296 с.

УДК 539.4

Георгій Писаренко¹, д.т.н., проф.; Андрій Майло¹, к.т.н.; Андрій Бялонович¹, к.т.н.; Олександр Войналович², к.т.н., доц.

¹ Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Україна

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІНЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ ПЛАСТИЧНОСТІ ПОВЕРХНІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ ЗА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖУВАННЯ

Анотація. З використанням методу когерентно-оптичного сканування zdeформованої поверхні зразків металоконструкції виявлено закономірності впливу циклічного навантажування на зміну деформаційного рельєфу поверхні, що дозволило запропонувати критерій межі мікропластичності за втоми металів і сплавів.

Ключові слова: циклічне навантажування, деформаційний рельєф, когерентно-оптичне сканування, мікропластичне деформування.

Georgiy Pysarenko, Ph.D., Prof.; AndriyMailo, Ph.D.; AndriyByalonovich, Ph.D.; OleksandrVoinalovych, Ph.D., Assoc. Prof.

STUDY OF THE PROCESSES OF CHANGING THE DEFORMATION RELIEF OF THE PLASTICITY OF THE METAL STRUCTURE SURFACE UNDER CYCLIC LOADING

Abstract. Using the method of coherent-optical scanning of the deformed surface of metal structure samples, regularities of the influence of cyclic loading on the growth of the deformation relief of the plasticity of the surface were revealed, which made it possible to propose a criterion for the microplasticity limit under fatigue of metals and alloys.

Keywords: cyclic loading, deformation relief, coherent optical scanning, microplastic deformation.

Для гетерогенних конструкційних матеріалів втомне пошкодження характеризується спрямованою еволюцією дискретної структури до критичної стадії, що передує зруйнуванню металоконструкції. За циклічного деформування пружно-пластичного матеріалу на поверхні зразків металоконструкції формується деформаційний рельєф(деформаційних дефектів)[1]. Функція розподілу дискретних деформаційних дефектів поверхні характеризується нормальним розподілом внаслідок випадкового характеру процесу локалізації зсувів у смугах ковзання полікристалічної структури матеріалу поверхні циклічно деформованого зразка. Пластичні зсуви полікристалу проявляються у вигляді системи екструзій та інтрузій, які виникають на поверхні за амплітуди циклічних напружень навіть нижче межі витривалості.

Форма амплітуди профілю накопиченого деформаційного рельєфу поверхні в локальних зонах втоми характеризує швидкість формозмінення та порушення суцільності, що можна розглядати як критерій пошкодження [2]. Пластична деформація розвивається в обмеженій кількості мікро об'ємів, кількість яких зростає зі збільшенням циклів навантаження. Стадійність руйнування в багатоцикловому діапазоні аналізують на основі деформаційних ознак пошкоженості поверхні полікристалу.

Для контролю втомних змін деформаційного рельєфуметалоконструкції використовують методи аналізу параметрів дифузного відбиття мікродеформованою поверхнею когерентного світлового випромінювання, тобто методи спекл-кореляції поверхневих деформацій [3, 4].

Метою роботи є дослідження умов накопичення граничного втомного пошкодження у зразках металокопструкцій на основі безконтактного методу оптичного сканування контрольованої зони поверхні.

У даній роботі деформовану поверхню контрольованої зони матеріалу на певних етапах циклічного навантажування сканували когерентним пучком проміння світла з довжиною хвилі, яка співвимірною з масштабом локалізації розсіяного пошкодження (мікропластичних деформацій у вигляді піків та впадин смуг ковзання, створюваних відповідно екструзіями і інтрузіями) поверхні зразка металокопструкції. Внаслідок цього на реєструвальній матриці отримували двовимірне відображення поля спеклів у вигляді контурних топограм, що дозволяє реєструвати відносне змінення площі піків та впадин рельєфу поверхні зразка.

Використовуючи програми цифрового оброблення зображень, визначали топографічні параметри контурних топограм спеклових зображень (співвідношення площі поверхні піків та впадин деформаційного рельєфу зразка – світла зона відповідає зоні піків рельєфу, а темна зона – зоні впадин рельєфу), а далі будували кінетичні залежності топографічних параметрів контурних топограм (зміни площі світлих і темних зон) за відносної довговічності зразків металокопструкції до 100%, та визначали точку перетину між собою побудованих залежностей площі піків і впадин. Ця зона відповідає досягненню межі взаємного збільшення (зменшення) площі зон піків та впадин (екструзій та інтрузій), тобто межі переходу мікропластичного деформування поверхні металокопструкції до стадії виникнення і поширення втомної макротріщини.

На рис. 1 представлено спеклові зображення поверхні зразка за різної кількості циклів навантажування з позначенням ліній контуру рельєфу однакових амплітуд (світла зона відповідає зоні піків рельєфу, а темна зона – зоні впадин рельєфу). Внаслідок тривалості циклічного навантажування від $N = 10^3$ цикл до $N = 10^6$ цикл площа світлої зони S , отримана у відсотках щодо загальної вибірки спеклів, зменшилася від $S = 72,9 \%$ до $S = 39,31 \%$.

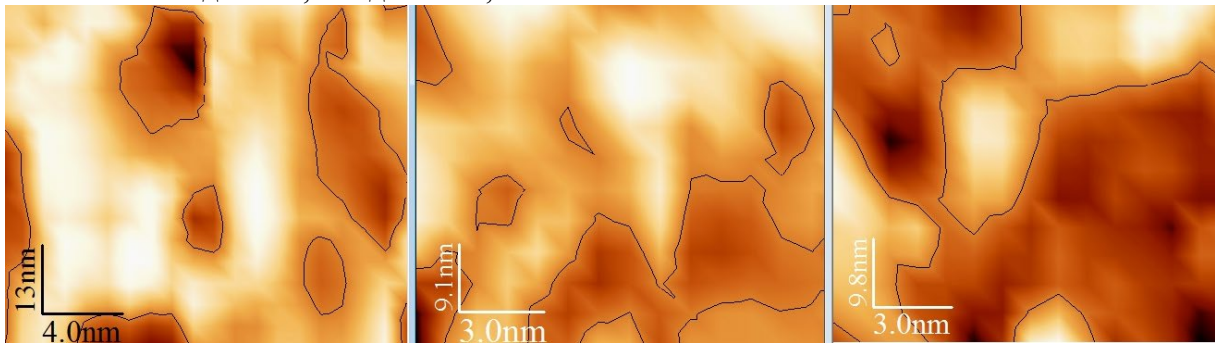


Рис. 1. Спеклові зображення поверхні зразка за різної кількості циклів навантажування

На рис. 2 у координатах: відносна довговічність (у відсотках) до моменту зруйнування зразка металокопструкції (вісь абсцис) та коефіцієнт здеформування поверхні зразка металокопструкції щодо початкового відполірованого стану поверхні представлено графіки, які характеризують змінення площі окреслених на топограмах зон відповідно піків та впадин рельєфу мікропластичного деформування у разі збільшення тривалості циклічного навантажування до виникнення і поширення макротріщини. Точка перетину графіків 1 і 2 (або ліній тренду цих графіків, представлених степеневою та експоненційною формулами з високим ступенем достовірності R^2) відповідає тривалості циклічного навантажування N_{lim} , коли сумарні площі піків і впадин топограм досягають взаємного узгодження, що свідчить про вичерпання пластичності здеформованих елементів поверхні та є межею переходу

мікропластичного деформування поверхні металокопструкції до наступної стадії виникнення і поширення втомної макротріщини.

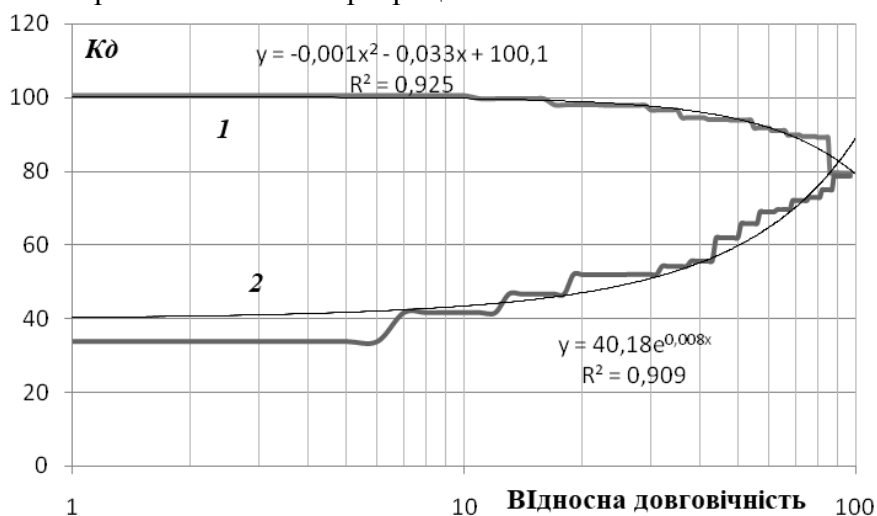


Рис. 2. Кінетичні залежності параметрів деформаційного рельєфу зразків металокопструкції за циклічного навантажування

Висновки

Розроблено експериментально-інформаційну систему аналізу кількісних характеристик розсіяного пошкодження зразків металокопструкції методом когерентно-оптичного сканування деформованої поверхні з високою роздільною здатністю.

Представлені результати дослідження статистичних параметрів деформаційного рельєфу зразків металокопструкції, що дозволяють рекомендувати розроблений метод для визначення межі зміни деформаційного рельєфу пластичності поверхні металокопструкції за циклічного навантажування.

Перелік посилань

1. Georgy Pysarenko, Oleksandr Voynalovych, Andriy Mailo, Stepan Pysarenko. A methodical approach to determining the damage characteristics of cyclically loaded samples of metal structures. *Machinery & Energetics*, 2022. Vol. 13, No. 4. 28-37.

2. Бялонович А.В., Писаренко Г.Г., Писаренко С.Г., Войналович О.В. Аналіз зображень спекл-структур поверхні матеріалу в процесі накопичення пошкоджень за циклічного навантаження із застосуванням нейронних мереж. *Матеріали XXIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та професійна освіта»*, 2023. № XXIII. С. 97-100.

3. G. Pysarenko, O. Voynalovich, A. Maylo, S. Pysarenko. Deformation defects of the structural material as a factor of life aging. *Procedia Structural Integrity. 1st Virtual International Conference «In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction»*. 2022. Vol. 36. 30-35.

4. Писаренко Г.Г., Войналович О.В., Майло А.М., Писаренко С.Г. Метод безконтактного визначення амплітуди деформації накопиченого експлуатаційного пошкодження металокопструкції. *Machinery & Energetics. Journal of Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. 12(3). 25-32.

УДК 621.791.052:539.4

Віталій Книш, д.т.н., проф.; Сергій Соловей, к.т.н., с.н.с.; Михайло Мальгін, к.т.н.; Володимир Мірянін, Андрій Кадишев

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Україна

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА КОРОЗІЙНУ ВТОМУ ЗМІЦНЕНИХ ВИСОКОЧАСТОТНОЮ МЕХАНІЧНОЮ ПРОКОВКОЮ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 09Г2С

Анотація. Досліджена ефективність застосування технології високочастотної механічної проковки (ВМП) для підвищення циклічної довговічності стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С у вихідному стані після виготовлення та з накопиченими втомними пошкодженнями, які зазнають впливу корозійного середовища. Показано, що за впливу корозійного середовища технологіє ВМП дозволяє збільшити залишкову довговічність зварних з'єднань з 10...50% накопиченими втомними пошкодженнями у 8...15 разів при незмінному рівні прикладених максимальних навантажень до та після зміцнення. Встановлено, що після зміцнення стикових зварних з'єднань з 10%, 30% та 50% рівнем накопичених втомних пошкоджень та подальшого підвищення на 27% рівнів прикладених максимальних напружень циклу їх залишкова довговічність збільшується відповідно, в 12 разів, 10 разів та 8 разів у порівнянні з довговічністю зварних з'єднань у вихідному (незміцненому стані).

Ключові слова: зварне з'єднання, високочастотна механічна проковка, втома, корозія

Vitalii Knysh, Ph.D., Prof.; Sergii Solovei, Ph.D.; Mykhailo Malhin, Ph.D.; Volodimir Miryanin, Andrii Kadyshev

INFLUENCE OF PRELOAD ON THE FATIGUE CORROSION OF TREATED BY HIGH FREQUENCY MECHANICAL PEENING BUTT-WELDED JOINTS OF LOW-ALLOY STEEL 09G2S

Abstract. The combined effects of treatment by high-frequency mechanical peening (HFMP) and corrosion environment on the corrosion fatigue life of low-alloy 09G2S steel butt-welded joints with accumulated fatigue damages are studied in this paper.

Keywords: welded joints, high-frequency mechanical peening, fatigue, corrosion

Значна частина зварних металевих конструкцій та споруд на території України, які працюють в умовах змінного навантаження (мости, шляхопроводи, крани, антенощоголові споруди, силові конструкції рухомого складу залізничного транспорту та інші), була введена в експлуатацію в 60...80-х роках минулого століття. Під час тривалої експлуатації такі конструкції, як правило, зазнають одночасного впливу змінного навантаження та кліматичних чинників зовнішнього середовища (температура, вологість, опади тощо). Від кліматичних чинників зовнішнього середовища на стадіях виготовлення та монтажу зварні металоконструкції захищаються лакофарбовими покриттями, що передбачає відсутність прямого контакту металу з корозійним середовищем. Несвоєчасне виявлення порушення цілісності захисних лакофарбових покриттів призводить до того, що в місцях скупчення вологості незахищені поверхні елементів зварних конструкцій починають піддаватися одночасному впливу змінного навантаження та корозійного середовища. Для підвищення опору втомі зварних конструкцій на стадії виготовлення або при ремонтно-відновлювальних роботах широко застосовуються методи поверхневого пластичного деформування (ППД) металу. Одним з методів ППД, який рекомендовано Міжнародним інститутом зварювання для підвищення характеристик опору втомі зварних з'єднань алюмінієвих

та сталевих конструкцій, є обробка високочастотним механічним проковуванням (ВМП) з використанням енергії ультразвуку. Дана обробка дозволяє підвищити і опір втомі зварних з'єднань які зазнають вплив корозійного середовища.

Метою даної роботи було оцінити ефективність застосування технології ВМП для підвищення опору втомі зварних з'єднань металоконструкцій з накопиченими втомними пошкодженнями, які зазнають впливу корозійного середовища.

Дослідження проводили на зразках стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С товщиною 10 мм, яка широко використовуються для виготовлення зварних металоконструкцій тривалої експлуатації. Зразки отримували двостороннім автоматичним зварюванням під флюсом. Форма та геометричні розміри зразків наведено на рис.1, а.

Випробування на втомі зразків стикових з'єднань проводили на електрогідравлічній машині УРС-20 при в змінному розтягуванні з частотою 5 Гц та асиметрією циклу навантаження 0,01 до повного їх руйнування або досягнення бази випробувань 2 млн. циклів. Досліджували п'ять серій зразків:

- у вихідному стані після зварювання, на повітрі (перша серія);
- зміцнені технологією ВМП, на повітрі (друга серія);
- зміцнені технологією ВМП, у корозійному середовищі (третья серія);
- з 10...50% накопиченими втомними пошкодженнями, у корозійному середовищі (четверта серія);
- зміцнені технологією ВМП після накопичення 10...50% втомних пошкоджень, у корозійному середовищі (п'ята серія).

Обробку зварних з'єднань другої, третьої та п'ятої серій за технологією ВМП проводили комплексом USTREAT-4.0. Зміцненню піддавали вузьку зону переходу металу шва на основний метал. Швидкість виконання ВМП однорядною чотирьохбойковою насадкою з діаметром бойків 3 мм складала 1 мм/с.

В якості корозійного середовища для зразків третьої, четвертої та п'ятої серій застосовували 3% розчин NaCl. Для випробувань зварних з'єднань на корозійну втому при одновісному розтягу було сконструйовано спеціальне оснащення (рис. 1, б).

Враховуючи, що на ранніх стадіях експлуатації зварних металоконструкцій заводське лакофарбове покриття виконує свою захисну функцію, накопичення втомних пошкоджень в зразках четвертої та п'ятої серій виконували на повітрі, а подальші корозійні випробування – у 3% розчині NaCl (імітували пошкодження захисного лакофарбового покриття). Розрахунок кількості циклів, необхідної для отримання в зразках 10...50% втомних пошкоджень, проводили за лінійною гіпотезою накопичення втомних пошкоджень на основі кривої втоми, побудованої за отриманими експериментальними даними зварних з'єднань у вихідному стані.

За результатами випробувань зразків першої, другої та третьої серій побудовані відповідні криві втоми стикових зварних з'єднань (рис. 2).

Встановлено, що обмежена границя витривалості на базі 2 млн циклів стикових зварних з'єднань на повітрі - 145 МПа. Зміцнення технологією ВМП призводить до підвищення на 70% (з 145 МПа до 247 МПа) обмеженої границі витривалості на базі 2 млн циклів зварних з'єднань на повітрі, а циклічна довговічність збільшується більш ніж у 10 разів. Корозійне середовище (3 % розчин NaCl) знижує ефективність застосування ВМП: обмежена границя витривалості знижується на 6% (з 247 МПа до 232 МПа), циклічна довговічність зменшується в 1,1...1,9 разів в залежності від рівнів прикладених максимальних напружень циклу.

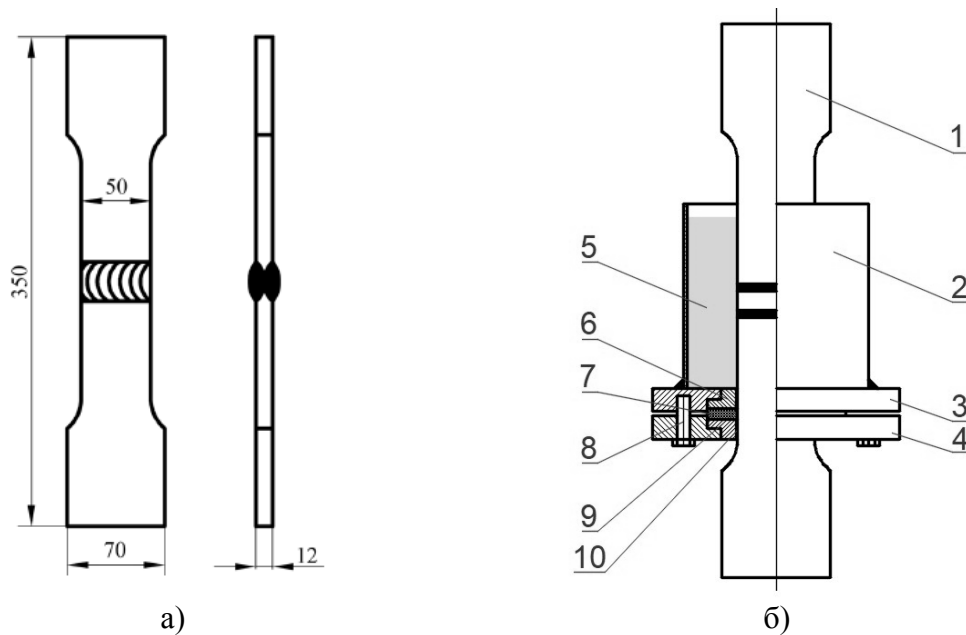


Рис. 1. Форма і геометричні розміри зразків (а) та схематичне зображення оснащення для випробувань зварних з'єднань на корозійну втому при одновісному розтягу (б): 1 – зразок; 2 – камера; 3 – основа корпусу камери; 4 – плита; 5 - робочий розчин; 6- вставка (сухарик) в корпус камери; 7 – гумова прокладка; 8 – болт; 9 - вставка (сухарик) в плиту; 10 – силікон.

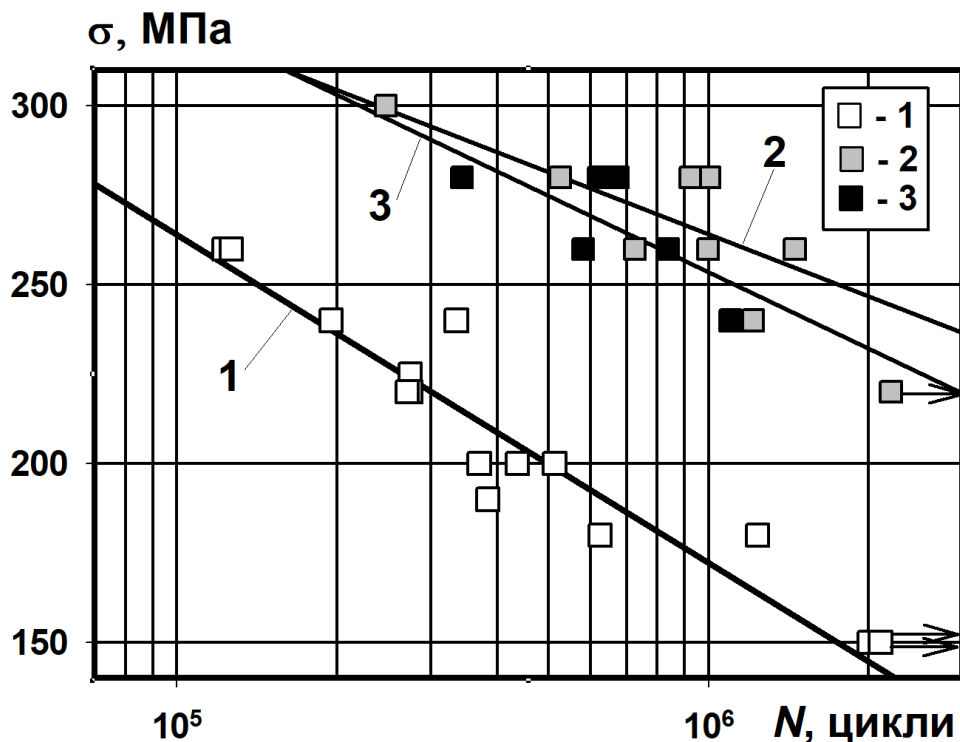


Рис.2 Криві втоми стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С: 1 – у вихідному стані після зварювання на повітрі; 2 – після зміцнення ВМП на повітрі; 3 – після зміцнення ВМП в 3% розчині NaCl.

Накопичення 10%, 30% та 50% втомних пошкоджень в зварних з'єднаннях у вихідному стані на повітрі для зразків четвертої та п'ятої серій проводили при рівнях максимальних напружень циклу 220 МПа, напрацюванням 27 тис. циклів, 81 тис.

циклів та 135 тис. циклів змін напружень, відповідно. Подальші випробування проводили у корозійному середовищі також при рівнях максимальних напружень циклу 220 МПа. Встановлено, що середня залишкова довговічність зразків четвертої серії з 10%, 30 та 50% рівнем накопичених втомних пошкоджень при випробуваннях у 3% розчині NaCl становить відповідно, 246,9 тис. циклів, 170,7 тис. циклів та 129,1 тис. циклів. Після зміцнення технологією ВМП зразків п'ятої серії та подальших випробуваннях у корозійному середовищі при рівнях максимальних напружень циклу 220 МПа руйнування зварних з'єднань у 3% розчині NaCl не відбувалося до досягнення бази випробувань 2 млн. циклів змін напружень. Візуальним оглядом зразків тріщин втоми не виявлено. Таким чином, зміцнення технологією ВМП збільшило залишкову довговічність зварних з'єднань у корозійному середовищі у 8...15 разів при незмінному рівні прикладених максимальних навантажень 220 МПа до та після зміцнення. Додатково після зміцнення ВМП проводили випробування зразків п'ятої серії при підвищених на 27% (до 280 МПа) рівнях максимальних напружень циклу. Встановлено, що середня залишкова довговічність зразків п'ятої серії з 10%, 30% та 50% рівнем накопичених втомних пошкоджень при випробуваннях у 3% розчині NaCl при підвищених до 280 МПа рівнях напружень становить відповідно, 832,2 тис. циклів, 702,4 тис. циклів та 550,6 тис. циклів. Враховуючи, що циклічна довговічність стикових зварних з'єднань у вихідному (незміцненому) стані при рівнях максимальних напружень циклу 280 МПа складає 67,2 тис. циклів, то залишкова довговічність зварних з'єднань з 10%, 30% та 50% рівнем накопичених втомних пошкоджень після зміцнення ВМП збільшується, відповідно, в 12 разів, 10 разів та 8 разів.

Висновки:

1. Експериментально встановлені криві втоми стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С у вихідному стані і зміцненому технологією ВМП станах на повітрі та в зміцненому ВМП стані в корозійному середовищі (3% розчині NaCl). Показано, що зміцнення технологією ВМП призводить до підвищення на 70% (з 145 МПа до 247 МПа) обмеженої границі витривалості на базі 2 млн циклів зварних з'єднань на повітрі, а циклічної довговічності - більш ніж у 10 разів. 3 % розчин NaCl знижує обмежену границю витривалості зміцнених ВМП зварних з'єднань на 6% (з 247 МПа до 232 МПа), а циклічну довговічність – в 1,1...1,9 разів в залежності від рівнів прикладених максимальних напружень циклу.

2. Встановлено, що зміцнення технологією ВМП стикових зварних з'єднань з 10...50% рівнем накопичених втомних пошкоджень призводить до збільшення їх залишкової довговічності у корозійному середовищі в 8...15 разів при незмінному рівні прикладених максимальних навантажень до та після зміцнення.

3. Показано, що середня залишкова довговічність стикових зварних з'єднань з 10%, 30 та 50% рівнем накопичених втомних пошкоджень при випробуваннях у 3% розчині NaCl при підвищених на 27% (до 280 МПа) рівнях максимальних напружень циклу становить, відповідно, 832,2 тис. циклів, 702,4 тис. циклів та 550,6 тис. циклів, тобто збільшується відповідно в 12 разів, 10 разів та 8 разів у порівнянні з довговічністю зварних з'єднань у вихідному (незміцненому стані), випробуваних на повітрі.

УДК 621.833

Павло Ткач, к.т.н., доц.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Україна

СИНУСОЇДАЛЬНЕ ЗАЧЕПЛЕННЯ З ПІДВИЩЕНОЮ ЗНОСОСТІЙКІСТЮ ЗУБЦІВ

Анотація. Запропоновано спосіб удосконалювання важконавантажених синусоїдальних зубчастих передач вибором раціональних параметрів на стадії проектування. Параметри вибираються з умови рівності максимальних питомих ковзань на зубцях шестерні і колеса.

Ключові слова: циліндричні прямозубі передачі, синусоїдальне зачеплення, важконавантажені передачі, зношування зубців

Pavlo Tkach, Ph.D., Assoc. Prof.

SINUSOIDAL GEARING WITH INCREASED TEETH WEAR RESISTANCE

Abstract. The way of improvement of heavy duty sinusoidal gears in terms of wear resistance using the selection of rational parameters on the design stage is proposed. The parameters are selected based on the condition of equal maximum values of specific sliding on the pinion and gear.

Keywords: spur gears, sinusoidal gearing, heavy duty gears, tooth wear

Gear teeth wear is notably influenced by the magnitude of specific sliding. Enhancing this meshing characteristic is often achieved through addendum modification of involute teeth. To minimize wear the values of profile shift coefficients can be selected based on the condition of equality of the maximum values of specific sliding on the pinion η_1 and gear η_2 . The condition can be presented as follows [1]:

$$|\eta_{1\max}| = |\eta_{2\max}|. \quad (1)$$

According to [1], a way of determination of the profile shift coefficients of the pinion x_1 and gear x_2 is the selection of their values from the tables developed based on the Eq. (1) by Central Design Bureau of Gearbox. The feature of such selection is the condition $x_2 = -x_1$, that is not optimal. The authors of [1] proposed the method for optimal design of gears based on the condition $|\eta_{1\max}| - |\eta_{2\max}| \rightarrow \min$. It was presented in [2] that solution of the equation allow to define the optimal values of the coefficients x_1 and x_2 that provide 18% longer service life of the pinion and 20% longer service life of the gear.

An alternative approach is the selection of non-involute gear tooth shape. An example of such approach is the shape proposed in the US Patent [3]. The author proposed the shape that allows to improve operation noise. According to [3], the shape can be generated by a rack-type tool with sine-curve basic profile.

The further research [4] was related to the gears with teeth shape defined by [3]. These gears were named by the author of [4] "sinusoidal". The research [4] was focused on calculation of their geometrical parameters and meshing characteristics using graphical-analytical method. The author of [4] validated the main object of the invention [3] that sinusoidal gearing can provide lower noise in operation.

The latest studies [5,6] demonstrate that the gearing can also provide a larger loading capacity and higher operating indicators, in particular better wear resistance. All the advantages are due to the convex-concave contact of the active surfaces.

The mathematical model allowable for determination of meshing characteristics of sinusoidal gears is presented in [7]. The reference profile related to module $m = 1$ mm (Fig.) can be given in parametric form by the equation [4,7]:

$$x_p = a \sin \lambda; y_p = \lambda / 2, \quad (2)$$

where a is the radius of sine generating circle (amplitude) that equals h , which is a half of full depth H , and λ is the parameter (Fig.). The positive values of λ correspond to the generation process of the pinion addendum and gear dedendum whereas negative values of λ correspond to the generation process of the gear addendum and pinion dedendum.

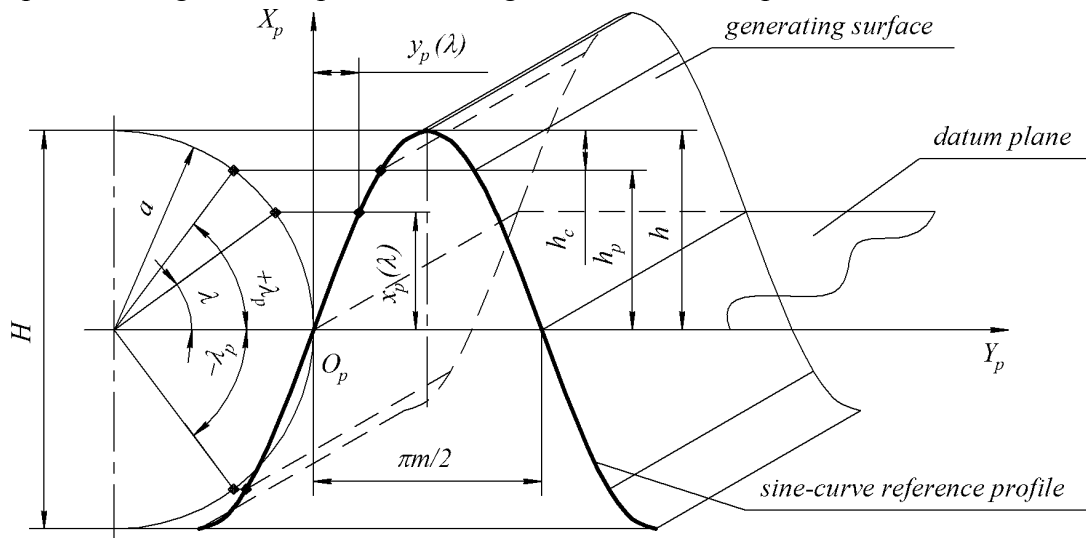


Fig. Generating surface for the teeth of sinusoidal gears

The teeth of the gears are generated by sinusoidal basic rack which has different signs of curvature on the addendum and dedendum segments. The fillet segment (height of h_c) of the basic rack and its flanks (height of h_p) are outlined by the same curve. The values $\lambda_p = \pm \arcsin h_p / h$ define the points between the flank and fillet of the tooth. The most common case is: $h_p = 1$ and $h = 1.25$, i.e. $h_p / h = 0.8$, and $\lambda_p = \pm 53.13^\circ$.

In order to evaluate specific sliding of the teeth generated by the profile of Eq. (2) the formulas from [7] can be used in the form as follows:

$$\eta_1 = \frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{\Omega(\lambda)}{r_1 + \Omega(\lambda)}; \eta_2 = -\frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{\Omega(\lambda)}{r_2 - \Omega(\lambda)}, \quad (3)$$

where $\Omega(\lambda) = h \sin \lambda (4h^2 \cos 2\lambda + 1)$; r_1 and r_2 are the radii of reference circles of the pinion and gear respectively; u is gear ratio.

The condition of equality of the maximum values of specific sliding on the pinion η_1 and gear η_2 in the case of sinusoidal gearing can be obtained using Eq. (3). The characteristics η_1 and η_2 take their maximum at the values $\tilde{\lambda}$ of the parameter λ , that fulfill the conditions $d\eta_1/d\lambda = 0$ and $d\eta_2/d\lambda = 0$, i.e. $\eta_{1\max} = \eta_1(\tilde{\lambda})$ and $\eta_{2\max} = \eta_2(\tilde{\lambda})$.

Let us differentiate the functions $\eta_1(\lambda)$ and $\eta_2(\lambda)$:

$$\frac{d\eta_1}{d\lambda} = \frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{\Omega'(\lambda) \cdot r_1}{[r_1 + \Omega(\lambda)]^2}; \frac{d\eta_2}{d\lambda} = -\frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{\Omega'(\lambda) \cdot r_2}{[r_2 - \Omega(\lambda)]^2}, \quad (4)$$

Analysis of Eqs. (4) reveals that denominator equals infinity only at $r_2 = \infty$, i.e. for rack and pinion gearing. The function $\Omega(\lambda)$ at $\lambda = +\lambda_p \dots - \lambda_p$ does not take infinite values. The values of $u+1$, r_1 or r_2 in the numerator may not be equal zero. Thus, the only case when $d\eta_1/d\lambda = 0$ and $d\eta_2/d\lambda = 0$ is $\Omega'(\lambda) = 0$. Let us define this derivative:

$$\Omega'(\lambda) = h \cos \lambda (4h^2 \cos 2\lambda - 16h^2 \sin 2\lambda + 1). \quad (5)$$

Obviously, the right part of Eq. (5) equals zero at $\lambda = \pm 0.5\pi$ but this is not the case, because these points are out of tooth flank. The only equation

$$4h^2 \cos 2\lambda - 16h^2 \sin 2\lambda + 1 = 0 \quad (6)$$

fulfill the condition $\Omega'(\lambda) = 0$. The solution of Eq. (6) is the required parameter $\tilde{\lambda}$:

$$\tilde{\lambda} = \pm \arcsin \left[\frac{(4h^2 + 1)}{24h^2} \right]^{0.5}. \quad (7)$$

It can be inferred from the Eq. (7) that location of the point on tooth profile that corresponds to the maximum value of specific sliding does not depend on numbers of teeth, but depends only on tooth height coefficient.

Let us define the value of function $\tilde{\Omega} = \Omega(\tilde{\lambda})$ that correspond to $\eta_{1\max} = \eta_1(\tilde{\lambda})$ and $\eta_{2\max} = \eta_2(\tilde{\lambda})$ at $\tilde{\lambda}$ defined by Eq. (7):

$$\tilde{\Omega} = \pm 2 \left[\frac{(4h^2 + 1)}{6} \right]^{1.5}, \quad (8)$$

where the upper sign corresponds to “+” sign in Eq. (7), and the down sign corresponds to “-” sign in Eq. (7).

As it was shown in [5], the nature of η_1 and η_2 curves of sinusoidal gears differs fundamentally from the ones of involute gearings. They have two extremums (on addendum and dedendum) and one point of inflexion. Taking into account this fact, the condition (1) can be presented for four cases of the equality of specific sliding values as follows:

Case #1. On the dedendum of pinion tooth and the dedendum of gear tooth (the case corresponds to specific sliding fit in involute gearing):

$$|\eta_{1\max}|_{\lambda < 0} = |\eta_{2\max}|_{\lambda > 0}. \quad (9)$$

Case #2. On the addendum of pinion tooth and the addendum of gear tooth:

$$|\eta_{1\max}|_{\lambda > 0} = |\eta_{2\max}|_{\lambda < 0}. \quad (10)$$

Case #3. On the addendum of pinion tooth and the dedendum of gear tooth:

$$|\eta_{1\max}|_{\lambda > 0} = |\eta_{2\max}|_{\lambda > 0}. \quad (11)$$

Case #4. On the dedendum of pinion tooth and the addendum of gear tooth:

$$|\eta_{1\max}|_{\lambda < 0} = |\eta_{2\max}|_{\lambda < 0}. \quad (12)$$

As the signs of η_1 and η_2 are known from [5], the conditions (9) and (10) can be transformed at the appropriate values of λ to the form $\eta_{1\max} = \eta_{2\max}$. For the same reason the conditions (11) and (12) can be also presented at the appropriate values of λ without the absolute magnitude as follows: $\eta_{1\max} = -\eta_{2\max}$.

Thus, conditions (9) and (10) at $\tilde{\Omega}$ from Eq. (8) can be related to the equation:

$$\frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{\mp 2 \left[\frac{(4h^2 + 1)}{6} \right]^{1.5}}{r_1 \mp 2 \left[\frac{(4h^2 + 1)}{6} \right]^{1.5}} = - \frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{\pm 2 \left[\frac{(4h^2 + 1)}{6} \right]^{1.5}}{r_2 \mp 2 \left[\frac{(4h^2 + 1)}{6} \right]^{1.5}}, \quad (13)$$

where upper and down signs correspond to Case #1 and Case #2 respectively.

Conditions (9) and (10) at $\tilde{\Omega}$ from Eq. (8) can be related to the equation:

$$\frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{\pm 2[(4h^2+1)/6]^{1.5}}{r_1 \pm 2[(4h^2+1)/6]^{1.5}} = \frac{(u+1)}{u} \cdot \frac{\pm 2[(4h^2+1)/6]^{1.5}}{r_2 \mp 2[(4h^2+1)/6]^{1.5}}, \quad (14)$$

where upper and down signs correspond to Case #3 and Case #4 respectively.

The condition (13) can be fulfilled at $r_1 = r_2$, and the condition (14) can be fulfilled at

$$r_2 - r_1 = \pm 4[(4h^2+1)/6]^{1.5}, \quad (15)$$

where the upper and down signs correspond to Case #3 and Case #4 respectively. Obviously, that the upper sign corresponds to the reduction gearing, while the down sign corresponds to the multiplication gearing. The radii in Eq. (15) are defined by the known formulas: $r_1 = 0.5mz_1$; $r_2 = 0.5mz_2$. As the geometry of generating surface is related to module $m = 1$ mm, the followed ratios can be used: $r_1 = 0.5z_1$; $r_2 = 0.5z_2$. Thus, we obtain

$$z_2 = z_1 \pm 8[(4h^2+1)/6]^{1.5}, \quad (16)$$

where the upper and down signs correspond the reduction and multiplication gearings respectively.

The sinusoidal gear pair with numbers of teeth and teeth depth, that are close to fulfilling the condition (16), will have the equal values of the pinion and gear specific sliding. For the most common case of $h = 1.25$, the rational numbers of teeth from the condition (16) are $z_2 \approx z_1 \pm 11$. This requires as few pinion teeth in number as possible in order to provide gear ratio much more than $u = 1$. This is why the minimal number of teeth of sinusoidal gearing is to be defined in further research from the condition of undercutting prevention.

References

1. V.I. Moroz, O.V. Bratchenko, S.V. Bobritsky, V.I. Gromov. Improvement of the technology of design of traction gear drives of motor rolling stock. Collection of scientific works of the Ukrainian state university of railway transport, 2013, Issue 136. pp. 44-49. [In Ukrainian]
2. Volodymyr Moroz, Volodymyr Hromov, Oleksandr Lohvinenko. Special features of optimization design and evaluation of technical resource for traction gear transmissions of railway rolling stock. Collection of scientific works of the Ukrainian state university of railway transport, 2023, No. 205 pp. 86-97. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288831> [In Ukrainian]
3. E. Wildhaber. Gear Tooth Shape. US 3,251,236, Filed February 17, 1964, Patented May 17, 1966.
4. Anikin, Yu.V. Sinusoidal Gearing. The Fundamentals of Geometry and Kinematics. 1975, 64 p. [In Russian]
5. Tkach P.M., Nosko P.L., Bashta O.V., Tsybrii Yu.O., Revyakina O.O., Boyko G.O. Comparison of sinusoidal and involute spur gears by meshing characteristics. Proceedings of Odessa Polytechnic University. Odesa, 2019. Issue 1(57). pp. 41-51. <https://doi.org/10.15276/opu.1.57.2019.06>
6. Hrytsay, I.E. Sinusoidal Gears and Alternative Method of Tooth Generation. In: Radzevich, S.P., Storchak, M. (eds) Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design. Springer, Cham. 2022 doi.org/10.1007/978-3-030-92262-7_8
7. Tkach P.M., Nosko P.L., Fil P.V., Revyakina O.O. Meshing Characteristics of Sinusoidal Spur Gears. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of Scientific Works. Series: Problems of Mechanical Drive. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. No. 25 (1247). pp. 135-139. [In Ukrainian]

УДК 621.84

Дмитро Часов, к.т.н., доц.; Всеволод Бейгул, к.т.н., доц.; Сергій Вашенко; Віктор Давидюк

Дніпровський державний технічний університет, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГВИНТОВОГО КОНВЕЄРА-ЕКСТРУДЕРА

Анотація. Проведено компоновання шнекових транспортерів з урахуванням підвищеної довговічності за рахунок додаткової шорсткості ринви в місцях зміни поперечного перетину в умовах економії матеріалів конструкції. Запропоновано варіанти поперечних перетинів жолоба (закритий та відкритий). Отримано навантаження у вертикальній площині (розрахункове) при контакті шнеку із частинкою вантажу під гострим кутом. Отримано математичні формули для визначення товщини стінки жолоба (відкритого та закритого).

Ключові слова: гвинтовий конвеєр, екструзія, жолоб, коефіцієнт жорсткості.

Dmytro Chasov, Ph.D., Assoc. Prof.; Vsevolod Beyhul, Ph.D., Assoc. Prof.; Sergiy Vaschenko; Viktor Davydiuk

JUSTIFICATION OF SCREW CONVEYOR-EXTRUDER PARAMETERS

Abstract. The layout of the screw conveyors was carried out taking into account the increased durability due to the additional roughness of the gutter in the places where the cross-section changes, in terms of saving construction materials. Variants of cross-sections of the chute (closed and open) are offered. The load in the vertical plane (calculated) was obtained when the auger came into contact with a particle of cargo at an acute angle. Mathematical formulas for determining the thickness of the chute wall (open and closed) have been obtained.

Keywords: screw conveyor, extrusion, chute, stiffness coefficient.

Розвиток у промисловості тісно пов'язаний з відкриттям нових технологічних ліній, для яких необхідні транспортні операції. В обмежених умовах виробничих площ, що підлягають реконструкції, та нових технологічних приміщень, що будуються, необхідні компактні транспортери, які не займають корисну площу та здатні працювати з гарантованим великим циклом безвідмовності та мають змінний поперечний перетин, що забезпечує екструзію. Компоновка шнекових транспортерів з урахуванням підвищеної довговічності за рахунок додаткової шорсткості ринви в місцях зміни поперечного перетину в умовах економії матеріалів конструкції, яка не шкодить технологічним та конструкційним параметрам, є досить нетрадиційна, досвіду проектування таких машин небагато, зарубіжні аналоги економічно ємні, тому дослідження, що мають на меті обґрунтування параметрів несучих систем ринви гвинтових конвеєрів у технологічних лініях виробництва та транспортуванні відходів різних типів виробництв, є актуальними.

Для наукового обґрунтування підходу до проектування шнекових транспортуючих систем з екструзією виявлено їх місце у компонованому ряді інших технологічних машин аналогічного призначення, проведений огляд конструкції жолобів та безпосередньо шнеків, методів проектування гвинтових несучих систем, досліджень у напрямку конструктивного удосконалення технологічних машин для агротехнічного та механічного виробництв.

Основні розрахункові навантаження на несучу систему шнекового транспортера формуються в процесі руху вантажу в поздовжній вертикальній площині.

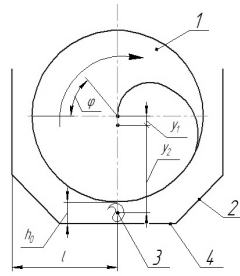


Рисунок 1 – Розрахункова схема гвинтового конвеєра-екструдера
1 – шнек; 2 – жолоб (ринва); 3 – вантаж (елемент вантажу); 4 – ущільнена нижня ділянка жолоба (ринви).

Навантаження у вертикальній площині (розрахункове) може бути отриманим за умови $2L/l_0 = 1, 2, 3, \dots$, і тоді маємо

$$P_p = \frac{m_r g}{4} \left\{ 1 + \frac{16C_s m_r \Omega^2 h_0}{m_r g [m_r m_k (\Omega^2) / C_k - (m_r + m_k) \Omega^2 + 4C_s]} \right\}, \quad (1)$$

де P_p – навантаження у вертикальній площині (розрахункове), Н;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

Ω – кругова частота кінематичних коливань, 1/с.

При контакті шнеку із частинкою вантажу під гострим кутом виникають бокові реакції, які досягають сили тертя із жолобом і розглядаються як фактичні (розрахункові),

$$P_z = \frac{1}{4} m g f, \quad (2)$$

де P_z – розрахункова бокова сила, Н;

m – маса завантаженого конвеєра-екструдера, кг;

f – коефіцієнт тертя вантажу із жолобом.

Приймається, що згинаючий момент реалізується поздовжніми зусиллями у днищі жолобі, поперечна сила – дотичними зусиллями у бічній стінці ринви (рис. 2). Тоді у першому наближенні:

$$\sigma_1 = \frac{-[\sigma]bh + \sqrt{([\sigma]bh)^2 + 4[\sigma]bM_u}}{2[\sigma]b}, \quad (3)$$

де σ_1 – товщина днища жолоба в першому наближенні, м;

$[\sigma]$ – допустиме напруження при вигині, Па;

b – ширина жолоба, м;

h – висота стінки жолоба, м;

M_u – розрахунковий згинаючий момент, Н·м.

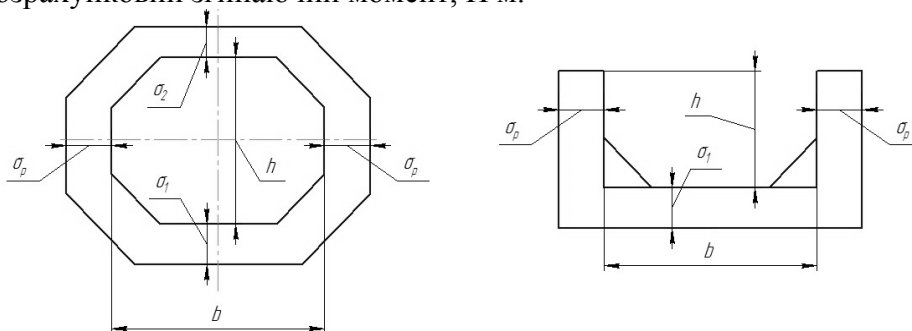


Рисунок 2 – Варіанти поперечних перетинів жолоба (закритий та відкритий)

Профіль першого наближення забезпечує жорсткість конструкції та має значну металомісткість, тому товщину днища жолоба зменшуємо до $0,9 \delta_{n1}$, а відтак товщина стінки жолоба для відкритого та закритого варіантів становить

$$\sigma_p = \frac{6M_u(h + 2 \cdot 0,9\sigma_1) - 8[\sigma]b(0,9\sigma_1)^3 - 12[\sigma]bh(0,9\sigma_1)^2 - 6[\sigma]bh^2 \cdot 0,9\sigma_1}{[\sigma]h^3}, \quad (4)$$

а товщина кришки для закритого типу становить –

$$\sigma_2 = \frac{6M_u(h + 2 \cdot 0,9\sigma_1) - 8[\sigma]b(0,9\sigma_1)^3 - 12[\sigma]bh(0,9\sigma_1)^2 - 6[\sigma]bh^2 \cdot 0,9\sigma_1}{2[\sigma]h^3}, \quad (5)$$

Визначивши параметри поздовжніх силових елементів з'ясована статична невизначимість жолоба гвинтового конвеєра на рівні відношення основних геометричних характеристик поперечних перетинів:

$$\frac{J_{kl}}{J_{xn}} = \left\{ - \left[4M_p LE(h + 2\sigma_p) - 8[\sigma]L_2 GJ_{kl} \right] + \sqrt{\left[4M_p LE(h + 2\sigma_p) - 8[\sigma]L_2 GJ_{kl} \right]^2 + 64M_p L_2 G(h + 2\sigma_p)[\sigma]LEJ_{kl}} \right\} / \left[4M_p L_2 G(h + 2\sigma_p) \right], \quad (6)$$

де J_{kl} – приведений полярний момент інерції днища, m^4 ;

J_{xn} – момент інерції стінки, m^4 ;

E – модуль пружності першого роду, Па;

G – модуль пружності другого роду, Па;

L_2 – половина довжини поперечини ринви, м.

Після введення позначення k отримуємо товщину днища ринви за умови конструктивної складової b та σ_p

$$\sigma_1 = \frac{12}{h^3} \left\{ \frac{J_{kl}}{k} - 2 \left[\frac{b\sigma_p^3}{12} + b\sigma_p \left(\frac{h + \sigma_p}{2} \right)^2 \right] \right\}, \quad (7)$$

де k – відношення геометричних характеристик поперечних перетинів.

Отримано розв'язок актуальної наукової задачі обґрунтування параметрів жолоба гвинтового конвеєра, яке забезпечує ефективну та достатню місткість металоконструкцій.

Перелік посилань

1. D. Chasov (2016). Determining the equation of surface of additional blade of a screw conveyor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (Engineering technological systems). – 5/1 (83). – 2016. – p. 4 – 9.

2. D. Chasov, L. Sorokina, S. Havrylin (2017) Aspects of distance learning for engineering sciences. Effective Development of Teachers' Skills in the Area of ICT and E-learning / Katowice - Cieszyn 2017. – p. 319 – 331.

3. O. Beihul, D. Grischenko, V. Beihul, D. Chasov, A. Lepetova, B. Kolyada (2020) Devising a procedure for calculating the designed strength of a kingpin-type load-carrying system for an articulated tractor container carrier. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (Engineering technological systems). – 5/7 (107). – 2020. – p.22 – 29.

УДК 620.178.15/179.119

Павло Булах, к.т.н.; Олександр Масло, к.т.н.; Володимир Швець, к.т.н.; Віктор Ламашевський, к.т.н.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ РОЗСІЯНИХ ПОШКОДЖЕНЬ В ТОНКОСТІННОМУ ЦИЛІНДРІ В УМОВАХ ДВОВІСНОГО ЦИКЛІЧНОГО РОЗТЯГУ

Анотація. В доповіді приведено результати експериментальних досліджень кінетики накопичення пошкоджень у різних зонах розвитку деформації. Методом ЛМ-твердості оцінювали однорідність металу тонкостінних циліндричних зразків із сталі 10ГН2МФА. Аналіз отриманих даних показав, що в металі зразка спостерігається яскраво виражена закономірність значного збільшення неоднорідності матеріалу при наближенні до зони руйнування.

Ключові слова: пошкоджуваність, циклічне навантаження, гомогенність, твердість, метод ЛМ-твердості.

Pavlo Bulakh, Ph.D.; Oleksandr Maslo, Ph.D.; Volodymyr Shvets, Ph.D.; Victor Lamashevsky, Ph.D.

ASSESSMENT OF DISTRIBUTED DAMAGE IN A THIN-WALLED CYLINDER UNDER BIAXIAL CYCLIC TENSILE CONDITIONS

Abstract. The report presents the results of experimental studies on the kinetics of damage accumulation in different zones of deformation development. The metal homogeneity of thin-walled cylindrical samples made of 10HN2MFA steel was assessed using the LM-hardness method. The data analysis revealed a significant increase in material heterogeneity near the fracture zone in the sample metal.

Keywords: damageability, cyclic loading, homogeneity, hardness, LM-hardness method.

Дослідження основних видів та методів неруйнівної оцінки поточного стану матеріалу дозволяють стверджувати, що одним з перспективних напрямків щодо оцінки стану структури конструкційних матеріалів є використання параметрів пошкоджуваності, що ґрунтуються на статистичній оцінці деякої вибірки значень характеристик механічних властивостей матеріалу. Одним з таких параметрів є гомогенність (однорідність) структури матеріалу, визначення якої покладено в основу методу ЛМ-твердості [1-2]. В якості параметра розсіювання виявилось зручним використовувати коефіцієнт гомогенності матеріалу m у розподілі Вейбулла, який визначається за формулою Гумбеля:

$$m = 0,4343 \times d(n) \times \left[\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де величину $d(n)$ визначають в залежності від кількості n вимірювань, H_i - значення твердості за i -м вимірюванням, $\overline{\lg H}$ - середнє значення логарифма твердості за результатами n вимірювань.

Метод поєднує такі очевидні переваги методів статичної та динамічної твердості, як зручність і простота приладового забезпечення, з достатньо високою чутливістю коефіцієнта гомогенності до багатьох видів трансформації структури і, отже, до ступеня пошкодження матеріалу, що не можуть забезпечити класичні методи твердості. Метод базується на вимірюванні параметрів розсіювання значень твердості при масових випробуваннях та широко використовується як експрес-метод оцінки якості

металу, в тому числі ступеня пошкоджуваності як у вихідному стані, так і набутої в процесі експлуатації конструкцій.

Важливим аспектом прикладного застосування методу LM-твердості для визначення поточної пошкоджуваності поверхневого шару матеріалу зразків або елементів конструкцій є раціональний вибір конфігурації зон масових вимірів твердості. Однією з найважливіших вимог при визначенні твердості є прикладення зусилля при заглибленні індентора в матеріал по нормалі до поверхні в точці вимірювання та збереження цього напрямку впродовж всього часу прикладення зусилля. Ця умова беззаперечно виконується для стандартних зразків матеріалів, які підготовлені до визначення твердості, оскільки такі зразки мають плоскопаралельні грані або циліндричну поверхню, що дозволяє провести визначення твердості згідно з усіма вимогами стандарту. Проте у випадку визначення твердості поверхні зразків або елементів конструкції трубчатої форми, що мають значну залишкову деформацію бічної поверхні внаслідок руйнування, площа, яку можна використати для виміру твердості стандартними твердомірами, може бути обмежена. Головним чином, ці обмеження пов'язані з особливостями апаратної реалізації твердоміра, габаритними розмірами зразка, а також можливістю забезпечення прикладення зусилля індентування по нормалі до поверхні матеріалу, можливістю фіксації досліджуваного фрагмента зразка у штатному затискачі твердоміра тощо. В зв'язку з цим доцільно дослідити за допомогою методу LM-твердості розподіл розсіяних пошкоджень по бічній поверхні зруйнованих трубчатих зразків відносно зони руйнування (рис. 1).

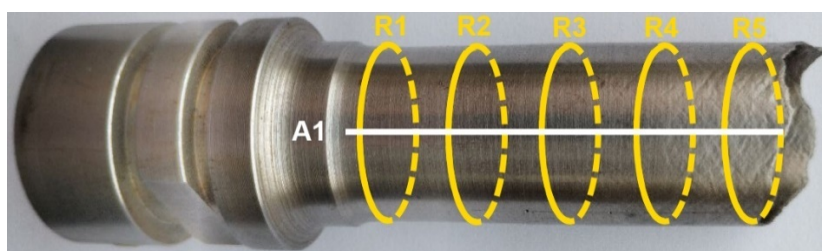


Рисунок 1 – Схема визначення значень коефіцієнта гомогенності на бічній поверхні трубчатого зразка із сталі 10ГН2МФА у поздовжньому (A1) та поперечному (R1-R5) напрямках.

В процесі реалізації серії випробувань трубчатих зразків в умовах одновісного та двовісного навантажень отримано масив експериментальних значень коефіцієнта гомогенності що дозволяє оцінити кінетику накопичення пошкоджень в різних зонах бічної поверхні зруйнованих трубчатих зразків при різних співвідношеннях головних напружень (таблиця 1).

Таблиця 1 – Розподіл значень коефіцієнта гомогенності m , твердості HRB та коефіцієнта варіації v на бічній поверхні трубчатого зразка із сталі 10ГН2МФА, що зазнав руйнування в умовах малоциклової втоми.

Напрямок	m	HRB	v
R1	45,4	101,3	2,44
R2	29,8	101,6	3,77
R3	19,8	99,3	5,58
R4	16,9	96,8	6,34
R5	5,3	93,4	17,99
A1	24,2	100,9	4,58

Для всіх досліджених зразків спостерігається яскраво виражена закономірність значного збільшення неоднорідності матеріалу, яке супроводжується зменшенням коефіцієнта гомогенності, при наближенні до зони руйнування (рис.2).

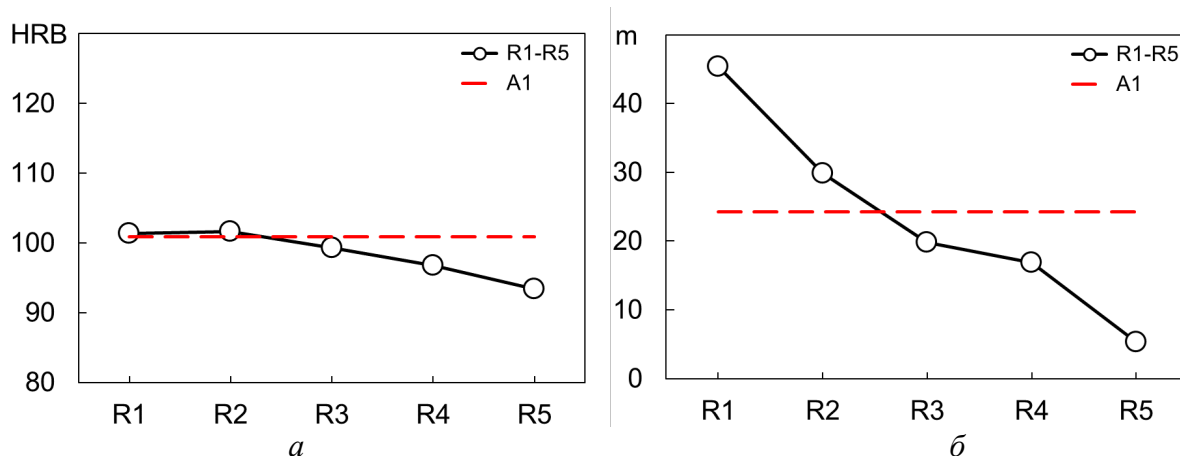


Рисунок 2 – Розподіл значень твердості HRB (*a*) та коефіцієнта гомогенності *m* (*б*) по бічній поверхні трубчатого зразка.

Для всіх досліджених зразків спостерігається яскраво виражена закономірність значного збільшення неоднорідності матеріалу, що супроводжується зменшенням коефіцієнта гомогенності, при наближенні до зони руйнування.

Таким чином, для ділянок бічної поверхні робочої зони зруйнованого зразка, які знаходяться достатньо далеко від області локалізації пластичного деформування при руйнуванні, визначені експериментально значення коефіцієнту гомогенності є такими, що характерні для матеріалу, який зазнав впливу зовнішнього навантаження та має ступінь неоднорідності вищий, ніж вихідний матеріал.

Перелік посилань

1. O. M. Maslo, P. O. Bulakh, V. P. Shvets, and A. A. Kotlyarenko, “Application of the LM-Hardness method to assess the current material state of structural elements”, *Strength Mater.*, vol. 54, pp. 30–640, Nov. 2022.
2. F. F. Giginyak and O. M. Maslo, “A relationship between damage in 10GN2MFA steel and low-cycle strain-controlled loading at different deformation frequencies”, *Strength Mater.*, vol.49, pp. 343–348, Jul. 2017

УДК 539.3

Борис Шелестовський, к.ф-м.н., доц.; Тетяна Пиндус

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ ШТАМПА, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ, З ІЗОТРОПНИМ ПРУЖНИМ ШАРОМ

Анотація. Розв'язано контактну задачу термопружності про тиск циліндричного штампа, що обертається, на ізотропний шар. Застосовуючи інтегральне перетворення Ганкеля та метод Фур'є, знаходження температури та напруженого стану зведено до визначення деяких постійних із системи лінійних алгебраїчних рівнянь, через які зображаються температурні поля та напруження в шарі.

Ключові слова: штамп, шар, температура, контактні напруження.

Borys Shelestovskyi, Ph.D., Assoc. Prof.; Tetyana Pyndus

CONTACT INTERACTION OF THE ROTATING PUNCH WITH ISOTROPIC ELASTIC LAYER

Abstract. The contact task of thermal elasticity of the rotating cylinder punch stress on the isotropic layer has been solved. Using the integral Hankel's transformation and the Fourier's method the temperature and stressed state are found by determination of some constants from the system of linear algebraic equations, due to which the temperature fields and the stresses in the layer are presented.

Key words: punch, layer, temperature, contact stress.

Розглянемо жорсткий циліндричний шар з плоскою основою довжиною L і радіусом R , який втискується силою P в ізотропний шар товщиною h , що лежить на шарі. Штамп обертається з постійною швидкістю ω навколо осі симетрії і внаслідок тертя на площадці контакту виділяється тепло, кількість якого пропорційна коефіцієнту тертя K_0 , швидкості ωr і контактному напруженню $\sigma_z(r)$.

Теплові потоки, які виникають при цьому, направлені всередину шару і штампа. Зовні площадка контакту поверхня шару вільна від зовнішніх зусиль, а на площадці контакту дотичні напруження $\tau_{rz} = 0$, а $\tau_{r\phi}$ пропорційні напруженню $\sigma_z(r)$. На верхньому торці штампа і на вільній поверхні шару підтримується нульова температура, а бічна поверхня циліндра теплоізолювана. На нижній поверхні шару вертикальні переміщення і дотичні напруження рівні нулю.

Для розв'язування задачі введемо циліндричну систему координат r, ϕ, z з площиною $z = 0$, яка співпадає з поверхнею шару, і віссю oz , спрямованою всередину штампу по його осі симетрії. Всі величини (напруження, переміщення, температура, пружні постійні, коефіцієнти теплопровідності і лінійного температурного розширення), які відносяться до шару, позначимо верхнім індексом (1), аналогічні величини для циліндричної області записуються без верхніх індексів. Таким чином, запропонована задача розв'язується при наступних граничних умовах:

$$T = 0 \quad (0 \leq r \leq R, z = L). \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (r = R, 0 \leq L). \quad (2)$$

$$\lambda_z^1 \frac{\partial T^1}{\partial z} - \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = \omega K_0 r \sigma_z(r) / J, \quad \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = h_0 (T - T^1) (z = 0, 0 \leq r \leq R). \quad (3)$$

$$T^1 = 0 \quad (z = 0, R \leq r < \infty). \quad (4)$$

$$u_z^1 = -\varepsilon \quad (z = 0, \leq r \leq R). \quad (5)$$

$$\tau_{rz}^1 = 0 \quad (z = 0, R \leq r < \infty). \quad (6)$$

$$\frac{\partial T^1}{\partial z} = K_H T^1, \quad u_z^1 = 0, \quad \tau_{rz}^1 = 0 \quad (z = -h, 0 \leq r < \infty). \quad (7)$$

Тут λ_z, λ_z^1 – коефіцієнти теплопровідності, h_0 – контактна провідність; ε – величина вертикального переміщення штамп, J – механічний еквівалент тепла.

Відомо [1], що в термопружному випадку термопружний потенціал і температурне поле для ізотропного тіла визначаються із рівнянь:

$$\nabla^2 \varphi = \alpha_T (1 + \sigma) T / (1 - \sigma), \quad \nabla^2 T = 0, \quad (8)$$

а температурні напруження і переміщення виражаються за формулами:

$$u_z^0 = \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad \sigma_z^0 = -2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right), \quad \tau_{rz}^0 = 2\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial z}, \quad (9)$$

де α_T – коефіцієнт лінійного температурного розширення, μ, σ – модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона.

Розв'язок рівняння теплопровідності для шару отримаємо у вигляді інтеграла

$$T^1 = \int_0^\infty (\varphi_1(\alpha) e^{\alpha \xi} + \varphi_2(\alpha) e^{-\alpha \xi}) J_0(\alpha \rho) d\alpha, \quad (10)$$

де $\varphi_1(\alpha), \varphi_2(\alpha)$ – невідомі функції, $\rho = r/R; \xi = z/R$. $J_0(\alpha \rho)$ – функція Бесселя першого роду від дійсного аргумента.

Температурне поле у циліндрі знаходимо методом Фур'є. Загальний розв'язок виглядає так:

$$T(r, z) = A_0 z + B_0 + D_0 (r^2 - 2z^2) + \sum_{\kappa=1}^\infty J_0(\beta_\kappa r) (A_\kappa \operatorname{sh} \beta_\kappa z + B_\kappa \operatorname{ch} \beta_\kappa z) + \sum_{\kappa=1}^\infty I_0(\gamma_\kappa r) (C_\kappa \sin \gamma_\kappa z + D_\kappa \cos \gamma_\kappa z), \quad \beta_\kappa = \mu_\kappa / R, \quad \gamma_\kappa = \kappa \pi / R, \quad (11)$$

де $A_\kappa, B_\kappa, C_\kappa, D_\kappa$ – довільні постійні, $I_0(\gamma_\kappa r)$ – функція Бесселя I-го роду уявного аргументу, $\beta_\kappa, \gamma_\kappa$ – власні числа, що визначаються з граничних умов, μ_κ – корені рівняння $J_1(\mu) = 0$.

Враховуючи $\frac{\partial T^1}{\partial z} - K_H T^1 = 0$;

$$T^1 = \int_0^\infty \varphi_1(\alpha) [e^{\alpha \xi} + P_1(\alpha) e^{-\alpha \xi}] I_0(\alpha \rho) d\alpha. \quad P_1(\alpha) = \frac{\alpha - \kappa_H}{\alpha + \kappa_H} e^{-2\alpha h}. \quad (12)$$

Функція $\varphi(\rho, \xi)$, з врахуванням (12), отримується з першого рівняння (8).

$$\varphi(\rho, \xi) = \frac{1 + \delta^1}{2(1 + \delta^1)} \alpha_T \xi \int_0^\infty \frac{\varphi_1(\alpha)}{\alpha} (e^{\alpha \xi} + P_1(\alpha) e^{-\alpha \xi}) J_0(\alpha \rho) d\alpha \quad (13)$$

Компоненти температурних напружень і переміщень обчислюються за формулами (9). Маючи формули температурних напружень і переміщень, можна розв'язати задачу при механічних граничних умовах. Для цього необхідно до величин, обчислених згідно з формулами (9), додати компоненти напружень і переміщень від бігармонічного потенціалу [2].

Таким чином, для визначення переміщень і напружень в ізотропному шарі маємо наступні формули:

$$\sigma_{zz}^1 = \frac{2\mu}{1-2\nu} \int_0^\infty \alpha \left\{ [(1-2\nu)C - B - \alpha z D] sh \alpha z + [(1-2\nu)D - A - \alpha z C] ch \alpha z \right\} J_0(\alpha r) d\alpha + \frac{(1+\delta^1)}{(1-\delta^1)} \mu \cdot \alpha_T \int_0^\infty \alpha^z \varphi(\alpha) [(1+\xi\alpha)e^{\alpha\xi} + P_1(\alpha)(1-\xi\alpha)e^{-\alpha\xi}] J_0(\alpha\rho) d\alpha. \quad (14)$$

$$\sigma_{rz}^1 = \frac{2\mu}{1-2\nu} \int_0^\infty \alpha \left\{ (2\nu C + B + \alpha z D) ch \alpha z + (2\nu D + A + \alpha z C) sh \alpha z \right\} J_1(\alpha\rho) d\alpha - \frac{1+\delta^1}{1-\delta^1} \mu \alpha_T \int_0^\infty \alpha \varphi_1(\alpha) [(1+\alpha\xi)e^{\alpha\xi} + P_1(\alpha)(1-\alpha\xi)e^{-\alpha\xi}] J_1(\alpha\rho) d\alpha. \quad (15)$$

$$U_z^1 = \frac{1}{1-2\nu} \int_0^\infty \left\{ [2(1-2\nu)C(\alpha) - B(\alpha) - \alpha z D(\alpha)] ch \alpha z + [2(1-2\nu)D(\alpha) - A(\alpha) - \alpha z C(\alpha)] sh \alpha z \right\} J_0(\alpha r) d\alpha + \frac{1+\delta^1}{2(1-\delta^1)} \alpha_T \int_0^\infty \varphi_1(\alpha) [(1+\alpha\xi)e^{\alpha\xi} + P_1(\alpha)(1-\alpha\xi)e^{-\alpha\xi}] I_0(\alpha\rho) d\alpha. \quad (16)$$

Для задоволення граничної умови (2) у формулі (11) необхідно покласти $D_0 = 0$, $D_\kappa = 0$, $C_\kappa = 0$ ($\kappa = \overline{1, \infty}$). Гранична умова (1) з урахуванням ортогональності функцій Бесселя приводить до таких співвідношень між постійними B_0, B_κ , і A_0, A_κ ($\kappa = \overline{1, \infty}$);

$$B_0 = -A_0 \ell R, \quad B_n = -A_n th \mu_n \ell, \quad \ell = L/R. \quad (17)$$

Задовольнивши граничні умови (3), (4) з врахуванням (17) одержимо систему інтегральних співвідношень, що зв'язують функцію $\varphi_1(\alpha)$ з коефіцієнтами A_κ ($\kappa = \overline{0, \infty}$) і напруженням $\sigma_z^1(\rho)$ ($\rho < 1$).

$$\frac{\lambda_z^1}{R} \int_0^\infty \alpha \varphi_1(\alpha) (1 - P_1(\alpha)) d\alpha - \frac{\lambda_z}{R} \left[A_0 \cdot R + \sum_{\kappa=1}^\infty \mu_\kappa J_0(\mu_\kappa \rho) \cdot A_\kappa \right] = \omega K_0 \rho R \sigma_z^1(\rho) / j, \quad 0 \leq \rho < 1;$$

$$\int_0^\infty \varphi_1(\alpha) \cdot P_2(\alpha) J_0(\alpha\rho) d\alpha = -A_0 \cdot R \left(\ell + \frac{\lambda_z}{h_0 \cdot R} \right) - \sum_{\kappa=1}^\infty J_0(\mu_\kappa \rho) \left(th \mu_\kappa \ell + \frac{\mu_\kappa \lambda_z}{R h_0} \right) A_\kappa, \quad 0 \leq \rho < 1; \quad (18)$$

$$\int_0^\infty \varphi_1(\alpha) \cdot P_2(\alpha) J_0(\alpha\rho) d\alpha = 0, \quad \rho > 1.$$

Задовольняючи другу граничну умову (6) та другу і третю граничну умову (7), функції $A(\alpha)$, $B(\alpha)$, $D(\alpha)$ виразимо через $C(\alpha)$.

$$\begin{aligned} B(\alpha) &= -2\nu C(\alpha) + P_3(\alpha) \cdot \varphi_1(\alpha), \\ A(\alpha) &= \left[2(1-\nu) \operatorname{cth} \alpha + \frac{4\nu(1-\nu)}{\alpha h} - \alpha h \right] C(\alpha) + P_4(\alpha) \cdot \varphi_1(\alpha), \\ D(\alpha) &= \frac{2(\nu-1)}{\alpha h} C(\alpha) + P_5(\alpha) \cdot \varphi_1(\alpha). \end{aligned}$$

Вимагаючи виконання граничних умов для напружень і переміщень на поверхнях шару, прийдемо до системи інтегральних рівнянь відносно функцій $C(\alpha)$ і $\varphi_1(\alpha)$, через які зображаються компоненти напружено-деформівного стану в шарі

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} C(\alpha) J_0(\alpha \rho) d\alpha &= -\frac{\varepsilon}{R} - \frac{1}{2} \sigma_2 \alpha_T^1 \int_0^{\infty} \varphi_1(\alpha) \cdot F_1(\alpha) J_0(\alpha \rho) d\alpha, \quad 0 \leq \rho < 1; \\ \int_0^{\infty} \alpha \left[-\frac{2\mu}{1-2\nu} F_2(\alpha) \cdot C(\alpha) + \mu \sigma_2 \alpha_T \cdot \varphi_1(\alpha) P_2(\alpha) \right] J_0(\alpha \rho) d\alpha &= 0, \quad \rho > 1. \end{aligned} \quad (19)$$

Використовуючи методику [3], систему інтегральних рівнянь зведемо до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих X_κ та Y_κ ($\kappa = \overline{0, N}$).

Для визначення контактних напружень під штампом отримано наступні вирази:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(\rho, 0) &= \sigma_{zz}^{(P)}(\rho, 0) + \sigma_{zz}^{(T)}(\rho, 0), \quad \sigma_{zz}^{(P)}(\rho, 0) = -\frac{P}{2\pi R^z} \frac{1}{\sqrt{1-\rho^z}} \left[Z_0^{(1)} + \frac{1}{\rho} \sum_{\kappa=1}^{N_1} Z_\kappa^{(1)} T_{2\kappa+1}(\rho) \right], \\ \sigma_{zz}^{(T)} &= \alpha_T T_0 \frac{1}{\sqrt{1-\rho^z}} \left[Z_0^{(2)} + \frac{1}{\rho} \sum_{\kappa=1}^{N_1} Z_\kappa^{(z)} T_{2\kappa+1}(\rho) \right], \end{aligned}$$

де $T_{2\kappa+1}(\rho)$ – функція Чебишева; $\sigma_{zz}^{(P)}(\rho, 0)$ – силова складова напружень; $\sigma_{zz}^{(T)}(\rho, 0)$ – температурна складова напружень в шарі.

Висновки. Застосовуючи інтегральне перетворення Ганкеля до рівняння теплопровідності для шару та метод Фур'є для циліндра, розв'язок задачі про знаходження температури та напруженого стану зведено до визначення коефіцієнтів розкладу в ряд по функціях Чебишева температури та напружень із системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Аналіз показує, що збільшення товщини шару приводить до зменшення силової складової контактних напружень, а умови тепло обміну суттєво впливають на їх температурну складову.

Перелік посилань

1. Коваленко А.Д. Основи термопружності. – К: Наук. думка, 1979 – 304с.
2. Грилицький Д.В., Кізіма Я.М. Осесиметричні контактні задачі теорії пружності і термопружності – Львів: Виц.шк., 1981 – 136с.
3. Б. Окрепкий. Осесиметрична контактна задача термопружності про тиск штампа, що обертається, на пружний півпростір при неідеальному тепловому контакті. Б. Окрепкий, М. Шелестовська // Вісник ТДТУ.–2002.–Т7, №1. – С.5-11.

УДК 621.083

Владислав Шостак, к.т.н.; Сергій Пашченко, к.т.н., доц.; Артем Шульгін, к.т.н., с.досл.; Володимир Харченко

Державний науково-дослідний інститут авіації, Україна

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

Анотація. В даній доповіді запропоновано впровадження методичного підходу щодо визначення фактичного технічного стану об'єктів авіаційної техніки (АТ) із використанням інноваційних технологій 3D-сканування, мультифізичного математичного моделювання в програмному середовищі CAD/CAE-систем та прикладних моделей штучного інтелекту. Це дозволить реалізувати стратегію експлуатації парку АТ Збройних Сил України до граничних значень для забезпечення повного використання її ресурсного потенціалу.

Ключові слова: об'єкт авіаційної техніки, технічний стан, ресурс, критичний елемент, математична модель.

Vladyslav Shostak, Ph.D.; Serhii Pashchenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Artem Shulhin, Ph.D.; Volodymyr Kharchenko

A METHODOLOGICAL APPROACH FOR DETERMINING THE ACTUAL TECHNICAL CONDITION OF AVIATION EQUIPMENT OBJECTS USING INNOVATIVE TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

Abstract. A methodological approach for determining the actual technical condition of aviation equipment objects using 3D scanning technologies, multiphysical mathematical modeling in CAD/CAE software environments, and applied artificial intelligence models.

Keywords: aviation equipment object, technical condition, resource, critical element.

За останні роки відбулося суттєве зростання інтенсивності польотів та складності завдань, що виконуються авіацією Збройних Сил України. Це призвело до значного вичерпання залишку встановленого ресурсу та якісних змін технічного стану парку авіаційної техніки (АТ), в тому числі, внаслідок отримання експлуатаційних та бойових пошкоджень. Тому, на сьогодні, основною умовою подальшої безпечної експлуатації зазначеного парку, строки служби якої вдвічі перевищують попередньо встановлені значення, є виявлення, постійний моніторинг і актуалізація “критичних” елементів конструкції по кожному типу АТ з можливістю їх локалізації засобами контролю і діагностики та подальшого відновлення шляхом ремонту або заміни.

Для забезпечення високої ймовірності виявлення “критичних” елементів конструкції необхідні такі технічні засоби, які здатні виявляти один і той же тип дефекту методами неруйнівного контролю, заснованими на різних фізичних принципах, і які мають специфічні характеристики у відповідності до особливостей конструкції деталей об'єкта контролю та різноманітності типів використаних матеріалів для їх виготовлення.

Традиційні методи та засоби діагностики технічного стану АТ на сьогодні не дозволяють в повній мірі реалізувати зазначені вимоги, що в свою чергу, обумовлює необхідність розробки нових наукових засад та інноваційних підходів до вирішення цього питання.

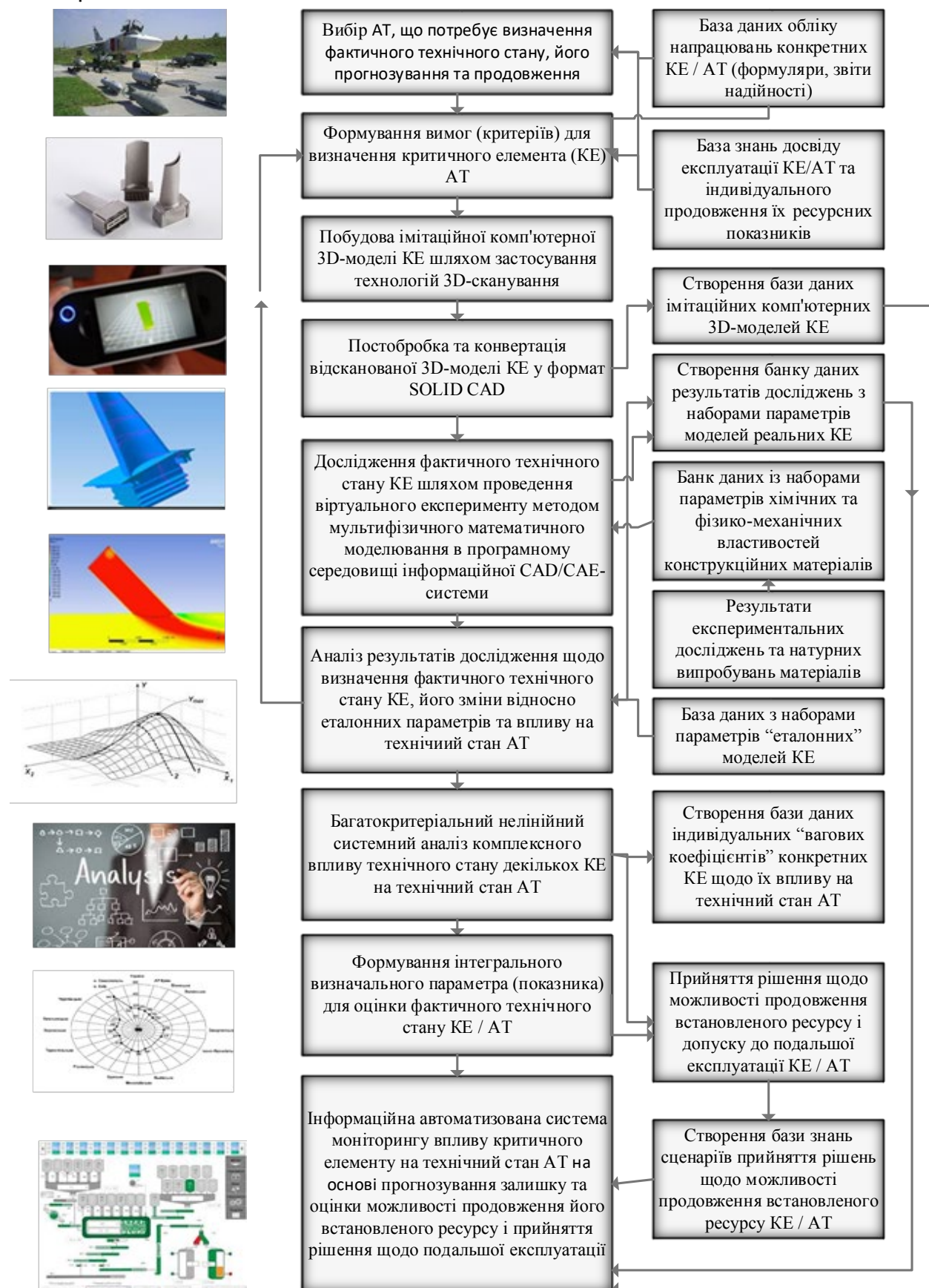


Рис. 1. Методичний підхід щодо визначення фактичного технічного стану АТ із використанням інноваційних технологічних рішень

Саме такими інноваційними технологічними рішеннями на сьогодні є 3D-сканування зовнішніх та внутрішніх властивостей фізичних об'єктів, міждисциплінарне мультифізичне математичне моделювання в програмних середовищах інформаційних CAD/CAE-систем, багатокритеріальний нелінійний системний аналіз та різноманітні прикладні моделі штучного інтелекту на основі алгоритмів машинного самонавчання, які можуть бути інтегровані в розробку інформаційних систем підтримки прийняття рішень і відкривають нові можливості для вдосконалення процесів визначення та прогнозування фактичного технічного стану об'єктів АТ.

В роботі запропоновано методичний підхід (рис. 1), який ґрунтується на оцінюванні вихідних даних щодо встановлених строків служби, ресурсних показників, історії навантаження та отриманих експлуатаційних та бойових пошкоджень. В якості основного отриманого результату при цьому представлено інформаційну автоматизовану систему моніторингу впливу “критичного” елемента на загальний технічний стан визначеного об'єкта АТ на основі прогнозування залишку та оцінки можливості збільшення його встановленого ресурсу і прийняття управлінських рішень щодо подальшої експлуатації.

Впровадження запропонованого методичного підходу із використанням інноваційних технологічних рішень дозволить на практиці реалізувати стратегію експлуатації парку АТ Збройних Сил України до граничних значень для забезпечення повного використання її ресурсного потенціалу, закладеного на стадіях розробки та виробництва.

УДК 624.014:621.771

¹Микола Підгурський, д.т.н., професор, ¹Микола Сташків, к.т.н., доцент, ¹Іван Підгурський, к.т.н., доцент, ²Наталія Макаренко, д.т.н., професор

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

²Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНОГО СТАНУ Т-ПОДІБНОГО З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТОНКОСТІННИХ ПРОФІЛЬНИХ ТРУБ

Анотація. Наведено конструктивно-технологічні фактори, що впливають на міцність та довговічність елементів конструкцій та деталей машин. Методом скінчених елементів досліджено напружено-деформівний стан в зоні Т-подібного з'єднання елементів профільних труб.

Ключові слова: тонкостінні профільні труби, напружено-деформівний стан, теоретичний коефіцієнт концентрації напружень.

Mykola Pidgurskyi, Mykola Stashkiv, Ivan Pidgurskyi

STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE T-SHAPED ELEMENTS CONNECTION OF THIN-WALLED PROFILE PIPES

Abstract. Design and technological factors affecting the strength and durability of structural elements and machine parts are given. The stress-strain state in the T-shaped connection area of profile pipes elements was researched using the finite element method.

Keywords: thin-walled profile pipes, stress-strain state, theoretical stress concentration factor.

Найважливішими факторами, що впливають на міцність та довговічність елементів конструкцій і деталей машин є їх конструктивно-технологічні характеристики:

- концентрація напружень;
- абсолютні розміри (масштабний фактор);
- місцевий згин тонкостінних елементів;
- властивості металу в зоні зародження втомних пошкоджень;
- залишкові зварні напруження.

Концентрація напружень в елементах конструкцій, як і в деталях машин створюється геометричними концентраторами, тобто локальною зміною їх форми. У таких місцях виникають місцеві напруження, які суттєво перевищують номінальні напруження. Наявність концентраторів напружень приводить не тільки до збільшення місцевих напружень, але й до зміни виду напруженого стану переходу від лінійного напруженого стану до плоского чи об'ємного.

Рівень концентрації напружень характеризується теоретичними коефіцієнтами концентрації для нормальних α_σ і дотичних α_τ напружень:

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_H}; \quad \alpha_\tau = \frac{\tau_{max}}{\tau_H}$$

Одні з найбільших значень теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень спостерігаються в з'єднаннях з тонкостінних гнutoзварних профілів, причому їх величина залежить від виду та форми з'єднання, місця розташування вздовж з'єднання, товщини профілів, способу навантаження та ін.

У зв'язку з цим проведено моделювання напружено-деформівного стану Т-подібного з'єднання двох елементів тонкостінних профільних труб квадратного поперечного перетину з розмірами 200×200×8 мм та 120×120×8 мм відповідно (рис. 1) для двох випадків навантаження:

- розтягуючою силою, що діє вздовж осі вертикального елемента (рис. 2, а);
- згинаючою силою, що діє перпендикулярно до осі вертикального елемента і прикладена на його вільному кінці (рис. 2, б).

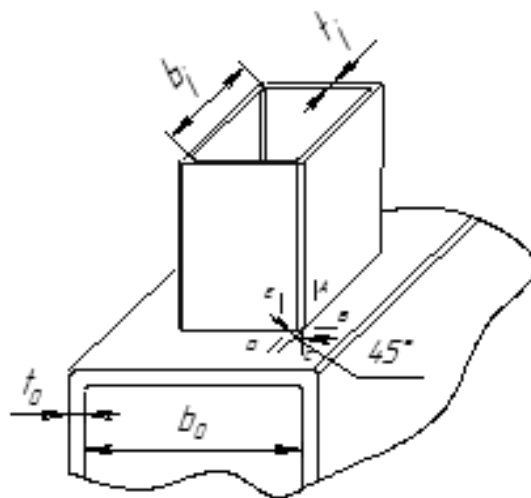


Рис. 1. Схема Т – подібного з'єднання елементів профільних труб

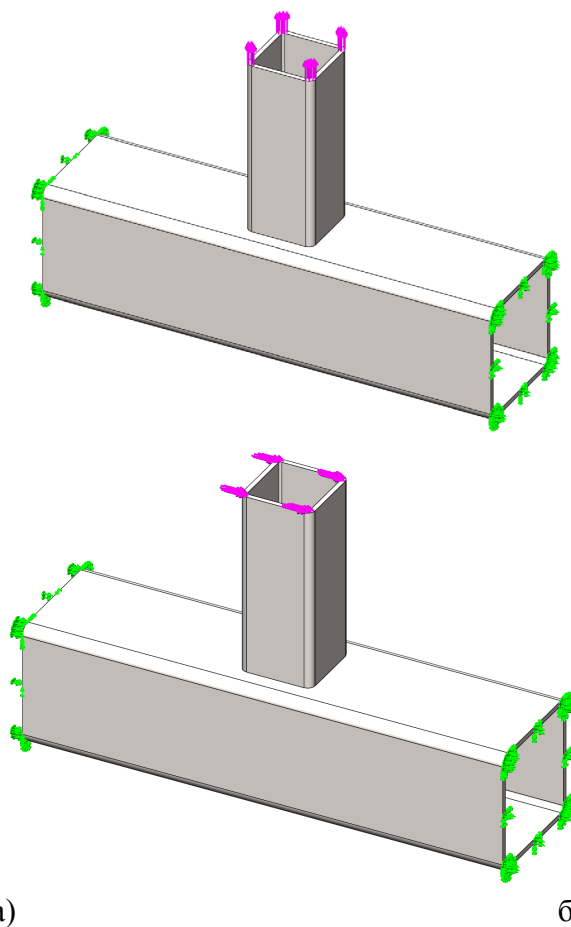


Рис. 2. Схема закріплення та навантаження модельованих з'єднань

Кінці горизонтального елемента профільної труби жорстко зафіксовано (защемлено). Елементи жорстко з'єднані один з одним (глобальний контакт з незалежною сіткою). Розмір елемента глобальної сітки скінчених елементів – 2 мм.

Моделювання реалізовано засобами програмного комплексу SOLIDWORKS з використання модуля інженерного аналізу SOLIDWORKS Simulation.

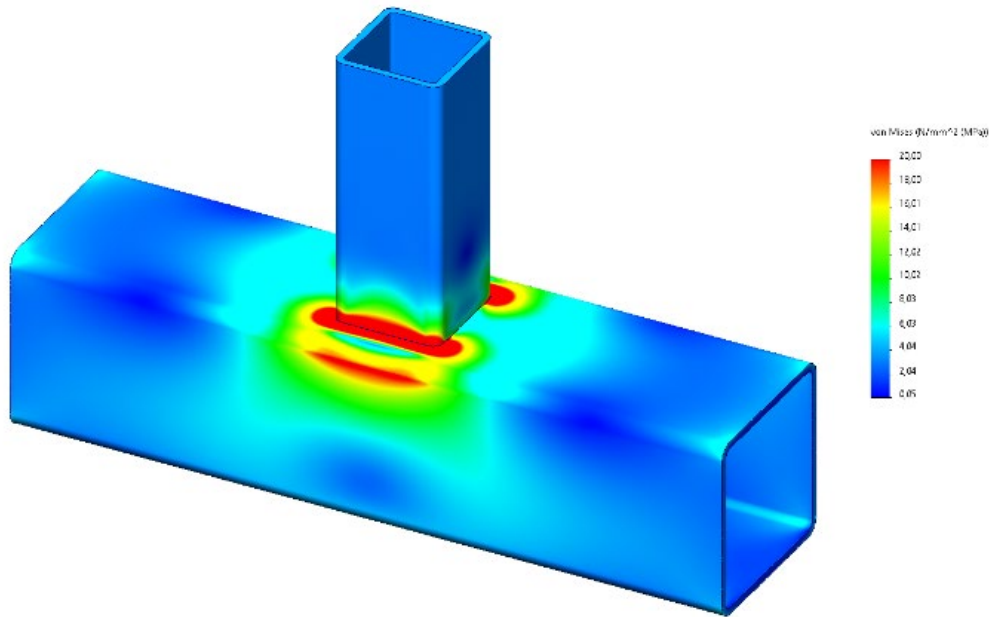
Результати моделювання напружено-деформівного стану T – подібного з'єднання елементів профільних труб представлено на рис. 3 та табл. 1.

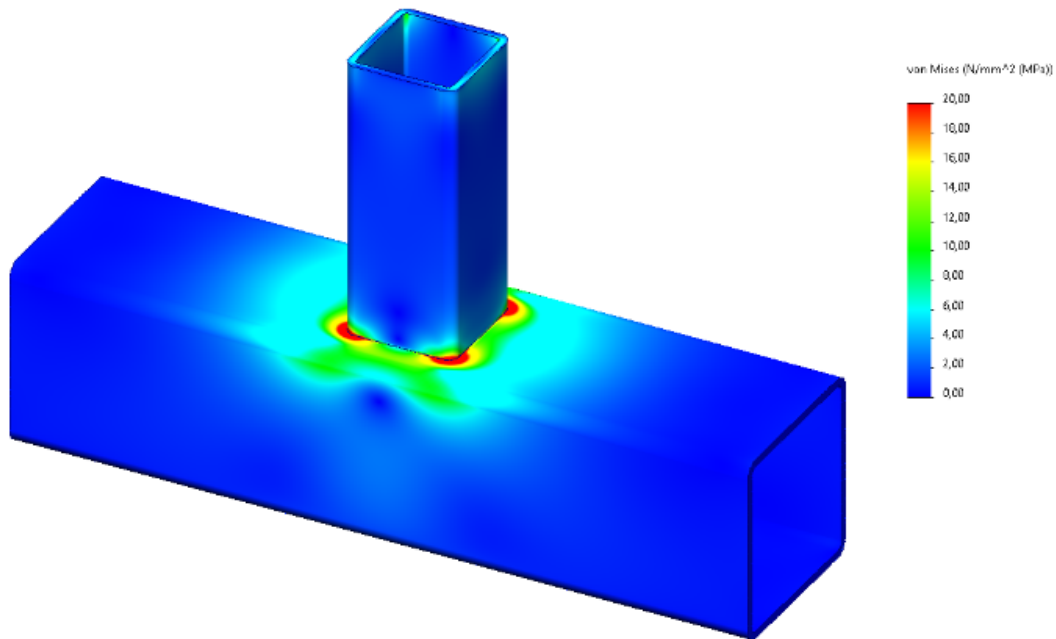
Для геометричних параметрів з'єднання $\beta = b_1 / b_0 = 0,6$; $\tau = t_1 / t_0 = 1,0$; $2\gamma = b_1 / t_0 = 24$ значення максимальних коефіцієнтів концентрації напружень вздовж ліній A; B; C; D; E для обох досліджуваних випадків зведено у таблицю 1.

Таблиця 1.

Максимальні коефіцієнти концентрації напружень для T – подібного з'єднання елементів профільних труб вздовж ліній A – E

Вид навантажень	$\alpha_\sigma \max$									
	A	A[1]	B	B[1]	C	C[1]	D	D[1]	E	E[1]
тип 1	15,05	14,5	25,35	28	23,69	24,2	12,83	11,9	14,8	14,5
	A	A[2]	B	B[2]	C	C[2]	D	D[2]	E	E[2]
тип 2	8,02	-	13,4	13,21	17,05	17,89	11,7	-	8,81	-





б)

Рис. 3. Результати моделювання НДС Т – подібного з'єднання елементів профільних труб:

- а) напруження в елементах з'єднання при дії розтягуючої сили;
- б) напруження в елементах з'єднання при дії згинаючої сили.

Порівняння отриманих результатів (табл. 1) та даних, отриманих іншими авторами [1, 2] вказує на їх добру збіжність. Похибка не перевищує 9,5%.

Література

1. Hollow sections in structural applications / Wardenier, J.; Packer, J.A.; Zhao, X.-L.; Vegte, G.J. Van Der – Bouwen met Staal, Stichting, 2010. – 231 p.
2. IIW Doc. XV – 1021 – 99, IIW Doc. XV – E – 99 – 244, IIW Doc. XIII – 1772 – 99. Recommended fatigue design procedure for welded hollow section joints / Zhao X.-L., Packer J.A. – International Institute of Welding, 1999. – P.1. – 65 p.

Секція: ПОКРИТТЯ, НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ

УДК 621.326

Сергій Бись, к.т.н., доц.; Вадим Галкін

Хмельницький національний університет, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПРУЖИННИХ КІЛЕЦЬ

Анотація. Експериментально отримано та проаналізовано вплив зносостійкого покриття, а саме хімічного хромування, на тертя та зношування сталі 65Г без врахування та з врахуванням дії водневого середовища.

Ключові слова: тертя, зношування, покриття, водень.

Serhii Bys, Ph.D., Assoc. Prof.; Vadim Galkin

INCREASING THE PERFORMANCE OF SPRING RINGS

Abstract. The effect of a wear-resistant coating, namely chemical chromium plating, on the friction and wear of 65G steel without taking into account and taking into account the effect of the hydrogen environment was experimentally obtained and analyzed.

Keywords: friction, wear, coating, hydrogen.

При бурінні нафтових та газових свердловин використовують шарошкові долота до яких висуваються досить високі вимоги по зносостійкості, надійності та стабільності роботи при їх експлуатації. Але як показує практика досить велика частка виходу з ладу шарошкових доліт виникає внаслідок виходу з ладу підшипникового вузла шарошки. Вихід з ладу підшипникового вузла виникає внаслідок потрапляння у нього абразиву, агресивних рідин та інших речовин. Така ситуація виникає тоді, коли знос пружинного кільця, що захищає підшипниковий вузол від потрапляння у нього абразивної речовини, досягає критичного значення. Хотілося би відмітити, що аналіз поверхні зношування пружинного кільця свідчить про те, що зношування носить крихкий характер. Це може свідчити про можливе наводнення, за певних умов буріння, матеріалу пружинного кільця. Тобто крім звичайного абразивного зношування кільця присутнє ще і водневе його зношування.

Тому потрібно провести випробовування сталі 65Г зміцненої низькотемпературним покриттям та визначити всі необхідні характеристики матеріалу з врахуванням можливого його наводнювання.

Було вирішено провести насичення воднем зразків у розчині сірчаної кислоти на протязі 1 години але при цьому змінювати густину струму катодної поляризації від 1 А/дм² до 4 А/дм². Всі експерименти виконували для зразків при швидкості тертя-ковзання 0,2 та 0,4 м/с. Зразки притискали до контр тіла з зусиллям яке забезпечувало тиск в зоні контакту $P = 10$ МПа.

Як відомо одним із методів підвищення зносостійкості матеріалів є нанесення на їх поверхню захисних зносостійких покриттів. Це дозволяє не тільки підвищити зносостійкість матеріалу але надати більш естетичного вигляду виробу.

Хімічне хромування поверхонь тертя сталі 65Г виконували в лабораторіях кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету. Після обробки на поверхні зразків утворювалося зносостійке покриття хрому (ЯНГ) товщиною 6 - 8 мкм. Мікротвердість поверхні збільшувалася на 30-60 %, шорсткість поверхні зменшувалася. При нанесенні покриття ЯНГ температура не перевищує 100°C, а це дозволяє зберегти початковий структурний стан основи матеріалу, що дуже важливо для збереження його пружних властивостей.

Результати випробовувань на тертя та зношування сталі 65Г без покриття та з покриттям ЯНГ, а також без наводнювання та після наводнювання представлені у таблиці 1 та на рисунках 1, 2. Нанесення покриття ЯНГ на поверхню зразків сталі 65Г підвищує зносостійкість матеріалу. Причому при терті сталі 65Г з покриттям ЯНГ після наводнювання майже не відбувається збільшення інтенсивності її зношування.

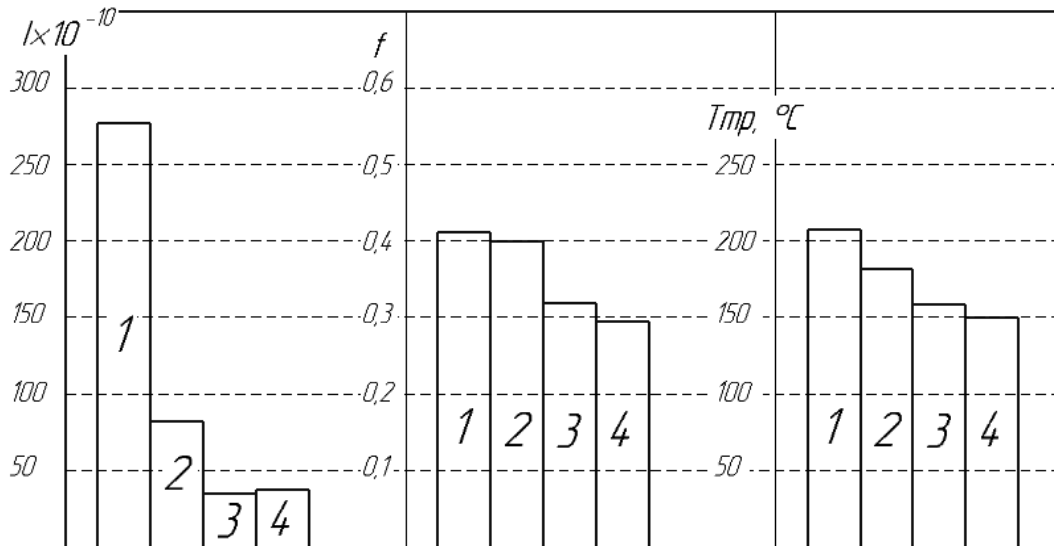


Рисунок 1 – Значення інтенсивності зношування (I), коефіцієнта тертя f та температура $T_{тр}$ в зоні тертя сталі 65Г при швидкості 0,2 м/с:

1 – без наводнювання та покриття; 2 – без покриття після наводнювання;

3 – з покриттям ЯНГ без наводнювання; 4 - з покриттям ЯНГ після наводнювання.

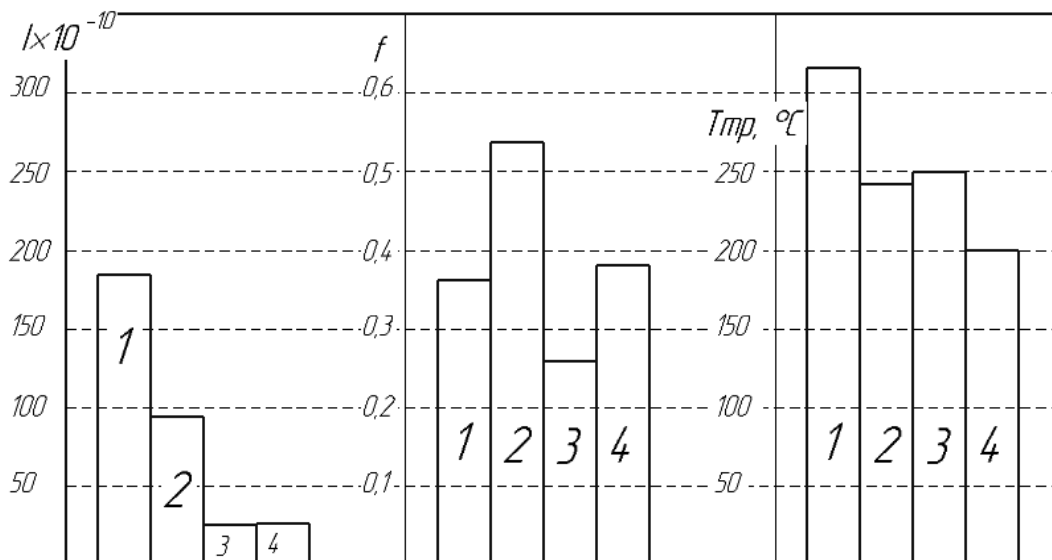


Рисунок 2 – Значення інтенсивності зношування (I), коефіцієнта тертя f та температура $T_{тр}$ в зоні тертя сталі 65Г при швидкості 0,4 м/с:

1 – без наводнювання та покриття; 2 – без покриття після наводнювання;

3 – з покриттям ЯНГ без наводнювання; 4 - з покриттям ЯНГ після наводнювання.

Інтенсивність зношування сталі 65Г, при зміцненні покриттям ЯНГ без наводнювання, зменшується майже у 7 раз, при швидкості тертя ковзання 0,2 м/с, і у 7,5 раз при швидкості тертя ковзання 0,4 м/с.

Водень в зоні тертя майже не впливає на тертя та зношування сталі 65Г з покриттям ЯНГ. Це можна пояснити впливом хрому на здатність водню проникати у поверхневі шари матеріалу.

Таблиця 1 - Інтенсивність зношування ($I \times 10^{-10}$), коефіцієнт тертя f та температура $T_{тр}$ в зоні тертя сталі 65Г з покриттям ЯНГ і без нього, без наводнювання і після наводнювання

Швидкість тертя, м/с	Умови досліджень			
	Без зміцнення поверхні		Із покриттям ЯНГ	
	на повітрі	після наводнювання	на повітрі	після наводнювання
Інтенсивність зношування				
0,2	275	80	40	42
0,4	185	90	25	26
Коефіцієнт тертя f				
0,2	0,41	0,4	0,32	0,29
0,4	0,36	0,53	0,27	0,38
Температура $T_{тр}$ в зоні тертя, °С				
0,2	210	180	160	150
0,4	315	240	250	200

Після нанесення покриття ЯНГ на поверхню зразків сталі 65Г коефіцієнт тертя без водню та після наводнювання зменшився на 30-40%, цим можна пояснити зменшення інтенсивності зношування. При збільшенні швидкості тертя ковзання відбувається зменшення коефіцієнта тертя.

Температура тертя визначається умовами тертя та станом поверхонь контакту. Після нанесення зносостійкого покриття ЯНГ температура в зоні тертя зменшилася на 20-35%, якщо порівнювати з тертям без покриття ЯНГ.

Висновки.

Якщо врахувати той факт, що при експлуатації відбувається насичення воднем поверхні пружинного кільця то для кращого його захисту від наводнювання доцільно використовувати покриття до складу яких входить хром. Тобто у якості зносостійкого покриття для пружинних кілець можна використовувати хімічне хромування (покриття ЯНГ). Нанесення покриття хімічного хромування (ЯНГ) можливо за побутових умов при наявності відповідних реактивів.

УДК 621.326

Сергій Бись, к.т.н., доц.; Олександр Липка

Хмельницький національний університет, Україна

ВПЛИВ СТРУКТУРНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛУ НА ЙОГО ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА КОНСТРУКТИВНУ МІЦНІСТЬ

Анотація. На прикладі сталі 60С2 проведено аналіз впливу структурного стану матеріалу на його показники конструктивної міцності та зносостійкості.

Ключові слова: структура, тертя, зносостійкість, міцність, тріщиностійкість.

Serhii Bys, Ph.D., Assoc. Prof.; Oleksandr Lypka

THE INFLUENCE OF THE STRUCTURAL STATE OF THE MATERIAL ON ITS WEAR RESISTANCE AND STRUCTURAL STRENGTH

Abstract. On the example of steel 60C2, an analysis of the influence of the structural state of the material on its indicators of structural strength and wear resistance was carried out.

Keywords: structure, friction, wear resistance, strength, crack resistance.

Тертя та зношування матеріалів складається із сукупності механічних, фізичних та фізико-хімічних явищ, що відбуваються у зоні контакту поверхонь тертя. Основні фактори, які впливають на тертя та зношування умовно можна поділити на три групи: технологічні (структура; хімічні, фізичні та механічні властивості); конструктивні (схема контакту, макро- та мікро геометрія поверхонь тертя, конструкція робочих поверхонь и т.п.); експлуатаційні (питома робота тертя, відносна швидкість ковзання, середовище, температура). В процесі тертя під впливом цих факторів формуються поверхневі шари твердих тіл, які обумовлюють механізм тертя та зношування і відрізняються специфічним структурним станом.

Металоємність та надійність пар тертя деталей машин визначаються характеристиками конструктивної міцності та зносостійкості. Встановлення залежностей між цими показниками, а також вплив на них структурних механізмів зміцнення, на нашу думку, є важливою задачею, розв'язок якої дозволить прогнозувати трибологічні характеристики пар тертя і дасть змогу уникнути тривалих випробовувань.

До показників конструктивної міцності можна віднести: механічні характеристики, показники тріщиностійкості, мікро пластичності та поверхневої міцності матеріалів. Авторами були проведені відповідні дослідження трибологічних, механічних, мікропластичних характеристик, в'язкості руйнування та поверхневої міцності матеріалів результати яких були систематизовані та проаналізовані. Також було досліджено вплив на них структурних механізмів зміцнення, тому що всі ці показники є структурно чутливими. Крім того, при проведенні аналізу враховувались результати отримані при макро- та мікроструктурному дослідженні поверхонь тертя.

Показники мікропластичності характеризують здатність матеріалу чинити опір малим деформаціям. При навантаженні тертям в зоні контакту, на мікро рівні, відбувається деформація поверхневих шарів, величина якої визначається структурним станом висхідного матеріалу і буде впливати на тертя та зношування матеріалу. Проведений аналіз показників мікро пластичності та зносостійкості матеріалів підтвердили їх взаємозв'язок (рис. 1). Збільшення опору матеріалу мікро деформаціям (збільшення σ_z та A_2) спричиняє зменшення інтенсивності його зношування (I) і максимум σ_z та A_2 відповідає мінімуму (структура відпуску 300°C). Зменшення опору

матеріалу мікро деформаціям (збільшення мікро пластичності) супроводжується зменшенням його зносостійкості.

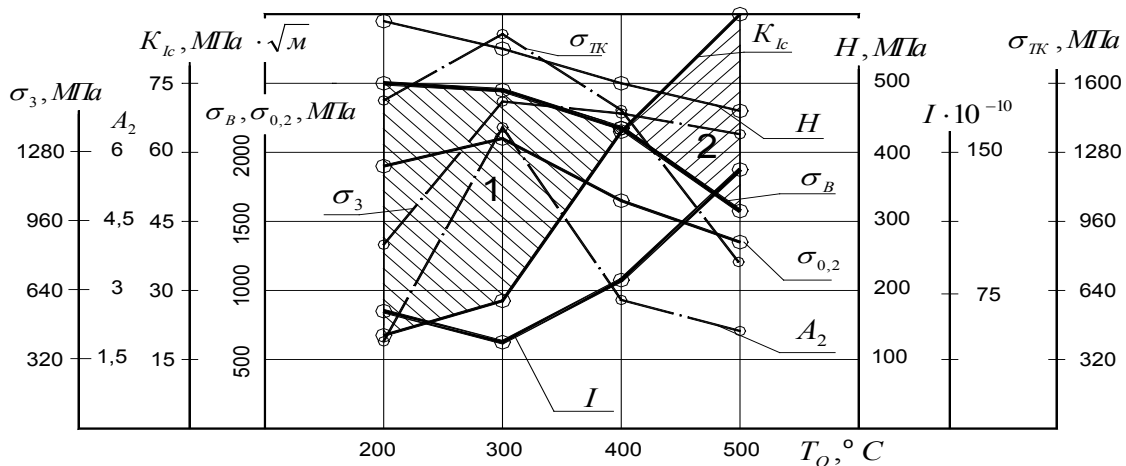


Рисунок 1- Показники конструктивної міцності та зносостійкості сталі 60С2 для різного її структурного стану.

Визначені показники поверхневої міцності σ_{TK} матеріалу для різного структурного стану показали їх високу структурну чутливість та кореляцію з величиною інтенсивності зношування матеріалу. Матеріал із структурою мартенситу відпуску має найбільше значення величини σ_{TK} і відповідно найменшу I . Зміна структурного стану призводить до зменшення міцності поверхні і супроводжується збільшенням інтенсивності зношування матеріалу.

Порівнявши між собою криві зміни показників мікро пластичності (σ_3 , A_2), стану поверхні матеріалу (σ_{TK}) та умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ можна помітити їх кореляційний зв'язок.

На графіку (рис. 1), в залежності від структурного стану матеріалу, можна виділити дві основні зони, які характеризуються переважним механізмом відбування релаксації дотичних пікових напружень, що виникають в зоні контакту. Одна з них (1) характеризується тим, що релаксація відбувається переважно крихким руйнуванням. Це характерно для суттєво зміцненого матеріалу з відносно незначним запасом пластичності (при значному зміцненні сплаву дефекти субмікроструктури заблоковані, пластична деформація мінімальна і релаксація відбувається за рахунок утворення нових поверхонь – росту тріщин). Друга (2) – характерна тим, що релаксація проходить переважно шляхом пластичної деформації, вона властива для матеріалів з малою межею міцності та великою в'язкістю руйнування.

Наприклад, для сталі 60С2 із структурою відпуску 300-400°C релаксація напружень відбувається переважно шляхом крихкого руйнування. Із збільшенням температури відпуску більше 400°C відбувається зміна механізму релаксації напружень. Крім того помітний симбатний характер залежності в'язкості руйнування (K_{Ic}) та інтенсивності зношування (I), а також умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$, показників мікропластичності (σ_3 , A_2) та поверхневої міцності (σ_{TK}), які вказують на кореляційний зв'язок цих характеристик.

Тобто можна зробити висновок, що більш зносостійким буде матеріал з більшими значеннями критеріїв в'язкості руйнування (K_{Ic}) та умовної границі текучості ($\sigma_{0,2}$), і на нашу думку частка впливу величини (K_{Ic}) переважна. Крім того, такий матеріал повинен мати більші значення величин поверхневої міцності (σ_{TK}) та показників мікро пластичності (σ_3 , A_2).

УДК 621.793

Роман Кідун¹; Микола Пасько²; Ганна Лаптева², к.т.н.; Олег Биковський³, д.т.н., проф.

¹ ЗСУ, 1 інженерно-саперне відділення інженерно саперного взводу військової частини А7280, Україна

² Національний університет «Запорізька політехніка», Україна

³ Запорізький національний університет, Україна

НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОДІВ РУДНОТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ

Анотація. Графітовані електроди знаходять своє широке застосування в галузях промисловості зі складними технологічними процесами, пов'язаними з підвищеними температурами. Найчастіше їх використовують при виплавці сталей, спеціальних сплавів, феросплавів, керамік з використанням руднотермічних, сталеплавильних, рафінувальних та інших електродугових печей. Сутність даної роботи полягає в пропозиції способу нанесення захисного покриття для графітованого електроду технологією плазмового напилення струмоведучим дротом. Аналіз його роботи при впливі високотемпературної корозії, здатності стримувати окислення та розрахунок економічного ефекту від застосування обраної технології.

Ключові слова: плазмове напилення, покриття, розрахунок, міцність зчеплення.

Roman Kidun; Mykola Pasko; Hanna Laptieva, Ph.D.; Oleg Bykovskiy, Ph.D., Prof.

APPLICATION OF PROTECTIVE COATINGS TO INCREASE THE SERVICE LIFE OF ELECTRODES OF ORE THERMAL FURNACES

Abstract. Graphite electrodes are widely used in industries with complex technological processes associated with elevated temperatures. They are most often used in the smelting of steels, special alloys, ferroalloys, and ceramics using ore-thermal, steel-smelting, refining, and other electric arc furnaces. The essence of this work is to propose a method of applying a protective coating for a graphite electrode using the technology of plasma sputtering with a current-carrying wire. Analysis of its operation under the influence of high-temperature corrosion, the ability to restrain oxidation and calculation of the economic effect of the application of the selected technology.

Key words: plasma spraying, coating, calculation, bond strength.

У сучасних дугових сталеплавильних печах (ДСП), а також в руднотермічних печах (РТП) для виготовлення електрокорунду використовують графітові електроди різних марок в залежності від матеріалу сировини. Основною перевагою їх є менший питомий опір, що дозволяє застосовувати електроди меншого діаметра порівняно з вугільними та самоспеченими, що полегшує конструкцію стійок, кареток електродотримачів і зменшує електричні втрати в електродах.

При цьому використовують як суцільні, так і трубчасті електроди, які працюють в зоні від струмопідводу до колосника в інтервалі температур від 500° С до 2000° С, та від 2000° С до ≈ 4000° С в просторі печі[1].

В процесі експлуатації можливі механічні (обвал шихти) та термічні (перевищення струмових навантажень) руйнування. Більш суттєвим є бічне зношування, обумовлене окисленням поверхні електроду при високій температурі, яке становить 55-75 % для звичайних ДСП та 40 % для надпотужних [2]. Це пов'язано не тільки з окисленням вуглецю, а й втратою зв'язуючого, внаслідок чого радіус пор і їх кількість (пористість електроду обумовлена специфікою отримання виробу), при

нагріванні збільшується, що призводить до втрати маси з бічної поверхні, тому що в першу чергу до окислення більш схильний кам'яновугільний пек, як зв'язуючий компонент (рис.1) [3].

Тому для запобігання окислювальних процесів треба наносити на бічну поверхню захисне покриття, яке перешкоджатиме взаємодії кисню з графітом шляхом закупорювання пор і проникненню кисню в глиб електроду .

Оптимальним способом нанесення захисного покриття є плазмове напилення струмоведучим дротом марки АК-5 [4]. Використання алюмінію у захисному покритті обумовлено утворенням оксидів, які мають високу температуру плавлення $\approx 2050^\circ\text{C}$ і температуру дисоціації $\approx 3500^\circ\text{C}$. Останній показник наближений до температури випаровування графіту $\approx 3400^\circ\text{C}$. Важливою властивістю оксиду алюмінію Al_2O_3 є висока щільність оксидної плівки і корозійна стійкість аж до температури сублимації графіту. Додаток кремнію знижує поверхневий натяг і в'язкість в алюмінієвому сплаві, що сприяє його розтіканню при нанесенні на поверхню графіту.

Для оцінки розподілу температури в проміжку від електродотримача до колосника та її впливу на захисне покриття був проведений розрахунок в пакеті програмного забезпечення ANSYS WORKBENCH. Так як основним джерелом нагріву електроду є джоулево тепло, то для аналізу було обрано два розрахункові модулі: Electric та Transient Thermal.

При певних граничних умовах для електрода діаметром 300 мм і довжиною 1200 мм при силі струму 2000 А протягом 1 години температура електрода біля електродотримача становить 541°C , а на торці сягає 4000°C . Ці дані приводять до висновку, що захисне покриття потрібне на всій довжині електроду.

Для дослідження поведінки захисного покриття на графітову пластину марки ЕГ товщиною 7 мм, шириною 18 мм, довжиною 150 мм було нанесено плазмове покриття марки АК-5 товщиною 0,4 мм з одного боку. Цю пластину використовували як зварювальний електрод, на постійному струмі прямої полярності при $I_{зв} = 450\text{-}500\text{ А}$, $U_d = 38\text{-}40\text{ В}$ протягом 5 с.

Теоретичний розрахунок розподілу температурних полів показав наближені до наведених в роботі [1] результати.

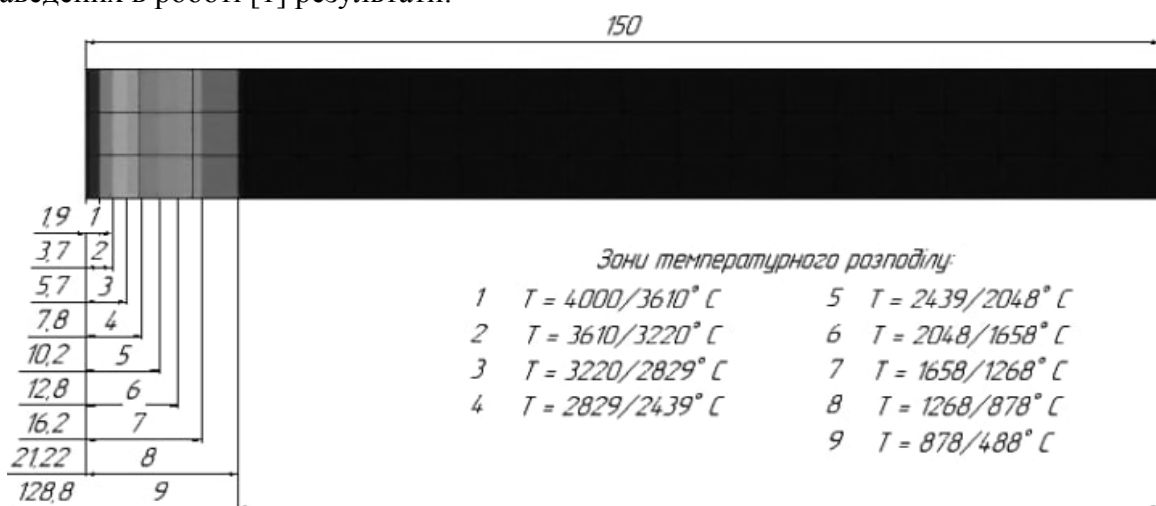


Рисунок 2 – Розподіл температур на графітовій пластині

Після зварювання пластина з обох сторін набула наступний вигляд (рис. 3).

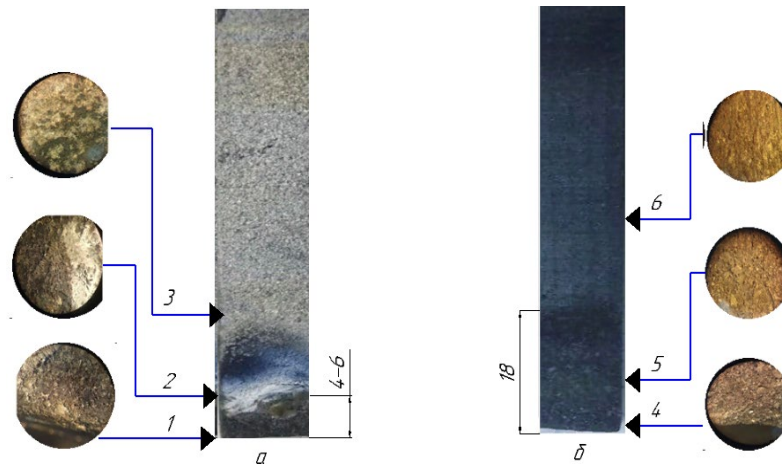


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд графітової пластини після зварювання
а – з боку покриття; б – зі зворотнього боку

В зоні 1 (рис. 3) спостерігається вигорання на ділянці 4-6 мм, в той час як із зворотного боку (зона 4-5) окислення розповсюджується на довжину 18 мм. Зона 2 характеризується наявністю фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ – високотемпературного оксиду алюмінію з температурою переходу – 1400°C . В перехідній зоні 2-3 спостерігається перетворення $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($1200^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$). В зоні 2-3 має місце перехід $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}$. Зона 4 схожа із зоною 1, в зоні 5 спостерігаються більш відкрита пористість порівняно з 6 зоною, в якій температура не досягла критичних значень для графітового електрода.

З'єднання напиленого шару покриття залежить від температури нагріву електрода (рис.4)

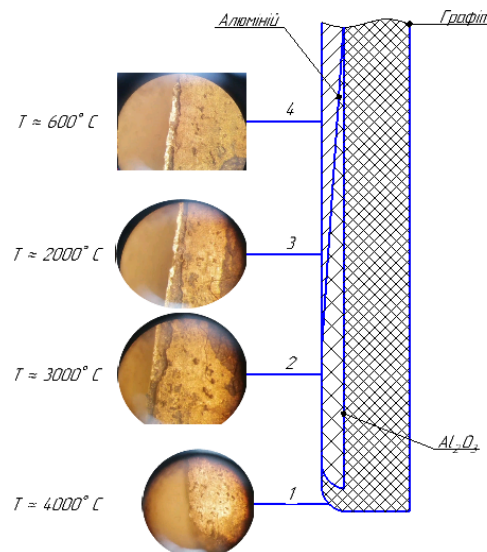


Рисунок 4 – Структура з'єднання покриття-графіт, x50

На самому торці електрода (1) покриття відсутнє, в той час як в зоні 1-2 по мірі віддалення від місця теплового вкладення покриття лишається, але міцність його зчеплення з графітом слабшає (зона 1-2). Дане явище обумовлене різними коефіцієнтами лінійного теплового розширення. Так у графіта та оксида алюмінію вони дорівнюють $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а в чистого алюмінію $22 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, внаслідок чого при нагріванні електрода покриття збільшилося в розмірі і відшарувалося. При структурному переході з алюмінію в Al_2O_3 (зона 3-4 рис. 4), щільність збільшується.

В температурному інтервалі від 2050° до 3500° С спостерігається просочення рідкого розплаву Al_2O_3 в графіт. Кращому просоченню сприяє збільшення середнього радіусу пори та загальної пористості. Відбувається підвищення шорсткості поверхні графіту, що сприяє розтіканню краплі оксиду алюмінію, як по поверхні (1), так і вглиб (2), рис. 5. Так при шорсткості поверхні 8 Rz крайовий кут змочування складає 134°, а при збільшенні цього показника до 13,5 Rz крайовий кут зменшився до 114°.

Завдяки капілярному просочуванню збільшується площа взаємодії розплаву покриття з графітом і міцність зчеплення.

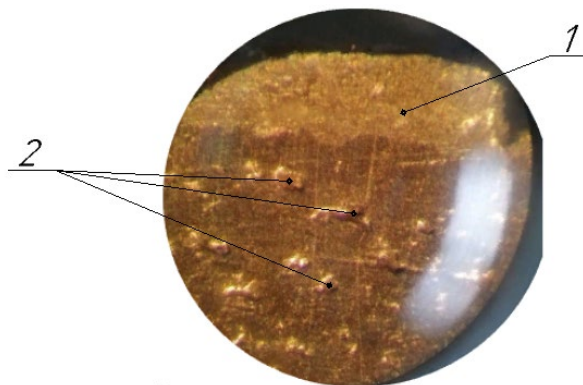


Рисунок 5 - Капілярне просочування графіту при плазмовому напиленні дротом АК-5, x50.

Для нанесення захисного покриття використовувався метод плазмового напилення струмоведучим дротом. Даний спосіб являється оптимальним серед газотермічних способів формування покриттів. До переваг слід віднести більший к.к.д., кращу міцність зчеплення та економічність. Напилення проводилось за наступними параметрами: I_n – 170 А; U_d – 65 В; d_e – 1,2 мм; Q_{Ar} – 30 л/хв; $Q_{повітря}$ – 16,5 м³/год; a – 100 мм, де a – відстань від електроду до напилюваної поверхні; кількість нанесених шарів - 3.

Після нанесення кожного шару виконувалася пошарова зачистка металевою швидко обертовою щіткою поверхні напиленого шару для збільшення когезійної міцності.

Перелік посилань

1. Храпко С. А. Производство стали в ДСП: конспект лекций /С. А. Храпко, Е.Л. Корзун, Ю.В. Костецкий. – Донецкий Национальный Технический Университет – 136 с.
2. Бажин В. Ю. Управление тепловыми и электрохимическими процессами в дуговых печах / В. Ю. Бажин, С. А. Мартынов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 5. – С. 34-37
3. Одейчук А. Н. Моделирование окисления графита в среде кислорода при температурах 400-800о С / А. Н. Одейчук, А. И. Комир // Физика твердого конденсированного тела. – 2015. – Т.12. – №2. – С. 532-542.

УДК 621.792.4

Л. Лопата, к.т.н., доц.; В. Калініченко к.т.н.; І. Качинська
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

КОГЕЗІЙНА І АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ ЯК ПАРАМЕТРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОЇ ОБРОБКИ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

Анотація. Ґрунтуючись на умові когезійно-адгезійної рівномірності запропоновані підходи до оптимізації процесу електроконтактної обробки напилених покриттів, що дозволило визначити параметри процесу, які забезпечують підвищення адгезійної міцності покриттів до 140...180 МПа при товщині покриття від 0,5 мм до 3 мм.

Ключові слова: електроконтактна обробка, напилені покриття, механічні властивості, адгезійна міцність, когезійна міцність.

L. Lopata, Ph.D., Assoc. Prof.; V. Kalinichenko, Ph.D.; I. Kachinskaya

COHESION AND ADHESIVE STRENGTH AS OPTIMIZATION PARAMETERS OF THE ELECTRO-CONTACT PROCESSING OF SPRAYED COATINGS

Abstract. Priming on the basis of cohesive-adhesive uniformity of the proposed approach to optimizing the process of electrocontact processing of sawed coatings, which made it possible to determine the parameters of the process to ensure The adhesive value of coatings is up to 140...180 MPa with a thickness of coating ranging from 0.5 mm to 3 mm.

Keywords: electrical contact treatment, sprayed coatings, mechanical properties, adhesive strength, cohesive strength.

Адгезійна та когезійна міцність - основні характеристики складових частин композиції "основа-покриття". Ці характеристики взаємопов'язані, але на підставі інформації про одну з них неможливо зробити висновки про рівномірність композиції "основа-покриття" в цілому.

Підхід до розробки та проектування покриттів заснований на уявленні про домінуючу роль механічних властивостей в оцінці якості при конструюванні виробів (деталей) та їх експлуатації [1]. Така концепція виходить із положення про взаємозв'язок складу, структури, механічних властивостей матеріалу покриття та технології його створення. Для конкретних умов експлуатації існує оптимальне співвідношення механічних характеристик елементів композиції "основа-покриття".

Серед методів нанесення покриттів найбільше застосування знайшли методи газотермічного напилення [2]. Методи газополуменевого та електродугового напилення більш прості в реалізації, характеризуються технологічною гнучкістю застосування до різних типорозмірів деталей. Разом з тим, при реалізації цих методів покриття мають недостатню міцність зчеплення 30...40 МПа, що суттєво знижує їх функціональні властивості (зносостійкість, корозійну стійкість, інші) та обмежує сферу застосування [3]. Однак, механічні властивості поверхонь деталей з покриттями визначають їх міцність, несучу здатність, довговічність та працездатність.

Недоліки газотермічних покриттів можна усунути їх модифікацією та способами обробки: термічною, хіміко-термічною, лазерною, ультразвуковою, механо-термічною та іншими видами [4]. Поєднання нанесення покриттів з обробкою - перспективні методи інженерії поверхні [2]. Використанням цих методів запобігає виникненню

пошкоджень різного роду, в тому числі й тріщин втоми на поверхні деталей машин, що експлуатуються в складних умовах термосилового навантаження.

Застосування способів обробки покриттів з мінімальним тепловкладенням – завдання першорядної важливості. Їх реалізація передбачає автономне або спільне використання механічних, температурних та хімічних факторів. У зв'язку з цим, значний інтерес становить електроконтактна обробка [5]. Її переваги: мінімальні тепловкладення та термічні дії на поверхню деталі з покриттям; режими обробки забезпечують високу міцність зчеплення, сприяють утворенню залишкових напружень стиску, які підвищують опір втоми.

Основними факторами, що визначають адгезійну та когезійну міцність напиленого покриття, що зміцнюється електроконтактною обробкою є:

- тиск на напилений порошковий шар;
- значення струму та тривалість імпульсів струму [5, 6].

З метою комплексної оцінки впливу параметрів процесу електроконтактною обробки на адгезійну σ_{\max} та когезійну τ_{\max} міцність напилених покриттів проводилися експерименти з використанням методів математичного планування. Залежність адгезійну σ_{\max} та когезійну τ_{\max} покриттів від технологічних параметрів процесу електроконтактною обробки (тиску - x_1 , величини струму x_2 , тривалості імпульсів струму - x_3) представлено рівняннями регресії (1) та (2) відповідно [6]:

$$y_{\tau_{\max}} = 0,0625 \cdot x_2 + 0,0625 \cdot x_1 x_2 - 0,0375 \cdot x_1 x_3 - 0,0375 \cdot x_2 x_3 + 0,125 \cdot x_1 x_2 x_3 \quad (1)$$

$$y_{\sigma_{\max}} = 203 + 0,6 \cdot x_1 + 0,5 \cdot x_2 + 2,5 \cdot x_3 + 50 \cdot x_1 x_2 + 25 \cdot x_1 x_3 - 2,5 \cdot x_2 x_3 + 50 \cdot x_1 x_2 x_3 \quad (2)$$

Аналізуючи рівняння (1) та (2) слід зазначити, що найбільший вплив на адгезійну та когезійну міцність надає взаємодія всіх трьох досліджуваних факторів: тиску, струму та тривалості електроконтактною обробки. При цьому раціональним буде таке співвідношення адгезійної та когезійної міцності, яке задовольняє критерію адгезійно-когезійної рівномірності покриття [7]. Фізичний зміст цього критерію полягає в тому, що покриття має відшаровуватися в момент його когезійного руйнування. З урахуванням залишкового напруження, що виникає в покритті, в процесі його обробки критерій адгезійно-когезійної рівномірності запишеться у вигляді [7]:

$$\tau_{3ч} = (\sigma_{3ч} + \sigma_{3ал}) h k l \quad (3)$$

де $\tau_{3ч}$ – адгезійна міцність покриття (міцність адгезійного зв'язку);

$\sigma_{3ч}$ – когезійна міцність покриття; $\sigma_{3ал}$ – залишкові напруження в покритті;

h – товщина покриття; l – базовий розмір (принятий $l = 10h$);

k – коефіцієнт, який залежить від співвідношення пружних і геометричних параметрів системи "основа-покриття" [7]

$$k^2 = 2 \frac{G_o G_n}{G_o h_n + G_n H_o} \left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o} \right),$$

(4)

де H_o , h_n - напівтовщина основи та покриття; E_o , E_n – модулі пружності основи та покриття; G_o , G_n – модулі зсуву основи та покриття.

Залежність адгезійної міцності покриття від товщини представлена на рисунку [7].

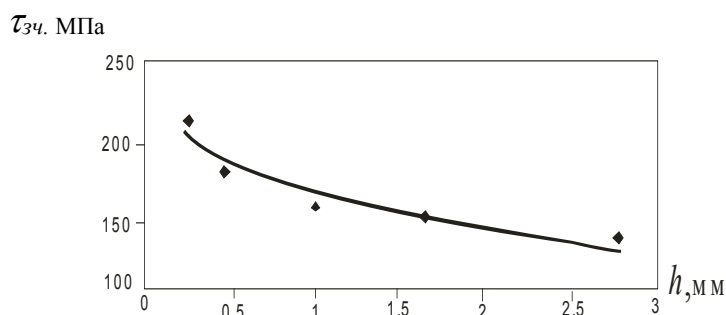


Рис. Залежність міцності адгезійного зв'язку від товщини напиленого покриття з порошкового дроту після електроконтактної обробки

Як очевидно з рисунка, адгезійна міцність, отримана розрахунково-експериментальним шляхом, зі зростанням товщини покриття зменшується. Саме це обмежує можливість застосування покриттів великої товщини. Вибором технологічних параметрів процесу електроконтактної обробки вдалося підвищити адгезійну міцність покриттів, отриманих напиленням, порівняно з адгезійною міцністю покриттів до їх обробки електроконтактним методом, та виконати умову когезійно-адгезійної рівномірності. Ефективне використання технології нанесення покриттів ґрунтується на можливості створення покриттів із заданими властивостями, що забезпечує оптимальне співвідношення механічних характеристик у композиції "основа-покриття."

Перелік посилань

1. Покрyтия и их использование в технике. Прочность материалов и конструкций, под ред. В.Т. Трошенко. Київ, Академперіодика. 2006. С. 981-1074.
2. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.Н. Інженерія поверхні. Київ, Наукова думка. 2007. 559 с.
3. Пащенко В.М., Кузнецов В.Д., Солодкий С.П. Проблеми ефективності захисних покриттів у інженерії поверхні машин і обладнання. Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». 2006. №49. С. 178-187.
4. О.В. Лопата, І.В. Смирнов Значимість методів обробки деталей машин з газотермічними покриттями в забезпеченні їх функціональних властивостей, Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем. Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems: матеріали V – її Міжнародної науково-практичної конференції (19-21 квітня 2023, ЦНТУ, Кропивницький). Кропивницький, ЦНТУ. 2023. С. 145 – 147. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/programa_konf_pnmo-2023_1.pdf.
5. Smirnov, A. Lopata, T. Smirnova, L. Lopata Improvement of functional properties of gas-thermal coatings by electrocontact treatment Problems of Tribology. 2020. Vol. 25. No.1/95. 41-48I. ISSN: 2079-1372. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-41-48>.
6. И.В. Смирнов, А.В. Лопата Влияние технологических параметров электроконтактной обработки на формирование напыленного порошкового слоя. Modern questions production and repair in industry and in transport: materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar (March 23–29 2020, Tbilisi, Georgia). Kyev: 2020. С. 177-180 <https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-20-1.pdf>
7. Л. А. Лопата. Адгезионная прочность и остаточные напряжения при электроконтактном припекании порошковых покрытий Проблеми міцності. №4. 2010. С. 71-77. ISSN 0556-171X.

УДК 621.326

Володимир Медвідь, к.т.н., доц.; Андрій Ремез; Микола Пошивак; Петро Микулик
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ТА ТОЧНОСТІ ОФСЕТНИХ АНТЕН В РАДІОКОМУНІКАЦІЯХ

Анотація. Результатом роботи є дослідження та аналіз оболонки антенної решітки утвореної методом електродугового напилення, та нанесення композиційного матеріалу. Графічно представлена оцінка жорсткісно – міцнісних характеристик антен суцільної та армованої конструкції проведений розрахунок їх напружено - деформованого стану при дії вітрового навантаження та сили земного тяжіння.

Ключові слова: електродугове напилення, армований композиційний матеріал, пуансон, дзеркало, офсетна антена

Volodymyr Medvid, Ph.D., Assoc. Prof.; Andrii Remez, Mykola Poshyvak, Petro Mykulyk

ANALYSIS OF STABILITY AND ACCURACY OF OFFSET ANTENNAS IN RADIO COMMUNICATIONS

Abstract. The result of the work is the research and analysis of the shell of the antenna array formed by the method of electric arc spraying, and the application of the composite material. The evaluation of the stiffness and strength characteristics of solid and reinforced antennas is graphically presented, as well as the calculation of their stressed and deformed state under the action of wind load and gravity

Keywords: Electric arc spraying, reinforced composite material, punch, mirror, offset antenna

У роботі розглянуто метод електродугового напилення виробництва антенних систем, та виготовлення відбиваючих поверхонь, що базується на нових технологічних і конструкторських ідеях. Досліджено процес утворення оболонок з сітчастого матеріалу. Складність опису процесу деформування полягає в тому, що сітка веде себе при деформуванні якісно інакше, ніж лист суцільного матеріалу. Це пояснюється її структурою, зокрема, можливістю повороту взаємно перпендикулярних дротинок сітки одна відносно іншої у вузлах. Виготовленням, виробництвом та проектуванням займалися науковці, як України так і закордонні автори, що знайшли відображення у працях [1, 2]. В Україні виробництвом займалися підприємства "Сатурн" і "Промінь". А також відомі закордонні фірми "Siemens", "Andrew".

Представлені дослідження розглядають офсетні антени з метою розкриття їх потенціалу та вдосконалення їхнього застосування у сучасних радіотехнічних системах.

В умовах постійного технологічного розвитку та зростаючої потреби у зв'язку, офсетні антени виходять на передній план як ефективне та інноваційне рішення.

Завдяки інтенсивним дослідженням та розробкам, офсетні антени в останні роки здобули значне визнання у світі радіотехніки. Їхню ефективність та унікальні характеристики ретельно розглянуто та досліджено, що відкриває широкі перспективи в їхньому практичному застосуванні для покращення систем зв'язку та забезпечення стійкості сигналу у різноманітних умовах. Офсетні антени, що виникли як відповідь на вимоги швидкозмінюваних радіокомунікаційних середовищ, відіграють ключову роль у сучасних системах передачі даних. Вони володіють високим рівнем направленості сигналу та забезпечують стабільний зв'язок навіть у складних метеоумовах та електромагнітних перешкодах. Підтверджені результати експериментів та практичного застосування свідчать про високу надійність та стабільність роботи офсетних антен

навіть у критичних умовах, що робить їх перспективними для використання в різноманітних сферах, від телекомунікацій та супутникового зв'язку до військового обладнання та наукових досліджень.



Рис. 1- Офсетна антена

Основні принципи функціонування офсетних антен засновані на техніці фокусування. Сигнал від супутника спрямовується на відбивний елемент, а потім відбивається в напрямку підпірної структури, де розміщується концентратор антени (зазвичай лінза або головка конуса), який збирає сигнал і передає його далі до приймача або конвертера для обробки.

Офсетні антени мають декілька переваг, таких як менша вразливість до втрат сигналу від мікрохвильових перешкод, краща захищеність від погодних умов, а також можливість розташування приймача в центрі антени, що полегшує установку та обслуговування.

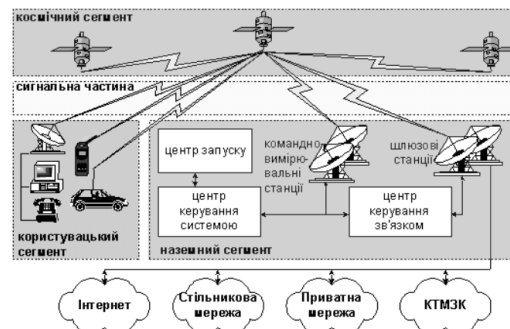


Рис. 2 - Принципи зв'язку та використання антенних систем

Під час дослідження динамічної стійкості дзеркала антени у формі сферичного сегмента, яке скріплене з кільцем, розглядається конструкція з урахуванням різних факторів та параметрів. Для узгодження рішень, розглядають концепцію циліндричної оболонки, яка приєднана до кільця як пружна основа. Це дозволяє врахувати конструктивні особливості, такі як захист від зовнішніх впливів.

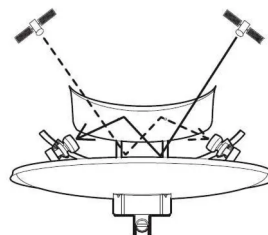


Рис. 3- Тороїдальна супутникова двозеркальна антена

У даному дослідженні ми звертаємо увагу на ефективне використання технології електродугового напилення для створення армованого матеріалу. Цей метод, що дозволяє наносити тонкі шари матеріалу на різноманітні поверхні, має великий потенціал у різних галузях, від промисловості до будівництва та телекомунікацій. Використання електродугового напилення відкриває можливості для поліпшення міцності, захисту від корозії та інших негативних впливів на матеріали, що зазнають високі навантаження, включаючи вітрові. У нашому дослідженні ми досліджуємо конкретний вплив електродугового напилення на армований матеріал в умовах вітрових навантажень та розглядаємо можливості його використання для створення стійких та надійних конструкцій.

Основні етапи виготовлення електродуговим напиленням – це підготовка поверхні, підготовка матеріалу, електрична дуга, напилення, охолодження та закріплення. Поверхня, на яку буде нанесено покриття, повинна бути ретельно підготовлена: очищена від бруду, масла, ржавчини та інших забруднень, може знадобитися шліфування або інші операції для поліпшення адгезії покриття до поверхні. Матеріал, який буде наноситися, зазвичай подається у вигляді дроту або порошку. Він розплавляється в електричній дузі до дуже високої температури. Дуга генерує дуже високу температуру, яка розплавляє матеріал і перетворює його у рідку стружку. Розплавлений матеріал розпилюється на підготовлену поверхню за допомогою струменя газу (зазвичай аргон або повітря). При контакті з поверхнею він швидко застигає і утворює тонке покриття. Після нанесення покриття на поверхні відбувається процес охолодження, під час якого матеріал закріплюється на поверхні. Зазвичай для досягнення максимальної міцності покриття використовуються додаткові процеси, такі як термічна обробка або обробка ультразвуком.

Вітрові навантаження можуть впливати на армований матеріал, отриманий електродуговим напиленням, особливо у випадку конструкцій, які використовуються в умовах відкритого простору, наприклад, на відкритому повітрі або на висоті. Такі конструкції можуть включати в себе мачти, антени, вежі, та інші елементи, які використовуються в телекомунікаційних системах, електропередачі, або в будівництві споруд.

Вітрові навантаження можуть створювати сили, що призводять до деформацій або руйнувань на конструкціях. Армований матеріал, нанесений електродуговим напиленням, може виступати як захисний шар, що допомагає зменшити вплив вітрових навантажень на базовий матеріал конструкції. При розрахунках потрібно враховувати можливі помилки виготовлення та монтажу, такі як неправильне розташування компонентів антени або невідповідність параметрів матеріалів.

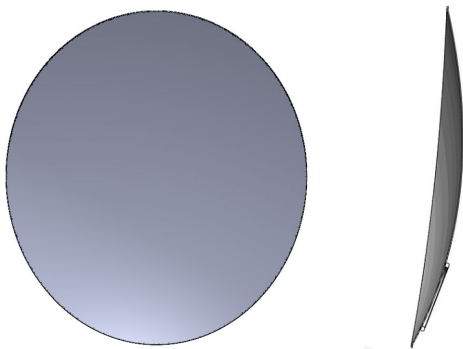


Рис. 4 - Антена офсетна алюмінієва товщиною 2 мм (вигляд спереду та вигляд збоку у розрізі)

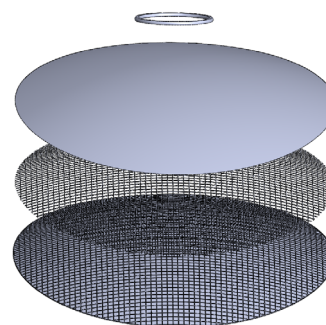


Рис. 5 - Антена офсетна композитна товщиною 2 мм (загальний вигляд конструкції антени)

Офсетна антена може мати відхилення від ідеальної антени через фокусування сигналу на відхідний елемент. Це може потребувати складних обчислень та моделювання для визначення точних характеристик антени.

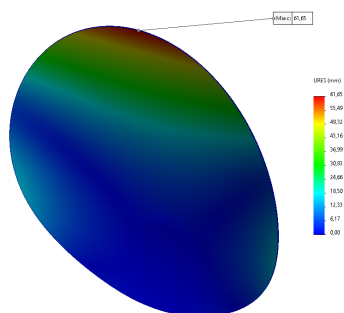


Рис. 6- Епюра переміщень

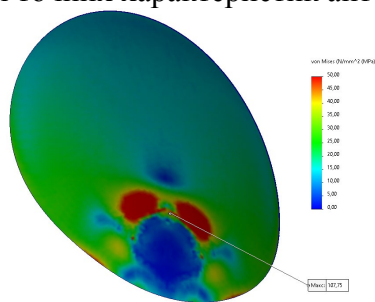


Рис. 7-Епюра напружень

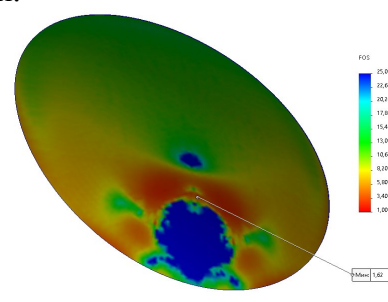


Рис. 8- Епюра коефіцієнту запасу міцності

Під час цього дослідження було доведено, що виготовлення офсетних антен електродуговим напиленням та нанесенням пластику двошаровим методом не поступається за жорсткістю і стійкістю порівняно з іншими методами виробництва. Електродугове напилення дозволяє забезпечити високу якість покриття, яка відповідає вимогам для ефективної роботи антен у різних умовах експлуатації. За результатами аналізу напружено – деформованого стану двох варіантів конструкції офсетної антени встановлено: коефіцієнт запасу міцності для офсетної антени пропонованої конструкції у 5,7 разів менший, ніж у антени базової конструкції, але більший ніж мінімально допустимий коефіцієнт запасу 1,5 для таких конструкцій; нормальні напруження у для офсетної антени пропонованої конструкції у 4,5 рази більші, ніж у антени базової конструкції і становлять ≈ 108 МПа; максимальні переміщення верхньої кромки офсетної антени пропонованої конструкції у 20 разів більші, ніж у антени базової конструкції і становлять ≈ 62 мм, що повністю унеможливорює нормальну роботу антени за розглядуваних умов (швидкості вітру 20 м/с). Отже, ці результати свідчать про перспективність використання електродугового напилення та нанесення пластику двошаровим методом у виробництві офсетних антен і підтверджують його як ефективний і конкурентоспроможний процес.

Перелік посилань

1. Николаєнко Б.А., Пелешок С.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч. посібник. К.: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 146 с.
2. Срібна І.М., С.І. Махонін, Власенко Г.М., Кирпач Л.А. Супутникові системи зв'язку і навігації. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, 2019. –123 с.
3. М. В. Андреев, О. О. Дробахін, В. І. Магро, В. М. Морозов, Д. Ю. Салтиков АНТЕНИ НВЧ. ПОСІБНИК ДО ВИВЧЕННЯ КУРСУ "АНТЕННО-ФІДЕРНІ ПРИСТРОЇ" 2008.
4. Заїкін І.П., Тоцький О.В. Антени та пристрої НВЧ: Навч. Посібник до курсового проектування. – В 4 ч. – Х.: ХАІ, 1994. – Ч.2.
5. Маркович С.І. Дослідження зв'язку зносостійкості з фізико-механічними властивостями покриттів, нанесених електродуговим напиленням різнорідних дротів // Проблеми тертя та зношування. – Київ, 2007. - №46. С. 16-18.

УДК 621.793.7

Ігор Смирнов¹, д.т.н., проф.; Андрій Чорний¹, к.т.н., доц.; Ігор Селіверстов², к.т.н., доц.; Володимир Лисак¹, Ph.D.; Тимофій Сопленко¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

²Херсонський національний технічний університет, Україна

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В ПЛАЗМОВИХ УЩІЛЬНЮЮЧИХ ПОКРИТТЯХ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Анотація. Розглянуті особливості структури та властивостей ущільнюючих покриттів для авіаційних двигунів. Визначено величину залишкових напружень в плазмовому покритті з порошку нікелевого сплаву при різних способах закріплення основи (пластини з титану). Характер визначених залишкових напружень відповідає напруженням розтягу.

Ключові слова: ущільнюючі покриття, залишкові напруження, плазмове напилення.

Igor Smirnov, Ph.D., Prof.; Andrii Chorny, Ph.D., Assoc. Prof.; Ihor Seliwerstov, Ph.D., Assoc. Prof.; Volodymyr Lysak, Ph.D.; Tymofii Soplenko

RESIDUAL STRESSES OF PLASMA SEALING COATINGS FOR AIRCRAFT ENGINES

Abstract. The peculiarities of the structure and properties of sealing coatings for aircraft engines are considered. The magnitude of the residual stresses in the plasma coating of nickel alloy powder with different methods of fixing the base (titanium plates) was determined. The nature of the residual stresses indicates tensile stress.

Keywords: sealing coating, residual stresses, plasma spaying.

Підвищення надійності та ефективності роботи авіаційних двигунів є завжди актуальним і важливим завданням в сучасному авіабудуванні. У пріоритетній тематиці Міністерства освіти і науки України, особлива увага приділяється технологіям відновлення (ремонт) авіаційної техніки державної авіації: їх вузлів, агрегатів, деталей, комплектуючих.

Одним з елементів авіаційного двигуна, що потребує відновлення та вдосконалення є ущільнюючі покриття, які припрацьовуються під час роботи, в залежності від умов експлуатації. Ущільнюючі покриття проточної частини газотурбінних двигунів в більшості мають композиційну структуру, яка складається з підшару і поверхневого шару, що припрацьовується. На даний час існує багато композицій ущільнюючих покриттів, які застосовується як при виготовленні так і під час ремонту авіаційних двигунів. Найбільш працездатні двошарові покриття, де поверхневий шар як привило складається з жароміцної матриці і наповнювача, який виконує роль твердого мастила. Для захисту металеві основи від високотемпературної корозії та окислення, а також для зниження різниці коефіцієнтів термічного розширення між основою та ущільнюючим шаром застосовують металевий підшар зі

сплаву типу $MeCrAlY$ розроблений швейцарською відомою Sulzer Metco [1]. В окремому випадку можуть бути застосовані сплави на основі нікелю типу ВКНА, який відповідає нікелевому порошку ПН75Ю23В.

Для нанесення таких покриттів застосовують різноманітні методи газотермічного напилення, при цьому перевага гадається атмосферному плазмовому напиленню (APS) та високошвидкісному газополуменовому напиленню (HVOF).

В наслідок термічному розширення та стиску під час роботи авіаційного двигуна, міцність матеріалу покриття не повинна знижуватися в результаті виникнення залишкових напружень та утворення тріщин, а під впливом високотемпературного газового потоку повинна забезпечити ерозійну стійкість покриття.

В зв'язку з цим одним з важливих завдань є дослідження в покриттях залишкових напружень, які суттєво впливають на фізико-механічні властивості системи основа-покриття і являються однією з причин руйнування покриттів.

Мета роботи полягала в визначенні залишкових напружень в матеріалі покриття, який застосовується як підшар в ущільнюючих покриттях для авіаційних двигунів.

Матеріалом для напилення підшару був обраний порошок зі сплаву на основі нікелю марки ВКНА. Даний порошок має високу зносостійкість при температурах 1100-1200°C, жаростійкість, стійкість до механічних пошкоджень і досить широко застосовується на ремонтних підприємствах авіаційних двигунів. Матеріалом основи був титан марки ВТ1-00.

Напилення порошку здійснювали з застосуванням ламінарного плазмотрону, розробленого та виготовленого на кафедрі зварювального виробництва, навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона. Основні технологічні режими напилення наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Струм дуги, А	Напруга, В	Витрати порошку, кг/год	Загальні витрати газу (аргон), л/хв	Дистанція напилення, мм
80-90	30-35	3-4	5-6	100-150

Визначення величини залишкових напружень здійснювали за кривизною пластини (основи), на яку напилювали покриття. Пластину виготовляли розміром 76x10 мм² з листа титану товщиною 0,2 мм.

Під час напилення застосовувались два варіанти закріплення пластини. По першому варіанту пластини була жорстко закріплена з одного боку, по другому – пластину закріплювали з двох боків, причому з одного боку кріплення було не жорстким для компенсації температурних поздовжніх деформацій.

В результаті під впливом залишкових напружень, що виникають в покритті, пластини деформується у вигляді дуги, по радіусу кривизни якої визначали величину залишкових напружень в покритті за формулою:

$$\sigma = \left(\frac{h_o^3 E_o + h_p^3 E_p}{6R h_o (h_o + h_p)} + \frac{E_o (h_o^3 E_o + h_p^3 E_p)}{12R^2 (h_o E_o + h_p E_p)} + \frac{E_o E_p h_p (h_o + h_p)}{2R (h_o E_o + h_p E_p)} \right) \frac{1}{1-\nu^2} \quad (1)$$

де E_p , E_o – модуль поздовжньої пружності покриття і основи; h_p , h_o – товщина покриття і основи; R – радіус кривизни пластинки з покриттям; ν – коефіцієнт Пуассона (в даному випадку коефіцієнт Пуассона для основи і покриття приймається однаковим 0,3).

Радіус кривизни розраховували за довжиною хорди c і висоті сегмента l (величина прогину пластини) за формулою:

$$R = \frac{l}{2} + \frac{c^2}{8l} \quad (2)$$

Результати розрахунків залишкових напружень в покриттях товщиною $0,2 \pm 0,05$ мм наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Варіант	Висота прогину пластини, мм	Довжина хорди, мм	Радіус кривизни, мм	Залишкові напруження, МПа
I	9,3	73	78,5	175
I	1,7	76	411,1	34

Аналіз отриманих результатів свідчить, що величина залишкових напружень в покритті суттєво залежить від способу кріплення основи (пластини). В результаті кріплення пластини з одного боку за першим варіантом, величина залишкових напружень в покритті складає 175 МПа, що приблизно у п'ять разів перевищує значення залишкових напружень при кріпленні пластини за другим варіантом з двох боків. В даному випадку це може бути пояснено релаксацією залишкових напружень в системі основа-покриття при жорсткому закріпленні основи.

Визначені залишкові напруження мають позитивні значення, що відповідає напруженням розтягу. В цілому, напруження розтягу негативно впливають на фізико-механічні характеристики покриття і можуть викликати його розтріскування або відшаровування. Компенсувати такий негативний вплив можливо шляхом додаткової термічної обробки або нанесенням другого робочого шару покриття. Як згадувалось вище робочим шаром може бути композиційне керамічне покриття з різними наповнювачами. Підбором складу такого покриття можна досягнути залишкових напружень стискування і таким чином урівноважити внутрішні напруження в об'ємі всього покриття.

Перелік посилань

1. Wilson, S. (2011) Overview of Sulzer Metco Compressor and Turbine Abradable Technology. 8th International Charles Parsons Turbine Conference, University of Portsmouth, Portsmouth, UK. URL: <https://dokumen.tips/documents/overview-of-sulzer-metco-compressor-and-turbine-abradable-0940-s-of-sulzer-metco.html> [дата звернення 07.05.2024]

УДК 621.792.4

Олександр Трапезон, д.т.н., п.н.с.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ВТОМНОЇ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ЗМІЦНЮЮЧИМИ ПОКРИТТЯМИ

Анотація. Запропоновано комплексний підхід для прогнозування втомної міцності матеріалів з покриттями. Розрахункове співвідношення, що пропонується, враховує товщину покриття, його структурну неоднорідність та наявність залишкових напружень.

Ключові слова: товщина покриття, структурна неоднорідність, міцність, залишкові напруження.

Alexandr Trapezon, Ph.D.

PREDICTION OF FATIGUE STRENGTH OF MATERIALS WITH HARDENING COATINGS

Abstract. An integrated approach for predicting the fatigue strength of coated materials is proposed. The proposed calculation relationship takes into account the thickness of the coating, its structural heterogeneity, and the presence of residual stresses.

Keywords: coating thickness, structural heterogeneity, strength, residual stresses.

Перспективним методом поверхневого зміцнення деталей машин є метод зміцнення на основі тонко-плівкових вакуум-плазмових покриттів. З аналізу літературних джерел покриття такого типу забезпечують незмінну повторюваність ефекту зміцнення за умови знакозмінного навантаження, що у свою чергу дозволяє отримати підвищення втомної міцності сталей, титанових сплавів, та інших металів [1]. На практиці, проблема вибору способу зміцнення пов'язана з технологічними особливостями нанесення покриттів і досить часто розв'язується на основі методу спроб, внаслідок відсутності надійної теоретичної бази. Найпростіший підхід для прогнозування характеристик міцності побудований на основі співвідношення адитивності

$$\sigma = \sigma_o - V(\sigma_o - \sigma_n), \quad (1)$$

де σ , σ_o , σ_n – напруження відповідно в композиції (системі основа-покриття), основі та покритті при фіксованих деформаціях; V – об'ємний вміст покриття. Модель (1) проте, не враховує структурних особливостей покриття, але дозволяє зробити певні корисні висновки. Так, з (1) випливає, що $\sigma > \sigma_o$, якщо $\sigma_n > \sigma_o$. Тобто, можна спрогнозувати, що зміцнення системи основа-покриття можливе у випадку значень міцності покриття, які є більшими за значення міцності основи. Виходячи з цього, можна поставити за мету отримання високоміцних тонко-плівкових елементів як аналога покриттів. Високі значення міцності плівок досягаються, зокрема, шляхом диспергування їх структури, що для експериментальних даних, отриманих при вивченні властивостей полікристалічних плівок може бути представлено через емпіричне співвідношення типу Холла-Петча, яке є справедливим у вузькому інтервалі товщин:

$$\sigma_s = \sigma^* + kh^{-n}, \quad (2)$$

де h – товщина плівки; $n=0,5$; σ^* – граничне напруження; σ^* , k – параметри даного матеріалу. Внаслідок невизначеного фізичного змісту параметрів σ^* та k співвідношення (2) не є зручним для практики і може бути використано лише в окремих теоретичних дослідженнях. Внаслідок того, що вирази (1) та (2) спрямовані

вресітї-ресіт на розв'язання єдиної проблеми – прогнозування міцності при наявності покриття, то виникає питання щодо можливості їх синтезу. Але у зв'язку з тим, що ці співвідношення не мають між собою чіткого логічного зв'язку, то безпосереднє їх об'єднання строго не є можливим. Розв'язання цієї задачі пропонується шукати через аналітичний розв'язок співвідношення (1) за рахунок введення додаткових параметрів, які відображають вплив реальних факторів обумовлених наявністю покриття. В пропозиції розглянуто випадок циклічного вигину композиції і співвідношення адитивності може бути використано у випадку осьового розтягу-стиснення композиції. При циклічному вигині (1) виконується тоді, коли композит є багатошаровим і розподіл шарів по його товщині є рівномірним. При вигині потрібно мати інше співвідношення для тонко-плівкових покриттів, яке було отримано в роботі [2]

$$\sigma_{-1} = (\sigma_{-1})_o \frac{1 + \eta C}{1 + \eta}, \quad (3)$$

де σ_{-1} , $(\sigma_{-1})_o$ – межі витривалості композиту (матеріалу з двостороннім покриттям) та основи; $\eta = 6h/H$; $C = \sigma_n / (\sigma_{-1})_o$; h, H – товщини покриття та основи, причому $h \ll H$; σ_n – напруження в покритті, у випадку, коли на поверхні основи напруження досягають значень межі витривалості $(\sigma_{-1})_o$. Співвідношення (3) побудовано за умови, що втомне руйнування основи у перехідній зоні виникає раніше за руйнування покриття. Іншими словами, наведена залежність (3) призначена насамперед для зміцнюючих покриттів. Оскільки модель (3) не враховує структурних особливостей покриття та міжфазного шару, які залежать від технологічних параметрів та умов нанесення покриття, то коефіцієнт C слід вважати невизначеним. Таким чином, для коректного застосування виразу (3) необхідно провести уточнення цього коефіцієнту як параметра, що неявно відображає структуру покриття. Можна допустити, що коефіцієнт C відіграє таку саму роль, як і параметри σ^{\square}, k з виразу (2). Іншим суттєвими фактором, який впливає на втомну міцність композиції основа-покриття, є наявність технологічних залишкових напружень $\sigma_{зал}$, які виникають в основному матеріалі та покритті після його нанесення. Аналітичне врахування $\sigma_{зал}$ при оцінці циклічної міцності розрахунковим способом потрібне як чинник підвищеної достовірності такої оцінки. Врахування $\sigma_{зал}$ можливе на основі однієї з гіпотез про вплив статичних (середніх) напружень на межу витривалості. Відповідно до гіпотези Гудмена, як однієї з найбільш підтверджених експериментально можна записати: $\sigma_a = \sigma_{-1} (1 - \sigma_{ст} / \sigma_c)$, де σ_a – граничне напруження, яке відповідає межі витривалості при додатковій дії статичного напруження $\sigma_{ст}$; σ_{-1} – межа витривалості матеріалу за умови відсутності $\sigma_{ст}$, тобто при гармонійному симетричному навантаженні; σ_c – межа міцності. Як приклад розглянуто балку з двостороннім покриттям, яке нанесено методом осадження при підвищених температурах. Для цього випадку можна записати вираз визначення граничного напруження, що відповідає межі витривалості для випадку $\alpha_o > \alpha_n$

$$\sigma_a = \sigma_{-1} + ((3\gamma_n - \gamma_o) \cdot (\Delta E_o) \cdot (C\eta)) / ((1 + \eta) \cdot (3 + C\eta)),$$

де $\gamma_o = ((\sigma_{-1})_o) / (\sigma_{в})_o$; $\gamma_n = ((\sigma_{-1})_n) / (\sigma_{в})_n$; $(\sigma_{в})_o, (\sigma_{в})_n$ – межі міцності основи та покриття; $\Delta = (\alpha_o - \alpha_n)(t - t_1)$; α_o, α_n – коефіцієнти температурного розширення основи та покриття; t – робоча температура формування покриття; t_1 – температура завершення процесу (кімнатна); E_o – модуль Юнга основи. Співставлення результатів розрахунку з експериментальними даними втомної міцності при циклічному згинанні дає розходження в (0,5-2)%, що є підтвердженням практичної дієздатності зазначеного підходу.

1. Trapezon, A., Lyashenko, B. (2016). Fatigue of VT1-0 titanium alloy with vacuum-plasma coating under a plane stress state. *Strength Mater.*, 48, 270–278. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9762-3>

2. Trapezon, A., (2007). Methodological problems in the investigation of thin hardening films. *Strength Mater.*, 39, 178–188. <https://doi.org/10.1007/s11223-007-0023-3>

УДК 621.792.4

Сергій Щетинін, д.т.н., проф.; Віра Щетиніна, д.т.н., проф.
Приазовський державний технічний університет, Україна

МЕХАНІЗМ ВИНИКНЕННЯ ТРІЩИН ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ

Serhii Shchetynin, Ph.D., Prof.; Vira Shchetynina, Ph.D., Prof.

THE MECHANISM OF THE OCCURRENCE OF CRACKS DURING ELECTRIC ARC WELDING

Abstract. Electric arc welding of high-carbon steels and cast iron, from which the working and support rolls of sheet rolling mills are made, is limited by the occurrence of cracks. The energy of the arc is transferred to the main metal, in which, under the action of the thermal deformation cycle, microdistortions of the crystal lattice, microstresses and density of dislocations occur. Therefore, increasing crack resistance and wear resistance is an important scientific and technical problem.

Keywords: electric arc welding, microdistortions of the crystal lattice thermal deformation cycle

Електродугове наплавлення високовуглецевих сталей та чавуну, з яких виготовляються робочі та опорні валки листопрокатних станів, обмежено виникненням тріщин. Тому, підвищення тріщиностійкості та зносотійкості є важливою науково-технічною проблемою.

При електродуговому наплавленні, енергія дуги передається основному металу, в якому, під дією термодформаційного циклу (рис.1), виникають мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги та щільність дислокацій. Термодформаційний цикл виміряли за допомогою тензометру, в якості якого використовували електронний мікрометр, що працює на основі механотрону 6MX1C.

Тензометром, на базі 0,01 м, вимірювали деформації, що спостерігаються, ϵ_n і термічний цикл нагрівання точки, розташованої між охолоджуваними ніжками тензометра, який визначає вільні деформації $\epsilon_{зв}$. Деформації в процесі наплавлення та термічний цикл фіксували за допомогою осцилографа. Власні деформації основного металу $\epsilon_{зв}$, на відстані $5 \cdot 10^{-3}$ м від зони сплавлення, визначали диференціальним способом:

$$\epsilon_i = \epsilon_{упр} + \epsilon_{пл} = \epsilon_n - \epsilon_{зв}, \% \quad (1)$$

Наплавлення проводили на ребро пластини $(30 \times 125 \times 400) \cdot 10^{-3}$ м складовим електродом. Спостерігаючи деформації фіксували в напрямку наплавлення. В результаті вимірювання термодформаційних циклів (рис.1) встановлено, що в процесі наплавлення, спочатку, при наближенні дуги, відбувається стиск під дією металу, що розширюється. Потім, коли дуга розташовується в площині вимірювання термодформаційного циклу, відбувається розширення металу на базі і розтяг. У міру видалення дуги та охолодження, відбувається стиск основного металу.

Як при нагріванні, так і при охолодженні криві ϵ_i та $\epsilon_{зв}$ значно відрізняються за величиною миттєвих значень, що призводить до розвитку власних деформацій та мікронапруг у наплавленому металі, які визначаються мікроспотвореннями кристалічної решітки:

$$\sigma = E \frac{\Delta a}{a}, \text{ МПа} \quad (2)$$

де E – модуль пружності, $19,68 \cdot 10^4$, МПа;

$\frac{\Delta a}{a}$ – мікроспотворення кристалічної решітки.

Мікроспотворення кристалічної решітки визначали при п'ятишаровому наплавленні на пластини, розміром $(30 \times 300 \times 400) \cdot 10^{-3}$ м, дротом діаметром $4 \cdot 10^{-3}$ м, стрічкою розміром $(0,5 \times 45) \cdot 10^{-3}$ м, розташованою в подовжньому та перпендикулярному напрямках і складовим електродом. Наплавлення проводили під керамічним флюсом ЖСН-5 на характерних для кожного способу оптимальних

режимах: дротяним електродом – при струмі $I=650-750$ А, напруги на дузі $U=31-33$ В і швидкості наплавлення $V_H=(0,56, 0,83$ і $1,1)\cdot 10^{-2}$ м/с, поздовжньою стрічкою та перпендикулярною стрічкою – $I = 450-550$ А, $U = 29 -31$ В, $V_H= (0,33, 0,5$ і $0,67)\cdot 10^{-2}$ м/с, складовим електродом – $I = 1950-2050$ А, $U = 29-31$ В, $V_H = (1,4, 2,1, 2,8)\cdot 10^{-2}$ м/с. Погонна енергія для кожного способу наплавлення змінювалась в межах $q_{II}/V = 1,8; 2,7$ і $3,6$ МДж/м.

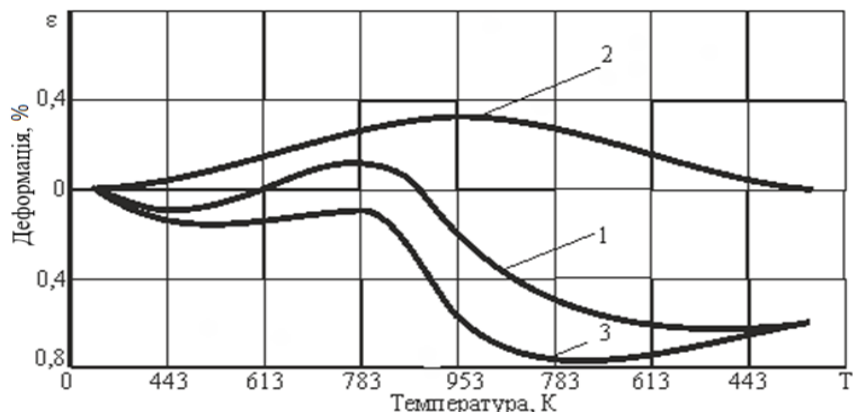


Рисунок 1 – Термодформаційний цикл зони термічного впливу за напрямком наплавлення на відстані $5 \cdot 10^{-3}$ м від зони сплавлення:

- де 1 – спостережувані деформації;
 2 – вільні деформації;
 3 – власні деформації, $q_{II}/V = 3,6$ МДж/м

Для підвищення тріщиностійкості наплавленого металу, проведено дослідження впливу форми електроду та погонної енергії на структурні та фазові перетворення, шляхом вимірювання мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг і щільності дислокацій та мікроструктури. Дослідження величини мікроспотворень кристалічної решітки проводили методом рентгеноструктурного аналізу на рентгенівському дифрактометрі.

При електродуговому наплавленні, під дією теплового збудження і кінетичної енергії плазмових потоків, в наплавленому металі виникають вакансії, оскільки енергія активації виникнення вакансій менша за енергію утворення міжвузельних атомів. У зоні виникнення вакансій порушується статична рівновага міжатомної взаємодії, що призводить до усунення сусідніх атомів з їх рівноважних положень та мікроспотворень кристалічної решітки.

На основі проведеного рентгеноструктурного аналізу встановлено, що, з підвищенням погонної енергії, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій та зварювальні напруги збільшуються, мікроструктура стає крупнозернистою, що призводить до утворення тріщин.

Мікронапруги призводять до інтенсивного виникнення і зростання тріщин, механізм зародження яких пов'язують з дислокаціями. Вивчення впливу форми електроду та погонної енергії на щільність дислокацій проводили за поширенням рентгенівських ліній. Отримані данні щільності дислокацій співпадають з результатами рентгеноструктурного аналізу впливу енергії на фазові та структурні перетворення. Дислокації – недосконалість кристалічної решітки. На основі рентгеноструктурного аналізу, квантової теорії магнітного поля і досліджень мікроструктури, встановлено механізм виникнення тріщин при електродуговому наплавленні високовуглецевих сталей та чавуну. Природа виникнення тріщин електромагнітна. Тріщини виникають, коли енергія стає більше міжатомних зв'язків.

Для підвищення тріщиностійкості необхідно зменшувати енергію, тепловкладення, мікроспотворення кристалічної решітки, щільність дислокацій, зварювальні напруги, здрібнювати мікроструктуру, що скорочує міжатомну відстань і збільшує міжатомні зв'язки, тріщиностійкість та зносостійкість деталей металургійного обладнання.

Секція: МЕХАТРОНІКА, РОБОТОТЕХНІКА, ДРОНИ

УДК 519: 818

Валерій Кирилович¹, д.т.н., проф.; Роман Шубенко¹; Любомир Дімітров², д.т.н., проф.; Микола Кирилович¹

¹ Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

² Технічний університет-Соф'я, Республіка Болгарія

НЕЧІТКИЙ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР АЛЬТЕРНАТИВ: АВТОМАТИЗОВАНА РЕАЛІЗАЦІЯ СЕРЕДИННОГО ВИПАДКУ

Анотація. Реалізація серединного випадку базується на використанні чотирьох серединних параметрів для кожного локального критерію вибору. Вони враховуються в обчислювальних процедурах процесу нечіткого багатокритеріального вибору альтернатив. Працездатність даного підходу проілюстрована на прикладі нечіткого вибору роботизованих механоскладальних технологій (РМСТ) роботою розробленого оригінального програмного продукту FMCSA.

Ключові слова: нечітка оптимізація, вибір, альтернатива, серединний випадок.

Valerii Kyrylovych, Ph.D., Prof.; Roman Shubenko; Lubomyr Dimitrov, Ph.D., Prof.; Mykola Kyrylovych

FUZZY MULTI-CRITERIA SELECTION OF ALTERNATIVES: AUTOMATED IMPLEMENTATION OF THE MIDDLE CASE

Annotation. The implementation of the median case is based on the use of four median parameters for each local selection criterion. They are taken into account in the computational procedures of the process of fuzzy multi-criteria selection of alternatives. The workability of this approach is illustrated by the example of a fuzzy choice of robotic mechanical assembly technologies by the work of the FMCSA original software product.

Keywords: fuzzy optimization, selection, alternative, middle case.

Особливістю висвітленого тут підходу до вибору РМСТ, що вочевидь є складовою Технологічної підготовки (ТПг) роботизованих механоскладальних виробництв (РМСВ), є те, що процес вибору виконується з врахуванням попередньо визначених виду та величин серединних параметрів для кожного локального критерію вибору.

Метою роботи є підвищення ефективності технологічної підготовки (ТПг) роботизованих механоскладальних виробництв (РМСВ) машино- та приладобудування за рахунок нового підходу щодо нечіткого вибору РМСТ при серединного випадку та демонстрація його (підходу) автоматизованої реалізації за рахунок розробки оригінального ПП FMCSA, який є інваріантним щодо розмірностей та змісту розв'язуваних задач.

Загальна математична постановка задачі НБВА у вигляді формалізованого її представлення при розв'язуванні задач НБВА з використанням серединних параметрів на прикладі нечіткого вибору РМСТ є такою:

$$\varphi : (E \times S) \rightarrow (({}^k S_{<j>}) \rightarrow \langle {}^k S_{<j>} \rangle). \quad (1)$$

Тут $\varphi = \langle {}^k\varphi_f | f = \overline{1, F} \rangle$ – кінцева упорядкована множина обчислюваних процедур загальною кількістю F ;

$E = (E_i | i = \overline{1, n})$ – кінцева множина із n експертів;

$S = (S_j | j = \overline{1, m})$ – дискретна множина локальних критеріїв (ДМЛК) з кількістю елементів m ;

$$(S_j | j = \overline{1, m}) = (Gm, Kn, Dn, Ct, En, Tr, \tau(Q), Rl, Ec, Ac, Fc, Fopt),$$

де компонентами ДМЛК є наступні складові: Gm – геометрична; Kn – кінематична; Dn – динамічна; Ct – управлінська; En – енергетична; Tr – тракторна; $\tau(Q)$ – часова (продуктивність); Rl – надійність; Ec – економічна; Ac – точнісна; Fc – силова; $Fopt$ – складова, що визначена іншими видами критеріїв оптимальності, як правило, комбінованими (наприклад, техніко-економічними тощо);

$k \in (A, M, S, G)$ – вид серединного параметру: A – середньоарифметичний; M – медіанний; S – середньоквадратичний; G – середньогометричний;

\times – декартовий добуток кінцевих множин експертів $E = (E_i | i = \overline{1, n})$ та ДМЛК

$$S = (S_j | j = \overline{1, m});$$

\rightarrow – сюр'єктивне відображення вхідних даних (множин E та S) на елементи ${}^k_i c_j$

матриці ${}^k M_c$, тобто $(({}^k_i c_j) \subset {}^k M_c)$, що фактично означає формування матриці ${}^k M_c[n * m]$ як результату експертного опитування.

Таким чином, основою для розв'язування задчі в постановці за виразом (1) є початкова матриця експертного опитування ${}^k M_c[n * m]$. Це множина експертних оцінок, визначених строгим ранжуванням.

Загалом методика розв'язування задач НБВА передбачає упорядкування первинно неупорядкованої множини елементів ДМЛК в упорядковану множину, тобто $({}^k S_{<j>}) \rightarrow \langle {}^k S_{<j>} \rangle$ за рахунок упорядкованого виконання методично обумовлених

обчислювальних процедур множини $\varphi: \varphi = \langle {}^k\varphi_f | f = \overline{1, F} \rangle$, тобто:

$$\begin{aligned} \varphi &= \langle {}^k\varphi_f | f = \overline{1, F} \rangle = \\ &= \langle {}^k\varphi_c, {}^k\varphi_w, {}^k\varphi_a, {}^k\varphi_{Ew}, {}^k\varphi_{Ew^a}, {}^k\varphi_{(j)max}, {}^k\varphi_{<j>} | f = \overline{1, F}; \forall k \in (A, M, S, G) \rangle. \end{aligned}$$

Саме зміст кожної ${}^k\varphi_f$ -ої обчислювальної процедури та упорядкована послідовність їх реалізації $\langle {}^k\varphi_f \rangle$ визначають методик у проведених в даній роботі досліджень та результати автоматизоване розв'язування задач даної проблеми.

В даному випадку зміст кожної ${}^k\varphi_f$ -ої обчислювальної процедури наступний:

${}^k\varphi_e$ – процедура формування матриці kM_e кінцевих результатів строгого експертного ранжування елементів ДМЛК. Її елементами $({}^k_i c_j)$ є цілі числа, величини та важливість кожного з яких визначені умовами такого ранжування. В даному випадку для кожного виду серединного параметру $\forall k \in (A, M, S, G)$ із їх кінцевої множини відповідні матриці є однаковими: ${}^M M_e = {}^A M_e = {}^S M_e = {}^G M_e$ і мають розмір $[n \times m]$;

${}^k\varphi_w$ – процедура визначення елементів $({}^k_i w_j)$ матриці kM_w як ваг альтернатив через відношення рангу (оцінки) кожного S_j -го локального критерія, заданого E_i -им експертом, на множині оцінок усіх експертів для кожного S_j -го критерія. Сформовані таким чином матриці також однакові ${}^M M_w = {}^A M_w = {}^S M_w = {}^G M_w \quad |\forall k \in (A, M, S, G)$;

${}^k\varphi_\alpha$ – реалізацією цієї процедури формуються елементи $({}^k_i \alpha_j)$ матриці ${}^kM_\alpha$ як нечіткої множини з врахуванням важливості кожного S_j -го критерія через його вагу α_j на множині альтернатив E (за результатами виконання процедури ${}^k\varphi_w$). Саме в процесі реалізації цієї процедури розраховуються кожен k -ий серединний параметр $\forall k \in (A, M, S, G)$ для кожного S_j -го критерія;

${}^k\varphi_{EW}$ – визначаються важливості суджень кожного E_i -го експерта із їх множини E через визначення ваг альтернатив відносно кожного S_j -го критерія, тобто знаходяться елементи $({}^k_{EW} w_j)$ матриці ${}^kM_{EW}$;

${}^k\varphi_{EW^\alpha}$ – цією процедурою визначаються важливості альтернатив (кожного E_i -го експерта) через вагу ${}_E \alpha$ кожного з них на множині критеріїв S , формуючи елементи $\left({}^k_{EW} ({}^k_i \alpha_j)^{\max} \right)$ матриці ${}^kM_{EW^\alpha}$ як нечіткої множини; саме зміст цієї процедури визначає суттєві змістовні відмінності методик серединного випадку від попередньо розроблених методик найгіршого та квазі-кращого випадків (тут не розглядаються);

${}^k\varphi_{(j)\max}$ – виконанням цієї процедури формуються елементи $\left({}^k_{EW} ({}^k_i \alpha_j)^{\max} \right)_{\max}$ на множині $(S_{(j)\max} | j = \overline{1, m})$ нечітких оцінок для кожного локального критерія $S_{j\max}$, тобто формується неупорядкована множина функцій

приналежностей у вигляді послідовності $({}^k S_{\langle j \rangle})$ матриці ${}^k M_{PWA}$ на множині максимальних значень кожного локального критерія S_{jmax} :

${}^k \varphi_{\langle j \rangle}$ – цією процедурою аналізуються складові РМСТ з врахуванням серединних параметрів, в упорядковану множину, тобто $({}^k S_{\langle j \rangle}) \rightarrow \langle {}^k S_{\langle j \rangle} \rangle$. Даною процедурою (кроком), що змістовно є розв'язуванням *max-max*-ої задачі для кожного із серединних параметрів $\forall k \in (A, M, S, G)$, упорядковуються (сортуються) від найбільшої нечіткої оцінки до найменшої, що отримані за попередньою процедурою ${}^k \varphi_{(j)max}$, елементи неупорядкованої множини $({}^k S_{\langle j \rangle})$ нечітких оцінок результатів порівнянь, тобто $({}^k S_{\langle j \rangle}) \rightarrow \langle {}^k S_{\langle j \rangle} \rangle$. Результатом є кінцеві рішення загальної задачі нечіткого багатокритеріального вибору РМСТ методиками серединного випадку, що отримані для кожного k -го серединного параметру, тобто ${}^M S_{\langle j \rangle}$, ${}^A S_{\langle j \rangle}$, ${}^S S_{\langle j \rangle}$ та ${}^G S_{\langle j \rangle}$.

Працездатність цього підходу проілюстрована автоматизованими проміжними та кінцевими розрахунками та їх результатами при нечіткому багатокритеріальному виборі РМСТ за рахунок розробленого програмного продукту (ПП) FMCSA - Fuzzy Multi Criteria Selection of Alternatives.

Прийнятність використаної мови програмування Java визначена в силу своїх функціональних можливостей та особливостей обчислюваних процедур процесу нечіткого вибору.

За кількістю - це розв'язування фактично чотирьох задач вибору, що визначається чотирма серединними параметрами: A, M, S, G .

Вхідні дані в ПП FMCSA представляються у CSV-форматі даних (comma-separated values), що дає можливість використовувати один із загальнодоступних продуктів для формування вхідних даних: MS Excel; Notepad++; блокнот; будь-яке ПЗ для роботи з табличними даними.

Перед запуском програми на виконання проводиться валідація вхідних даних, щор є своєрідним дозволом на запуск ПП.

Комфортність користування розробленим ПП FMCSA визначається в тому числі мінімальною кількістю натискань на відповідні навігаційні клавіші. Є можливість зберігати отримані результати як покрокових, так і кінцевих рішень.

Простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс FMCSA дає можливість користувачу вибирати ту чи іншу методику розрахунку з використанням серединних параметрів. За бажанням користувач може обрати ілюстрацію покрокового результату розв'язування задач НБВА, або відразу отримати кінцевий результат з графічною ілюстрацією проміжних та кінцевого результатів у вигляді стовпцевих діаграм та відповідних графічних залежностей. Всі розрахунки супроводжуються розрахованими коефіцієнтами узгодженості за Кендаллом та Спірменом для загальних та для попарних порівнянь отриманих результатів відповідно.

УДК 531.381

Дмитро Лещенко, д.ф.-м.н., проф.; Тетяна Козаченко, к.ф.-м.н., доц.
Одеська державна академія будівництва та архітектури, Україна

ЕВОЛЮЦІЯ РУХІВ ТВЕРДОГО ТІЛА З ТОЧКОВОЮ МАСОЮ В СЕРЕДОВИЩІ З ОПОРОМ

Анотація. Досліджується задача про рух в середовищі з опором динамічно симетричного твердого тіла з рухомою точковою масою, яка з'єднана з тілом пружною в'язкою за наявності в'язкого тертя.

Ключові слова: тверде тіло, середовище з опором, точкова маса.

Dmytro Leshchenko, Ph.D., Prof.; Tetiana Kozachenko, Ph.D., Assoc. Prof.

PERTURBED MOTIONS OF A RIGID BODY WITH A POINT MASS IN A RESISTIVE MEDIUM

Abstract. We study the problem of the motion in a resistive medium of a dynamically symmetric rigid body carrying a movable point mass, connected with the body by an elastic coupling in the presence of viscous friction.

Keywords: rigid body, resistive medium, point mass.

Розвиток досліджень задач динаміки твердих тіл навколо його центра мас йде в напрямку врахування того факту, що ці тіла не є ідеально твердими, а досить близькими до ідеальних моделей. Необхідність аналізу впливу різних неідеальностей обумовлена зростанням вимог до точності розв'язань практичних задач космонавтики, гіроскопії, тощо. Вплив неідеальностей може бути виявленим за допомогою асимптотичних методів нелінійної механіки (усереднення, сингулярних збурень та ін.). Він зводиться до наявності додаткових збурюючих моментів в рівняннях руху Ейлера деякого фіктивного твердого тіла. В [1] одержано векторне рівняння, яке описує зміну вектора $\bar{\omega}$ в системі координат, пов'язаної з тілом. Функція $\bar{\Phi}(\bar{\omega})$ є поліномом, що містить четвертий і п'ятий степені $\bar{\omega}$.

Ряд робіт присвячено аналізу різних проблем динаміки космічних апаратів, що містять внутрішні маси. Вивчались питання стійкості та нестійкості, а також проблеми керування та стабілізації рухів. В космічному польоті іноді виникає потреба заглушити хаотичне обертання, яке виникає з будь яких причин. Для цього використовують переміщення рухомих мас.

Розглядаються обертальні рухи динамічно симетричного тіла з рухомою точковою масою, яка прикріплена в'язкопружним демпфером до точки на осі симетрії (в недеформованому стані) [1, 2], в середовищі з опором. Будемо вважати, що моменти сил опору є лінійними та дисипативними [1, 3]:

$$M_1^r = -\varepsilon I_1 p, \quad M_2^r = -\varepsilon I_1 q, \quad M_3^r = -\varepsilon I_3 r, \quad I_1, I_3 > 0, \quad (1)$$

де I_1, I_3 – деякі постійні коефіцієнти пропорційності, які залежать від властивостей середовища та форми тіла. З урахуванням (1) наближена система рівнянь збуреного руху в проекціях на головні центральні осі інерції має вигляд [1-3]

$$\begin{aligned} A\dot{p} + (C - A)qr &= -\varepsilon I_1 p + Lqr + Spr^4, \\ A\dot{q} + (A - C)pr &= -\varepsilon I_1 q - Lpr + Sqr^4, \\ C\dot{r} &= -\varepsilon I_3 r - AC^{-1}Sr^3(p^2 + q^2). \end{aligned} \quad (2)$$

де p, q, r – проєкції вектора абсолютної кутової швидкості $\bar{\omega}$ на зв'язані осі, $\mathbf{J} = \text{diag}(A, A, C)$ – тензор інерції незбуреного тіла. Коефіцієнти L, S в (2) виражаються через параметри системи наступним чином:

$$L = m\rho^2 \Omega^{-2} A^{-3} C (A^2 p^2 + A^2 q^2 + C^2 r^2), \quad S = m\rho^2 \lambda \Omega^{-4} C^3 (A - C) A^{-4}. \quad (3)$$

Коефіцієнти L, S характеризують збурюючі моменти сил, які обумовлені наявністю в'язкопружного елемента, m – маса рухомої точки, ρ – відстань від центра мас недеформованої системи до точки кріплення, яка знаходиться, за припущенням, на осі динамічної симетрії цього тіла. Сталі $\Omega^2 = c/m$, $\lambda = \delta/m$ визначають частоту коливань і швидкість їх згасання відповідно; c – жорсткість (коефіцієнт пружності), δ – коефіцієнт в'язкості демпфера.

Досліджується випадок потужного демпфера, коли коефіцієнти Ω, λ зв'язані нерівностями [1, 2]:

$$\Omega^2 \square \lambda \omega \square \omega^2. \quad (4)$$

Умова (4) дозволяє ввести малий параметр в (3) і вважати вказані збурюючі моменти малими з метою застосування асимптотичного метода усереднення. Крім того, нерівності (4) дозволяють нехтувати ділянками вільних коливань рухів маси, які обумовлені початковими відхиленнями, внаслідок їх швидкого згасання і врахувати вимушені квазістаціонарні рухи, викликані обертанням тіла. Будемо вважати, що $\Omega^2 \square \varepsilon$, $\lambda \Omega^{-4} \sim \varepsilon$.

Здійснюючи ряд перетворень систему (1) приведемо до системи повільних змінних x, y наступного вигляду:

$$\frac{dx}{dt} = -2x[\varepsilon I_1 A^{-1} - S A^{-1} y^2], \quad \frac{dy}{dt} = -2y[\varepsilon I_3 C^{-1} + A C^{-2} S x y]. \quad (5)$$

Система (5) проінтегрована чисельно за початкових умов $x(0) = 1, y(0) = 1$ та параметрів $\rho = 1, m = 1, \lambda = 98, \Omega = 10, \varepsilon = 0.1, I_3 = 1.0$ та при різних значеннях A, C, I_1 . Чисельний розв'язок системи отримано в математичному пакеті Maple, з застосуванням метода Рунге-Кутти-Фельберга п'ятого порядку точності.

Змінні $x = a^2$ та $y = r^2$, що є квадратами екваторіальної та осьової компонент кутової швидкості твердого тіла, спадають асимптотично наближаючись до нуля. У випадку виконання співвідношення $A/C = I_1/I_3$, система (5) має єдиний розв'язок $x = y$. При виконанні нерівності $A/C > I_1/I_3$ змінна y швидше прагне до нуля ніж x . Якщо ж $A/C < I_1/I_3$ навпаки, змінна x спадає швидше ніж y .

Також характер спадання величин квадратів екваторіальної та осьової компонент кутової швидкості твердого тіла залежить від співвідношення між моментами інерції. При зростанні величини A/C (при однакових інших параметрах) спадання змінних x та y відбувається повільніше. Еволюція руху твердого тіла описується розв'язками, які можуть бути використаними, при дослідженні орієнтації та стабілізації руху супутника відносно центра мас.

Перелік посилань

1. Chernousko F. L., Akulenko L. D., Leshchenko D. D. Evolution of Motions of a Rigid Body About its Center of Mass. Springer, Cham, 2017.
2. Черноусько Ф. Л. О движении твердого тела с подвижными массами. Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1973. №4. С.33–44.
3. Лещенко Д. Д., Козаченко Т. О. Деякі задачі про рух твердого тіла у середовищі з опором. Механіка та математичні методи. 2021. Т. 3. № 2. С. 6–17.

УДК 004.031.6:621.317.7

Юрій Лещин, к.т.н.; Нестор Романишин; Володимир Волоський; Ігор Голінський; Ілля Федорович

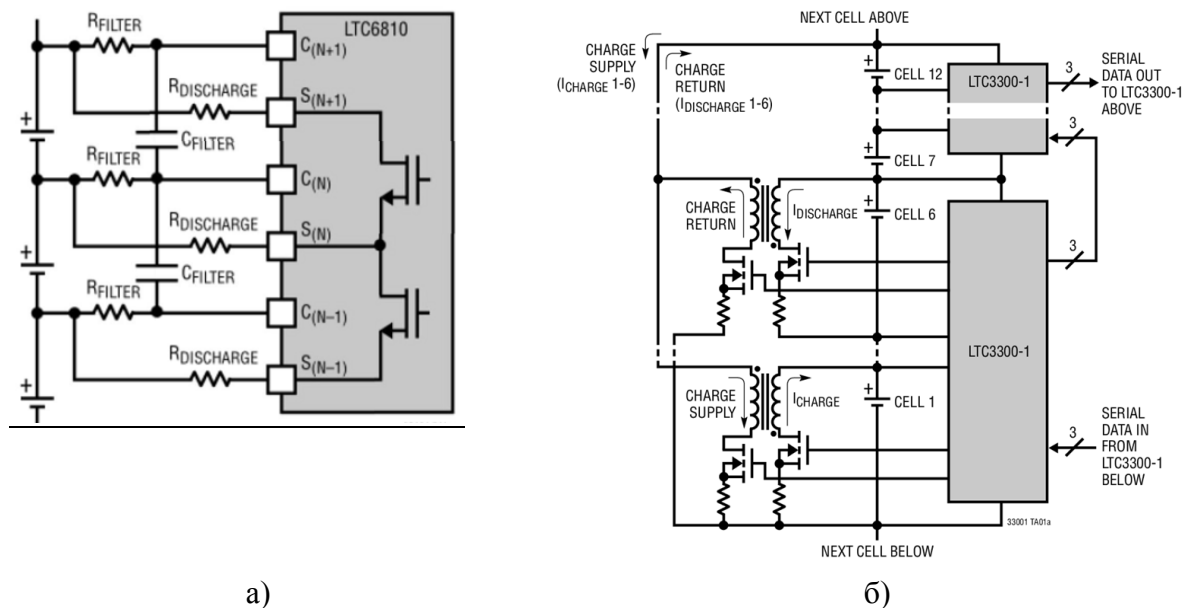
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ АЛГОРИТМІВ БАЛАНСУВАННЯ В СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ БАТАРЕЇ ДЛЯ ВБУДОВАНИХ ТА РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

Yurii Leshchyshyn, Ph.D.; Nestor Romanyshyn; Volodymyr Voloski; Ihor Holinskyi
THE EFFICIENCY OF BALANCING ALGORITHMS IN THE BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR EMBEDDED AND ROBOTIC SYSTEMS

Широке застосування вбудованих та роботизованих систем (ВРС) у різноманітних галузях передбачає їх тривалу автономну роботу, однак з цим виникають складнощі оскільки такі системи для виконання властивих їм задач споживають досить багато електричної енергії. Значне споживання енергії, це складне завдання, яке буде розв'язуватись в тривалому майбутньому, а існуючі ВРС потребують живлення вже зараз і це вирішується, зазвичай, літій-іонними акумуляторними батареями (АКБ), технологія яких покращується щороку. Літій-іонні АКБ з високою напругою живлення для ВРС отримують шляхом об'єднання багатьох комірок номінальною напругою 3,7В. Для отримання максимальної ємності таких АКБ, комірки балансують, щоб отримати максимальну ємність кожної комірки, причому завдяки балансуванню можна отримати приріст ємності до 10-15%. Функція балансування комірок покладена на систему контролю батареї (СКБ), яка також виконує функції керування та захисту АКБ під час її заряджання і розряджання.

Загалом методи балансування поділяють на 2 групи [1, 2]: пасивні та активні. Пасивні найбільш поширені та доступні їх принцип ґрунтується на розсіюванні надлишкової енергії за допомогою резисторів, що підключені паралельно до комірок АКБ рис. 1 (а). На цьому методі побудована мікросхема LTC6810. Перевагою цього методу є простота реалізації та алгоритмів балансування, недоліком втрати енергії при балансуванні комірок.



а)

б)

Рис. 1. Схема пасивного (а) та активного (б) балансування

Принцип роботи активних методів балансування базується на тому що, енергія більш заряджених комірок передається менш зарядженим коміркам, за допомогою перетворювачів побудованих на конденсаторах, індуктивностях або інверторів [1]. За таким принципом побудовано мікросхему для активного балансування LTC3300 – це набір інверторів для літій- іонних і LiFePO₄ акумуляторів, який забезпечує струм балансування до 10 А. Особливістю роботи інверторів мікросхеми є те що, енергія з будь-якої комірки може передаватися до сусідніх елементів. Причому цей струм балансування зазвичай не перевищує 10% загального струму заряджання АКБ, тобто 100А, тому ці методи використовують для сховищ електричної енергії великої потужності.

З цих двох методів балансування для використання у вбудованих і роботизованих системах краще підходять пасивні методи балансування, оскільки їх практична реалізація є менш громіздкою і простішою, а втрати на балансування є невеликими і відбуваються лише під час заряджання АКБ, тобто на автономність таких систем не впливають.

В свою чергу, пасивні методи балансування використовують різні алгоритми визначення накопиченої енергії в комірці, різноманітність яких зумовлена специфічністю хімічних процесів у літій- іонних акумуляторах та їх поступовим старінням. Відповідно алгоритми балансування комірок поділяють за алгоритмами визначення накопиченої енергії, що базуються на:

- 1) поточній напрузі кожної комірки батареї;
- 2) напрузі комірки при розімкненому колі Open-circuit voltage (OCV);
- 3) проценті заряду комірки State of charge (SoC)

Алгоритм (1) робота, якого ґрунтується на поточній напрузі кожної комірки батареї, використовує вимірювання напруги на комірці за якою визначає їх розбаланс. Цей алгоритм є дуже простим і може використовуватись у АКБ з малою ємністю, оскільки втрата ємності внаслідок розбалансу досягає 13% [1].

Більш ефективним є алгоритм (2) робота, якого ґрунтується на напрузі комірки при розімкненому колі OCV який розраховується із врахуванням внутрішнього опору комірки:

$$OCV_{bat} = V_{bat} - I_{bat} R_{bat} \quad (1)$$

Недоліком цього алгоритму є те [1], що при тривалій експлуатації опір комірки збільшується, що може призводити до втрати 8% ємності АКБ внаслідок розбалансу.

Найвищу ефективність однак і найбільшу складність має алгоритм (3) робота, якого ґрунтується на вимірюванні проценту заряду комірки SoC. Коли значення SoC для кожної комірки зберігаються в пам'яті мікроконтролера та враховується час заряджання і балансування комірок АКБ. Втрата ємності АКБ при балансуванні за допомогою такого алгоритму 1,6% [1].

Перші два алгоритми є простими в реалізації однак дають значну втрату ємності, третій алгоритм дає найменші втрати ємності, однак потребують окремого мікроконтролера та точного вимірювання параметрів процесу заряджання кожної комірки АКБ. Це виправдано у великих батареях електроавтомобілів однак для невеликих ВРС така СКБ буде громіздкою і надлишковою. Однак, якщо об'єднати алгоритми (1) і (2) коли протягом основного часу комірки баланшуються за поточною напругою, а наприкінці заряду відбувається балансування за OCV [3]. Передбачається що такий алгоритм буде давати розбаланс комірок не значно гірший за алгоритм (3), оскільки відбувається заряджання малими струмами і можна досить точно визначити, яка ємність комірки відповідає виміряній напрузі OCV.

Для такого модифікованого алгоритму необхідно обчислювати OCV за формулою (1), а відповідно визначати внутрішній опір кожної комірки. Для коректних обчислень внутрішній опір комірок необхідно розраховувати за методикою наведеною в стандарті IEC 61951-1:2013 [4].

Розраховані значення OCV використовуються для визначення поточної ємності комірки SoC за розрахунковими таблицями, які описують поліном степеневі функції.

$$U_{ocv} = k_n SOC^n + k_{n-1} SOC^{n-1} + \dots + k_1 SOC + k_0 \quad (2)$$

де (k_0, k_1, k_n) — параметри, які необхідно оцінити.

Величину SoC визначають, як відношення накопиченої енергії в комірці до номінальної її ємності [5]. Накопичену енергію в батареї розраховують шляхом вимірювання кількості енергії витраченої під час розрядження. Отримані розрахункові значення відношення OCV-SoC реалізовано, як таблиці пошуку необхідних значень, і для літій-іонних акумуляторів це відношення матиме вигляд рис.2.

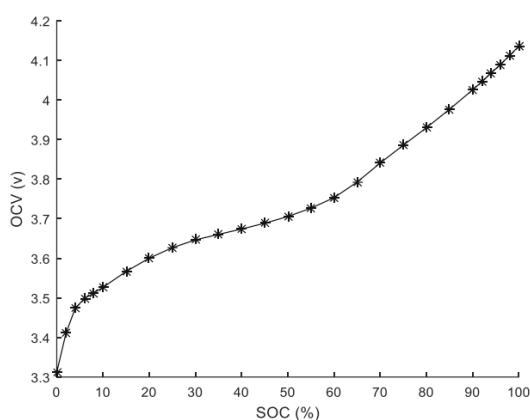


Рис. 2. Графік відношення OCV-SoC для літій-іонних акумуляторів.

З наведеного графіка помітно, що найбільш лінійною ділянкою відношення OCV-SoC є відрізок наприкінці заряджання комірки, саме тому у запропонованому алгоритмі протягом основного часу комірки балануються за поточною напругою, а наприкінці заряду відбувається балансування за OCV. Тому запропонований алгоритм у перспективі має достатню точність балансування комірок, при суттєвій простоті алгоритму роботи. Крім того зберігання лише невеликого об'єму табличних даних відношення OCV-SoC наприкінці заряджання спрощує побудову АКБ на високі напруги.

Запропонований алгоритм балансування літій-іонних АКБ, що поєднує прості в реалізації пасивні алгоритми по поточній напрузі комірки батареї та по напрузі комірки при розімкненому колі OCV, спрощують реалізацію СКБ та в перспективі підвищують її ефективність при застосуванні для забезпечення живлення ВРС.

Перелік посилань

1. Fleischer C., Ostendorp B., Sauer D. U. Simulative comparison of balancing algorithms for active and passive cell balancing systems for lithium-ion batteries. In Proc. Adv. Automotive Battery Conf.. 2013, February. P 11.
2. Scott K., Nork S. Active battery cell balancing analog devices. URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/active-battery-cell-balancing.html>
3. Лещишин Ю. Алгоритм балансування Li-іон акумуляторних батарей на основі поточної напруги та напруги при розімкненому колі / Ю. Лещишин, Н. Романишин, В. Волоський // Матеріали ІХ науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології“. Т. : ТНТУ, 2021. С. 109.
4. IEC 61951-1:2017. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Secondary sealed cells and batteries for portable applications - Part 1: Nickel. Effective from 2017-03-07. Official edition. 2017. 81 p
5. Estimation of lithium-ion battery state-of-charge using an extended kalman filter / M. Lagraoui et al. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2021. Vol. 10, no. 4. P. 1759–1768. URL: <https://doi.org/10.11591/eei.v10i4.3082> (21.11.2021).

УДК 004.89

Борис Липа

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ТЕХНОЛОГІЯХ РОЙОВИХ ДРОНІВ

Анотація. Ця стаття надає огляд інтеграції штучного інтелекту (ШІ) у технологію ройових безпілотників для військових застосувань. Вона висвітлює технічні аспекти координації, навігації та прийняття рішень, приведених до життя за допомогою ШІ, всередині роїв безпілотників, підкреслюючи їх потенціал трансформації сучасної війни. Ключові слова: рій дронів, ведення війни, штучний інтелект, військові технології

Borys Lypa

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DRONE SWARM TECHNOLOGY

Abstract. This article provides an exploration of the integration of Artificial Intelligence (AI) into drone swarm technology for military applications. It highlights the technical aspects of AI-driven coordination, navigation, and decision-making within drone swarms, emphasizing their potential to revolutionize modern warfare.

Keywords: drone Swarm, warfare, artificial intelligence, military technology

У останні роки обстановка у військовій сфері переживає глибоку трансформацію з інтеграцією штучного інтелекту (ШІ) військовими стратегіями та технологіями. Одним із таких помітних досягнень є використання ШІ для інтеграції зграї безпілотників, що представляє собою зміщення парадигми в тактиці сучасної війни. Ця стаття досліджує технічні аспекти використання ШІ у координації та оркеструванні зграї безпілотників, його наслідки та майбутні траєкторії цієї технології.

Зграї безпілотників, що складаються з численних автономних або напівавтономних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), з'явилися як руйнівний множник сил у військових операціях. На відміну від традиційних одиночних безпілотників, зграї працюють спільно, використовуючи загальний інтелект для виконання складних завдань ефективно. Здатність використовувати велику кількість безпілотників одночасно дозволяє реалізувати різноманітні застосування, починаючи від розвідки та нагляду й закінчуючи ударними ударами та електронною війною.

Ефективна координація та синхронізація зграї безпілотників вимагає вдосконалених алгоритмів ШІ, здатних приймати рішення в реальному часі, адаптуватися та співпрацювати. ШІ виступає як основа інтелекту зграї, дозволяючи безпілотникам спілкуватися, обмінюватися інформацією та автономно виконувати місії з мінімальним втручанням людини. Ключові техніки ШІ, такі як машинне навчання, комп'ютерне зорове спостереження та алгоритми інтелекту зграї, надають безпілотникам можливість навігації у динамічних середовищах, ідентифікувати цілі та реагувати на змінні загрози автономно.

Алгоритми ШІ сприяють координації зграї, дозволяючи безпілотникам спілкуватися та формувати єдину мережу. Децентралізовані алгоритми прийняття рішень забезпечують стійкість до відмов окремих безпілотників, дозволяючи зграї адаптуватися та переконфігурувати свою формацію динамічно.

Завдяки системам навігації, приведеним у дію за допомогою ШІ, безпілотники можуть прокладати шлях у складних місцевостях, уникати перешкод та зберігати цілісність формації під час місій. Алгоритми машинного навчання дозволяють

безпілотникам вчитися від свого оточення, оптимізувати планування маршруту та вносити коригування в реальному часі для ефективного досягнення цілей завдання.

Алгоритми комп'ютерного зору, що працюють на основі ШІ, дозволяють безпілотникам ідентифікувати та відстежувати цілі з високою точністю, навіть в умовах складних середовищ. Глибокі моделі навчання, створені на основі обширних наборів даних, дозволяють безпілотникам відрізняти дружні цілі від ворожих, покращуючи можливості розпізнавання цілей та мінімізуючи ризик для цивільних жертв.

ШІ сприяє колективному прийняттю рішень серед членів зграї, дозволяючи безпілотникам обмінюватися інформацією, синхронізувати дії та спільно досягати цілей місії. Алгоритми інтелекту зграї дозволяють безпілотникам самоорганізовуватися, динамічно розподіляти завдання та адаптувати стратегії з урахуванням обстановки та пріоритетів місії.

Інтеграція ШІ-доповнених роїв безпілотників у війну вносить як можливості, так і виклики. З одного боку, зграї безпілотників пропонують покращену оперативну гнучкість, масштабованість та точність, дозволяючи військам виконувати місії зі зменшеним ризиком для персоналу та інфраструктури. З іншого боку, обурення стосовно автономного прийняття рішень, етичні питання та потенційні непередбачені наслідки підкреслюють необхідність відповідального управління ШІ та нагляду з боку людини.

По мірі того як ШІ та технології безпілотників продовжують розвиватися, майбутнє війни, ймовірно, буде свідком подальших досягнень у можливостях роїв безпілотників. Дослідницькі зусилля, спрямовані на покращення координації, автономії та надійності роїв, будуть сприяти інноваціям у цій сфері. Крім того, міждисциплінарна співпраця між дослідниками у галузі ШІ, робототехніками та військовими стратегами буде невід'ємною для використання повного потенціалу ШІ-доповнених роїв безпілотників, а також вирішення етичних, правових та безпекових викликів.

Злиття ШІ та технологій безпілотників оголошує початок нової ери війни, що характеризується поширенням інтелектуальних, автономних систем, здатних перетворювати ландшафт бойового поля. Шляхом використання ШІ для активації роїв безпілотників війська можуть покращити свою операційну ефективність, гнучкість та точність, а також породжують важливі питання щодо етичних та стратегічних наслідків автономних засобів зброї. Долаючи складнощі цього технологічного фронту, важливо надавати пріоритет розвитку відповідального ШІ та забезпечувати, щоб ці трансформаційні можливості були впроваджені відповідно до міжнародних норм і принципів гуманізму.

Перелік посилань

1. Lehto, M., & Hutchinson, B. (2020, March). Mini-drones swarms and their potential in conflict situations. In 15th international conference on cyber warfare and security (Vol. 12, pp. 326-334).
2. Elliott, A. (2019). Automated mobilities: From weaponized drones to killer bots. *Journal of sociology*, 55(1), 20-36.
3. Rawat, B., Bist, A. S., Apriani, D., Permadi, N. I., & Nabila, E. A. (2023). Ai based drones for security concerns in smart cities. *APTISI Transactions on Management*, 7(2), 122-127.

УДК 620.192.49

Павло Марущак, д.т.н., проф.; Володимир Медвідь, к.т.н., доц.; Олександр Шовкун

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

**МАЛОГАБАРИТНА УСТАНОВКА ДЛЯ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА УМОВ ОСВІТЛЕННЯ ПРИ КОНТРОЛІ
ДЕФЕКТІВ МЕТАЛОПРОКАТУ**

Анотація. Розроблено малогабаритну лабораторну установку, яка дозволяє відтворювати експлуатаційні режими вібрування та умови освітлення листового прокату. Проведено апробацію розробленого стенду, що дозволило підтвердити його високі технічні характеристики та можливість використання для оцінювання впливу технологічних факторів металургійного виробництва на якість дефектометрії.

Ключові слова: вібрація, дефекти, умови освітлення.

Pavlo Maruschak, Ph.D., Prof.; Volodymyr Medvid, Ph.D., Assoc. Prof.; Oleksander Shovkun

**SMALL-SIZED INSTALLATION FOR PHYSICAL MODELING OF
VIBRATION PROCESSES AND ILLUMINATION AT MONITORING DEFECTS IN
ROLLED METAL PRODUCTS**

Abstract. A small-sized laboratory installation has been developed that allows to reproduce the operating modes of vibration and lighting conditions of rolled sheet metal. Approbation of the developed stand was carried out, which made it possible to confirm its high technical characteristics and the possibility of use for evaluating the influence of technological factors of metallurgical production on the quality of defects measurements.

Key words: vibrations, defects, lighting conditions.

Підвищення якості листового металопрокату вимагає розроблення нових методів контролю його поверхні. Сьогодні, оптико-цифрові діагностичні системи дозволяють в режимі реального часу виявляти, розпізнавати та класифікувати дефекти. Це також створює передумови визначення їх розмірів та оцінювання пошкодженості аналізованої поверхні. Оптико-цифрові підходи, які сьогодні використовують на металургійних підприємствах мають низку переваг порівняно із іншими методами контролю поверхневих дефектів, це:

- чутливість до типів дефектів;
- висока продуктивність;
- можливість безперервної безконтактної дефектометрії під час технологічного процесу.

Аналітична частина дефектометричної системи виявляє та класифікує наявні дефекти та оцінює їх допустимість з точки зору чинних стандартів (наприклад, ГОСТ 21014-88). Разом з тим, метод чутливий до умов освітлення та режимів прокатування [1]. Це обумовлено тим, що максимальна точність методу досягається за оптимальних умов освітлення та мінімальної вібрації контрольованої поверхні. Таким чином, важливим технічним завданням є пошук оптимальних умов оптико-цифрового контролю, які забезпечать точність виявлення дефектів металопрокату, а для практичної реалізації методу дозволять використовувати уніфіковане та недороге обладнання.

Основне завдання діагностичних систем на металургійному виробництві - вчасно виявити дефект, що дозволяє визначити причину їх утворення. Це дає можливість

скоригувати роботу агрегату, усунути причину появи браку (скоригувати технологічний процес) та/або відбракувати готову продукцію. Аналізуючи відомі дослідження, можна дійти висновку, що на даний час є певна система методів, моделей і засобів виявлення дефектів виробництва листового прокату, розроблено методологічні принципи їх використання, які дозволяють вирішувати широкий спектр завдань. Разом з тим, інтенсифікація прокатування зумовлює виникнення нових видів дефектів та необхідність підвищення точності діагностування відомих, що зумовлює необхідність розроблення нових параметрів та алгоритмів. Саме тому розроблення лабораторної установки, яка забезпечить відтворення впливу умов освітленості та частот вібрації листів металопрокату під час лабораторної апробації діагностичних систем є актуальним завданням.

Було спроектовано та виготовлено малогабаритну установку яка забезпечує:

- створення високочастотних вібрацій;
- створення контрольованого рівномірного освітлення в зоні контролю дефектності.

Малогабаритна установка для дослідження впливу вібрацій (рис. 1) містить електродинамічний вібростенд 1, на вібраційному столі якого встановлювали досліджувані зразки (металевий лист з дефектами) Амплітуду та частоту коливань стола вібростенда записували за допомогою тензометра, одна з ніжок якого перебувала в контакті з модельним листом металопрокату, а інша кріпилась до корпусу випробувальної камери 2.

Основним елементом вібростенду 1 є вібраційна головка, що містить нерухому котушку намагнічування, довкола якої під дією постійного струму створюється постійне магнітне поле та рухома котушка, розташована всередині котушки намагнічування, яка створює змінне магнітне поле і до якої прикріплений вібраційний стіл. Взаємодія постійного та змінного поля обох котушок забезпечує переміщення вібраційного стола вібростенду. На котушку намагнічування подавали постійну напругу 12-30 В, що дозволило змінювати частоту та амплітуду створюваної вібрації.



Рисунок 1. Стенд для дослідження впливу вібрацій: 1- вібростенд, 2- камера для досліджень

Вібраційний стіл з рухомою котушкою через пружну мембрану кріпиться до корпусу вібраційної головки, який виконує функцію магнітопроводу її електродинамічної системи. Від генератора низькочастотних коливань через аналоговий підсилювач класу АВ вихідною потужністю до 100Вт на рухома котушка подавали змінну синусоїдальну напруга з частотою 10-1000 Гц амплітудою 0-30В. При потребі змінна напруга може бути трикутної, пилкоподібної форми, або у вигляді прямокутних імпульсів.

Під час експерименту, вібростенд з досліджуваним зразком встановлювали у камері 2. Камера 2, яка з середини пофарбована в чорний колір, представляє собою короб, що складається з двох частин- верхньої та нижньої. На кришці верхньої частини є отвір діаметром 90 мм, через який за допомогою фотокамери здійснювали фотофіксацію досліджуваного зразка. З внутрішньої частини верхньої кришки навколо отвору розташовані світлодіодні модулі smd2835, закриті розсіювачем світла з молочного пластику. Змінюючи напругу джерела живлення, до якого під'єднані світлодіоди, змінювали освітленість поверхні зразка E в межах 100-600 лк, під час проведення експерименту.

Форму змінної напруги, що подавалась на вібраційну головку, контролювали осцилографом, її частоту та амплітуду задавали генератором. В процесі досліджень контролювали також постійну напругу на котушці намагнічування та на світлодіодах, змінну напругу на рухомій котушці вібраційної головки, вимірювали амплітуду вібрації стола вібраційної головки.

Перелік посилань

1. Maruschak, P.; Konovalenko, I.; Osadtsa, Y.; Medvid, V.; Shovkun, O.; Baran, D.; Kozbur, H.; Mykhailyshyn, R. Surface Illumination as a Factor Influencing the Efficacy of Defect Recognition on a Rolled Metal Surface Using a Deep Neural Network. *Appl. Sci.* 2024, 14, 2591. <https://doi.org/10.3390/app14062591>

УДК 621.865

Роман Михайлишин¹, к.т.н.; Франтішек Духон, канд. техн. наук, проф.; Михайло Михайлишин¹, к.ф-м.н., доц.; Міхал Келемен к.т.н., проф.; Джін Сяо, к.т.н., проф.; Енн Масвич Фей, к.т.н., проф.

¹ Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

Американ Юніверсіті Київ, Україна

Словацький технологічний університет в Братиславі, Словацька Республіка

Технологічний університет в Кошице, Словацька Республіка

Вустерський політехнічний інститут, Сполучені Штати Америки

Техаський університет в Остіні, Сполучені Штати Америки

ВПЛИВ ФРИКЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНВЕЄРНИХ СИСТЕМ НА ПРОЦЕС РОБОТОТЕХНІЧНОГО МАНІПУЛЮВАННЯ ГНУЧКИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація: Конвеєрні системи для роботи із гнучкими об'єктами оснащуються спеціальними покриттям із збільшеними фрикційними властивостями, що в свою чергу запобігає проковзуванню об'єктів під час операцій над ними. Такі властивості конвеєрних покриттів мають негативний ефект для процесу маніпулювання об'єктів.

Ключові слова: робототехніка, тертя, маніпулювання, захоплення, гнучкий об'єкт

Roman Mykhailyshyn, Ph.D.; Frantisek Duchon, Ph.D., Prof.; Mykhailo Mykhailyshyn, Ph.D., Assoc. Prof.; Michal Kelemen, Ph.D., Prof.; Jing Xiao, Ph.D., Prof.; Ann Majewicz Fey, Ph.D., Prof.

INFLUENCE OF FRICTIONAL PROPERTIES OF CONVEYOR SYSTEMS ON THE PROCESS OF ROBOTIC MANIPULATION OF FLEXIBLE OBJECTS

Abstract: Conveyor systems working with flexible objects are equipped with special covering with increased frictional properties, which prevents objects from slipping during technological operations. Such properties of conveyor coverings hurt the process of manipulation.

Keywords: robotics, friction, manipulation, grasping, flexible object

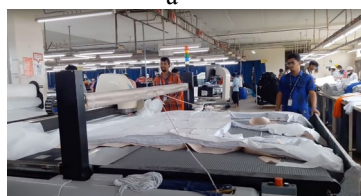
Автоматизовані робототехнічні системи активно розвиваються в напрямку гнучкої робототехніки [1], методів їх контролю [2], планування рухів [3-4] та приділяється значна увага фрикційних властивостей гнучких роботів та захоплювальних пристроїв [5]. Схожа ситуація складається і з конвеєрними системами, що працюють із гнучкими текстильними об'єктами Рис. 1.



а



б



в



Рис. 1. Конвеєрні системи для текстильного виробництва: (а) конвеєрна система лазерної порізки; (б) фрикційні елементи конвеєрної системи для порізки лезом; (в) приклад людської праці для маніпулювання текстильних матеріалів під час руху конвеєрної системи.

В не залежності чи використовується автоматизована лазерна лінія порізки текстильного метріалу (Рис. 1а) чи порізки за допомогою леза (Рис. 1б), конструкції конвеєрів оснащенні спеціальними покриттями для запобігання проковзування гнучких матеріалів під час тенологічних операцій. Через складність захоплення та маніпулювання гнучких об'єктів на виробництві більшість операцій проводяться людьми (Рис. 1в). Тому автори провели фундаментальні дослідження методів прототипування пневматичних захоплювачів [6-7], їх оптимізацію [8-9], та методів маніпулювання об'єктів [10-14]. В результаті цих дослідження вони змогли спроектувати струминний захоплювальний пристрій для гнучких та деформівних об'єктів [15-17]. Завдяки можливості проводити захоплення гнучких об'єктів постало питання маніпулювання, де виникало багато проблем [18]. Проведений аналіз дозволив запропонувати методіку переорієнтування пневматичних захоплювальних пристроїв [19-20], щоб збільшити утримуючу силу за рахунок використання сили тертя та мінімізувати втрати розрідження в порожнині захоплювача. Проте при проведенні досліджень (Рис. 2) виявилось, що сила тертя між фрикційним покриттям конвеєрів та гнучкими (текстильними) об'єктами настільки велика, що призводить до початку проковзування під час перерорієнтації (Рис. 2в,г) та при піднятті об'єкта (Рис. 2д). В кінцевому результаті це призводить до втрати контакту між захоплювачем і об'єктам та падіння останнього (Рис. 2е). Тому наразі робота зосереджа на вирішенні проблеми шляхом запровадження нових конструкцій захоплювачів та методів маніпулювання, що запобігає виникненню сили тертя з конвеєрним покриттям.

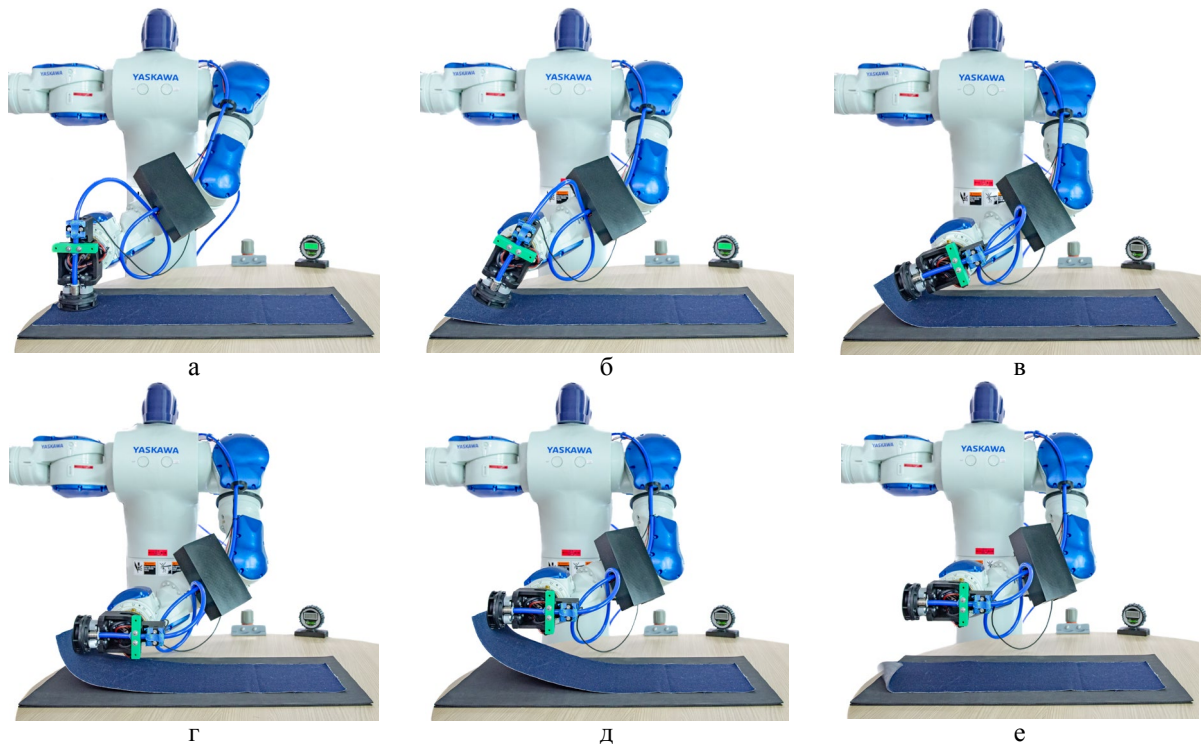


Рис. 2. Втрата контакту із гнучким об'єктам під час маніпулювання: (а) захоплення; (б) переорієнтація; (в) переорієнтація; (г) початок підняття; (д) підняття; (е) втрата контакту і падіння.

Перелік посилань

1. Sensing of Continuum Robots: A Review / P.J. Sincak, E. Prada, L. Miková, R. Mykhailyshyn, M. Varga, T. Merva, I. Virgala // *Sensors*. – 24(4). – 2024. – DOI: 10.3390/s24041311.
2. Mathematical Modeling of Robotic Locomotion Systems / E. Prada, L. Mikova, I. Virgala, M. Kelemen, P.J. Sincák, R. Mykhailyshyn // *Symmetry*. – 16(3). – 2024. DOI: 10.3390/sym16030376
3. Robot Trajectory Planning / D. Hroncova, P. Sincak, T. Merva R. Mykhailyshyn // *MM Science Journal*. – 2022. – DOI: 10.17973/MMSJ.2022_11_2022093.
4. Global Path Planning Method Based on a Modification of the Wavefront Algorithm

for Ground Mobile Robots / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, I. Diahovchenko, F. Duchon, R. Trembach // *Robotics*. – 12(1). – 2023. – P. 527-532. – DOI: 10.3390/robotics12010025.

5. Substantiation of Parameters of Friction Elements of Bernoulli Grippers With a Cylindrical Nozzle / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, I. Boyko, E. Prada, & I. Virgala // *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME)*. – 11(2). – 2021. – P. 17-39. – DOI: 10.4018/IJMMME.2021040102.

6. A Systematic Review on Pneumatic Gripping Devices for Industrial Robots / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, P. Maruschak, J. Xiao // *Transport*. – 37(3). – 2022. – P. 201-231. – DOI: 10.3846/transport.2022.17110

7. Three-Dimensional Printing of Cylindrical Nozzle Elements of Bernoulli Gripping Devices for Industrial Robots / R. Mykhailyshyn, F. Duchoň, M. Mykhailyshyn, A. Majewicz Fey // *Robotics*. – 11(6). – 2022. – DOI: 10.3390/robotics11060140.

8. Optimization of Outer Diameter Bernoulli Gripper with Cylindrical Nozzle / R. Mykhailyshyn, F. Duchoň, I. Virgala, P.J. Sinčák, A. Majewicz Fey // *Machines*. – 11(6). – 2023. – DOI: 10.3390/machines11060667.

9. Influence of Inlet Parameters on Power Characteristics of Bernoulli Gripping Devices for Industrial Robots / R. Mykhailyshyn, J. Xiao // *Applied Sciences*. – 12(14). – 2022. 7074. DOI: 10.3390/app12147074.

10. Experimental Research of the Manipulation Process by the Objects Using Bernoulli Gripping Devices / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, M. Mikhalishin, F. Duchon // *In Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, International IEEE Conference*. – 2017. – P. 8-11. – DOI: 10.1109/YSF.2017.8126583

11. Orientation Modeling of Bernoulli Gripper Device with Off-Centered Masses of the Manipulating Object / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, O. Fendo, M. Mykhailyshyn // *Procedia Engineering*. – 2017. – № 187. – P. 264-271. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.374

12. Михайлишин Р.І. Обґрунтування параметрів та орієнтації струминного захоплювача маніпулятора для автоматизації вантажно-розвантажувальних операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.05 “Піднімально-транспортні машини” / Р.І. Михайлишин. – Тернопіль, 2018. – 21 с.

13. Energy efficiency analysis of the manipulation process by the industrial objects with the use of Bernoulli gripping devices / V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, F. Duchoň, M. Mykhailyshyn // *Journal of Electrical Engineering*. – 2017. – 68(6). – P. 496-502.

14. Modeling of Bernoulli gripping device orientation when manipulating objects along the arc/ V. Savkiv, R. Mykhailyshyn, Duchoň, M. Mykhailyshyn // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. – 15(2). – 2018. – P. 2397-2408. DOI: 10.1177/1729881418762670

15. Gripping Device for Textile Materials / R. Mykhailyshyn, V. Savkiv, A. Majewicz Fey, & J. Xiao // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 20(4). – 2023. – P. 2397-2408. DOI: 10.1109/TASE.2022.3208796

16. Low-Contact Grasping of Soft Tissue using a Novel Vortex Gripper / R. Mykhailyshyn, A. Majewicz Fey // *2024 International Symposium on Medical Robotics (ISMR)*. – 2024.

17. Finite element modeling of grasping porous materials in robotics cells / R. Mykhailyshyn, A. Majewicz Fey, J. Xiao // *Robotica*. – 41(2). – 2023. – P. 3485-3500. – DOI: 10.1017/S0263574723001121.

18. Problems Modeling the Process of Manipulation Flexible Objects in Robotics / R. Mykhailyshyn, M. Mykhailyshyn, F. Duchon, M. Kelemen, A. Majewicz Fey, J. Xiao // *International Scientific-Technical Conference "Mathematical Methods and Models of Technical and Economic Systems"*. – 2022. – P. 73-74.

19. Increasing the Holding Force of Non-Rigid Materials Through Robot End-Effector Reorientation / R. Mykhailyshyn, A. Majewicz Fey, J. Xiao // *IROS 2023 Workshop on Leveraging Models for Contact-Rich Manipulation – IEEE*, 2023.

20. Toward Novel Grasping of Non-Rigid Materials Through Robotic End-Effector Reorientation / R. Mykhailyshyn, A. Majewicz Fey, J. Xiao // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* – 2024. DOI: 10.1109/TMECH.2023.3337628.

УДК 004.852(043)

Сергій Фундитус; Ігор Коноваленко, к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

РОЗПІЗНАВАННЯ ДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНЕВІЙ СТРУКТУРІ ПОКРІВЛІ БУДІВЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДРОНІВ ТА ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Анотація. В даному дослідженні розглядається проблема розпізнавання дефектів на поверхневій структурі будівельних покрівель за допомогою дронів та нейронних мереж з машинним навчанням. Метою дослідження є розробка ефективного методу виявлення пошкоджень, таких як тріщини, зношування, корозія тощо, що можуть впливати на надійність та безпеку будівельних конструкцій з використанням згорткової нейронної мережі яка здійснює класифікацію зображень, які були створені за допомогою дрону, поверхневої структури поверхні покрівель будівель між двома дискретними класами.

Ключові слова: дрони, машинне навчання, виявлення пошкоджень, згорткові нейронні мережі, розпізнавання образів, класифікація зображень, дефекти на поверхні покрівлі.

Serhiy Fundytus; Ihor Konovalenko, Ph.D., Assoc. Prof.

RECOGNITION OF DEFECTS ON THE SURFACE STRUCTURE OF THE BUILDING ROOF USING DRONES AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Abstract. This research examines the problem of recognizing defects on the surface structure of building roofs using drones and neural networks with machine learning. The purpose of the research is to develop an effective method for detecting damage such as cracks, wear, corrosion, etc., which can affect the reliability and safety of building structures using a convolutional neural network that performs the classification of images that were created using a drone, the surface structure of the surface of the roofs of buildings between two discrete classes.

Keywords: drones, machine learning, damage detection, convolutional neural networks, pattern recognition, image classification, roof surface defects.

Покрівля є однією з найважливіших частин будинку, яка забезпечує його захист від негоди та інших природних впливів. Існує великий вибір покрівельних покриттів з різними характеристиками, найбільш популярними матеріалами є профнастил, металочерепиці, керамічна черепиця, ондулін і бітумна черепиця. Також є інші матеріали, але в більшості випадків застосовуються саме перелічені. У деяких випадках необхідно вміти визначати ситуацію, чи мають дахи будинків пошкодження в даному місці або в даний час. Ці дані повинні бути отримані в режимі реального часу і автоматизовані. Залучення фахівців, які здатні здійснювати висотні роботи для постійного моніторингу стану поверхні покрівлі, може бути витратнішим, ніж усунення наслідків ігнорування даного фактору – таких, як ремонт внутрішнього інтер'єру або заміна доробартісного устаткування, яке було пошкоджене через дефекти в даху. Для ефективного вирішення поставленої мети застосуємо квадрокоптери, також відомі як квадрокоптерні дрони або мультироторні літальні апарати, які стали невід'ємною частиною сучасного світу. Ці безпілотники, оснащені чотирма гвинтами, здатні підійматися у повітря і виконувати різноманітні завдання. Розгляньмо основні особливості застосування такого аеродинамічного пристрою як квадрокоптер. Безпілотні літальні апарати можуть бути використані для досліджень важкодоступних місць, якими являються поверхні будівельних покрівель за допомогою створення вражаючих фото- та відеозйомок з повітря. Існує потреба у машинному навчанні для

аналізу і розпізнавання цілих покрівель, або пошкоджених. Глибоке навчання зробило революцію в розпізнаванні образів і машинному навчанні. Зображення та відео стали повсюдно присутніми в Інтернеті, що стимулювало розробку алгоритмів, які можуть аналізувати їх семантичний зміст для різних додатків, включаючи пошук і узагальнення. [1]

В теперішній час широко використовуються згорткові нейронні мережі (ЗНМ) як ефективний клас моделей для розуміння змісту зображень, що дає найсучасніші результати в розпізнаванні, сегментації та вилученні зображень і відео. Архітектури ЗНМ здатні до навчання потужним характеристикам на основі слабо маркованих даних, які значно перевершують по продуктивності методи, що засновані на характеристиках. [2, 3, 4]

В існуючих дослідженнях була представлена гібридна нейронна мережа для розпізнавання поверхневої структури покрівлі будівлі, яка поєднує в собі локальну вибірку зображень, нейронну мережу з самоорганізаційною картою (СК) і згорткову нейронну мережу (ЗНМ). СК забезпечує квантування зразків зображень в топологічний простір, тим самим забезпечуючи зниження розмірності і інваріантність до незначних змін у зразку зображення, а ЗНМ забезпечує інваріантність до перекладу, повороту, масштабуванню і деформації. Вона послідовно витягує більші ознаки в ієрархічному наборі шарів. [1, 2, 4]

Існує два основних додатки машинного навчання, які аналізують зображення, що містять покрівлі будинків: 1) систему виявлення дахів будівель; 2) систему порівняння поверхні покрівель. Система виявлення дахів будівель розпізнає наявність, місце розташування, масштаб і (можливо) орієнтацію та матеріал будь-якої покрівлі споруди, присутньої на нерухомому зображенні або відеокадрі. Система порівняння поверхні покрівель бере зображення даху і робить прогноз, чи збігається ця покрівля з іншими поверхнями дахів будинків в наданій базі даних. [1, 2]

Для вирішення задачі виявлення об'єкта певного класу на фото або відео підходить ЗНМ, бо її архітектура дозволяє зробити модель детектування, яка самостійно знаходить в зображенні високорівневі ознаки, використовуючи лише зображення в якості вхідних даних. Визначення того, чи містить зображення даху будівлі з дефектами чи ні, є простим завданням класифікації. Треба класифікувати зображення між двома дискретними класами: ті, які містять пошкодження на поверхні покрівлі будинку, і ті, які не містять. [2, 4]

Для створення системи розпізнавання дефектів на поверхні, таких як прогнилі дерев'яні елементи, місця протікання покрівлі, застарілі матеріали, руйнування чи занепад конструкції та тріщини було обрано ОС яка має всі останні безпекові оновлення, та яка досі підтримується компанією-розробником Microsoft за допомогою патчів при виявленні нових бекдорів чи системних вразливостях - Windows 10. В якості середовища розробки обрана мова програмування Python, яка добре підходить для розробки алгоритмів машинного навчання, та має необхідні бібліотеки. [1, 2]

Була створена архітектури системи, яка складається з наступних основних модулів, кожен з яких виконує свою унікальну функцію:

- модуль машинного навчання, який відповідає за цикли навчання нейронної мережі шляхом прийняття на вхідні дані зображення цілих поверхонь покрівель будівель та пошкоджених дахів будинків та споруд;
- модуль обробки зображень, який масштабує, обрізає і нормалізує зображення;
- модуль включення відео-камери безпілотної та розпізнавання дефектів.

Модель виявлення пошкоджень на дахах будівель будувалася за допомогою Sequential API бібліотеки Keras. Для виявлення поверхні покрівлі споруди використовувались каскадні класифікатори з урахуванням ознак Хаара. Модель ЗНМ

разом із каскадним класифікатором навчалася протягом 30 циклів із двома класами, одне із яких позначає клас зображень із дефектами на дахах будівель, а інший – без жодних пошкоджень поверхні покрівлі будинків. [5]

Запропонована система дозволяє вирішити задачу моніторингу стану поверхні структури покрівель будівель за допомогою сучасних безпілотних літальних апаратів і згорткових нейронних мереж мінімізуючи людський фактор та вартість цього процесу із можливістю перенаправлення збережених ресурсів на нагальніші потреби.

Перелік посилань

1. Hussain S. “Machine Learning Methods for Visual Object Detection” / Sabit Ul Hussain – 2012.
2. Нильсен М.А. Нейронні мережі та глибоке навчання. - Determination Press. - 2015.
3. Chung A. “Cloud Computed Machine Learning Based Real-Time Litter Detection using Micro-UAV Surveillance” / Ashley Chung, Sean Kim, Ethan Kwok, Michael Ryan, Erika Tan, Ryan Gamadia – 2018.
4. CS231n: Convolutional Neural Networks for Visual Recognition: <http://cs231n.github.io/neural-networks-1/>
5. About Keras: <https://keras.io/about/>.

Секція: ПРИКЛАДНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 666.11

В. Бобик

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКЛОПАКЕТУ

Ключові слова: склопакет; дистанційна рамка; герметик.

V Bobyk

MATERIALS FOR INCREASING THE THERMAL INSULATION CHARACTERISTICS OF THE DOUBLE-GLAZED WINDOW

Keywords: double-glazed window; remote frame ; sealant.

Склопакети є важливою частиною будь-якого сучасного будівельного проекту. Це необхідний крок для забезпечення енергоефективності та безпеки будівлі, захисту її від зовнішнього шуму [1]. На теперішній час в Україні широко використовують енергозберігаючі склопакети, в конструкції яких є принаймні одне енергозберігаюче скло, що дозволяє відповідати нормам щодо теплопровідності, передбачених ДСТУ [2].

Метою даної роботи є вироблення рекомендацій щодо можливості підвищення теплоізоляційних та експлуатаційних характеристик енергозберігаючих склопакетів на основі аналізу конструктивних особливостей та матеріалів, що застосовують при їх виготовленні.

Склопакет – це герметична конструкція, яка складається з двох (однокамерний) або трьох листів скла (двокамерний), розділених проміжком, який заповнений повітрям або інертним газом. По периметру між листами скла знаходиться тонка алюмінієва або пластикова дистанційна рамка з нанесеним на неї шаром бутилу для первинної герметизації та полісульфідом для вторинної герметизації, що запобігає витoku інертних газів і розгерметизації при проникненні вологи ззовні. В дистанційну рамку засипають молекулярне сито, яке є абсорбентом, що добре вбирає вологу - вода після поглинання залишається всередині гранул і не проникає назовні (рис.1) [2].



Рисунок 1. Конструкція однокамерного та двокамерного склопакету

Енергозберігаючий склопакет - це склопакет із спеціальним і-склом, на поверхню якого методом вакуумного напилення наносять тришарове покриття, яке складається з діелектрика і шарів срібла, що чергуються між собою. Таке скло є низькоемісійним оскільки покриття здатне забезпечувати захист із зовнішнього боку від УФ-променів та утримувати всередині приміщення довгохвильове теплове

випромінювання. Інсоляція такого скла становить 98%. Завдяки високим показникам опору теплопередачі енергозберігаюче скло застосовують для покращення енергозбереження в приміщенні [3].

Вартість енергозберігаючого склопакету вища, порівняно із звичайним, але витрати швидко окупаються за рахунок економії на обігріві. У приміщенні з такими вікнами значно комфортніше перебувати.

За інших рівних умов, у конструкції склопакету саме дистанційна рамка є елементом, за рахунок якого можна підвищити його теплоізоляційні та експлуатаційні характеристики. До теплоізоляційних матеріалів ставлять ряд вимог, основними з яких є низькі густина і теплопровідність, високі пористість та опір теплопередачі, ізотропність властивостей тощо.

З точки зору низької теплопровідності алюмінієву рамку доцільно замінити на сталеву. Незважаючи на те, що сталь має в 3 рази більшу густину, порівняно з алюмінієм, однак мала товщина рамки – 0,5 мм, висока міцність і низька теплопровідність ($58 \text{ Вт/м}^2 \times ^\circ\text{C}$) роблять сталь перспективним матеріалом для виготовлення дистанційної рамки. У випадку використання пластмасової рамки, теж є можливість знизити теплопровідність, замінивши полікарбонат на твердий поліуретан, який має в 10 разів нижчу теплопровідність і (в 10 разів нижчу, ніж у полікарбонаті). Причому його можна у вигляді пінополіуретану або поролону використати для заміни бітуму.

Підвищення показників енергоефективності склопакету можна досягти, замінивши бутіл, який має теплопровідність $0,09 \text{ Вт/м}^2 \times ^\circ\text{C}$, на інноваційний теплоізоляційний матеріал сфероліт з різними наповнювачам, теплопровідність якого не перевищує $0,0025 \text{ (Вт/ м}^2 \times ^\circ\text{C)}$

Сфероліт- це рідкий утеплювач, який є високов'язкою масою, що затримує молекули води, але пропускає молекули повітря, після нанесення утворює захисне покриття з гідрофобними властивостями. Сфероліт має властивість відбивати теплові потоки променів, утворюючи герметичний шар і забезпечуючи хорошу теплоізоляцію [4]. Керамічні кульки сфероліту відбивають тепло, створюючи ендотермічний ефект, завдяки цьому досягається підвищений комфорт у приміщенні.

Фізико-механічні та експлуатаційні властивості сфероліту:

- міцність на розрив $0,85 \text{ МПа}$;
- паропроникність не більше ніж $0,02 \text{ мг/(м}^2 \text{ рік Па)}$;
- поглинання води за 24 годин, не більше ніж $15,0 \%$;
- температура експлуатації від -50 до $+220 \text{ }^\circ\text{C}$;
- високостійкий до перепадів температур;
- високостійкий до радіаційного та сонячного випромінювання;
- пожегобезпечний, не горючий;
- термін корисного використання – 20 років .

У змішаному стані компоненти герметика є гомогенною масою сірого кольору, яку наносять по периметру зовнішньої сторони дистанційної рамки.

Таким чином, заміна матеріалів усіх елементів дистанційної рамки сприятиме зниженню теплопровідності конструкції в цілому, підвищенню опору теплопередачі і створенню оптимального мікроклімату в приміщенні.

Перелік посилань

1. Ратушняк Г.С. Оцінювання енергоефективності світлопрозорих огорожувальних конструкцій будівель / Г.С.Ратушняк, О.Д.Панкевич, В.В.Панкевич // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2021. - № 2. – С. 81-87.

2. Національний стандарт України. Склопакети клеєні будівельного призначення : https://www.busel.ua/ru/UserFiles/Gosts/dstu_sklopaketi_2008.pdf

3. <https://wssystem.com.ua/produktsiya/sklopakety/>

4. <https://teplosystema.com.ua/ua/p200135873-zhidkaya-teploizolyatsiya-ferolit.html>

УДК 621. 793

Діана Глушкова¹, д.т.н., проф.; Володимир Большаков², д.т.н., проф.; Людмила Бодрова³, к.т.н., проф.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ГАЗОТЕРМІЧНИМ НАПИЛЕННЯМ

Анотація. Робота спрямована на вирішення проблеми підвищення довговічності поршневих кілець за допомогою сучасних методів поверхневої обробки. Досліджено вплив цих методів на зносостійкість і структурні зміни вкладишів підшипників. Особлива увага приділена розробці та аналізу нанесеного покриття методом дводротової металізації сталь-молібденовим покриттям, що має високу корозійну стійкість.

Ключові слова: поршень, сталь, довговічність, структура

Diana Hlushkova, Ph.D., Prof.; Volodymyr Bolshakov, Ph.D., Prof.; Liudmyla Bodrova, Ph.D., Prof.

WEAR RESISTANCE OF DETAILS WITH GAS THERMAL SPRAYING

Annotation. The study investigates the enhancement of piston ring durability using modern processing methods. Special attention is given to the analysis of steel-molybdenum coating, which exhibits high corrosion resistance.

Keywords: piston, steel, durability, structure

Розвиток сучасної сільськогосподарської техніки потребує покращення характеристик матеріалів, зниження витрати металу та підвищення ефективності й якості деталей. Особливу увагу привертає питання зносостійкості, зокрема поршневих кілець. Дослідження в цій галузі, як в Україні, так і за кордоном, а також позитивні результати їх використання, дозволяють широко впроваджувати прогресивні методи. Одним з актуальних завдань у машинобудуванні є підвищення зносостійкості поршневих кілець з високоміцного чавуну. Існуючі покриття для цих кілець часто не відповідають потребам. Тому розробка ефективних покриттів для поршневих кілець є важливим завданням.

Поломка поршневих кілець стає поширеною проблемою у більшості типів двигунів. Електролітичне хромування, широко використовуване в машинобудуванні, у багатьох випадках не відповідає вимогам, що ставляться до цих кілець. Пористий шар хрому, товщиною 40-50 мкм, витрачається за декілька сотень годин, після чого робоче навантаження призводить до спрацювання твердої основи. Електролітичний хром також не ефективний у високотемпературних умовах і може піддаватися вологій корозії.

Один з прогресивних методів зміцнення деталей циліндро-поршневої групи - це газоплазмове напилення. Умови роботи поршневих кілець вимагають індивідуального підходу до вибору покриттів. Хоча основні принципи отримання покриттів розроблені, ефективність кожного методу завжди залежить від зміни властивостей і структури матеріалів під час напилення. Для багатьох сплавів структура та властивості покриттів не завжди можуть бути передбачені. Тому потрібні широкі експериментальні дослідження структури і властивостей після напилення.

Були обрані ряд порошкових матеріалів для зміцнення поршневих кілець, які мають властивості, необхідні для умов роботи цих деталей та відповідають вимогам до

напилюваних матеріалів. Покриття зі сплавів, які самофлюсуються, зокрема ПНХСР, рекомендуються для стійкості до абразивного та ерозійного зношування в умовах корозії. Тому порошкові матеріали, такі як ПН73Х16СЗР3, ПН70Х17СХР4, які в чистому вигляді чи в комбінації з карбідами хрому, були взяті за основу для підвищення опору абразивному зношуванню поршневих кілець, виготовлених із сірого чавуну.

Структура часток шару свідчить про їх формування розплавленими частками, проте частки, які залишилися нерозплавленими, мають більші розміри і часто згруповані (рис. 1). Ці експериментальні дані свідчать про те, що низька щільність хромо-нікелевих покриттів пояснюється фізико-механічними властивостями самого сплаву у рідкому та твердому станах.

Зв'язок неоплавленого покриття із чавуном є незадовільним. На межі покриття та підкладки можна спостерігати чергування ділянок гарного та поганого контакту, а у деяких місцях зв'язок взагалі відсутній. Однак оплавлене покриття відзначається значним підвищенням щільності та відмінним зв'язком з підкладкою. Розрахунки показують пористість оплавленого покриття приблизно 1,3%.

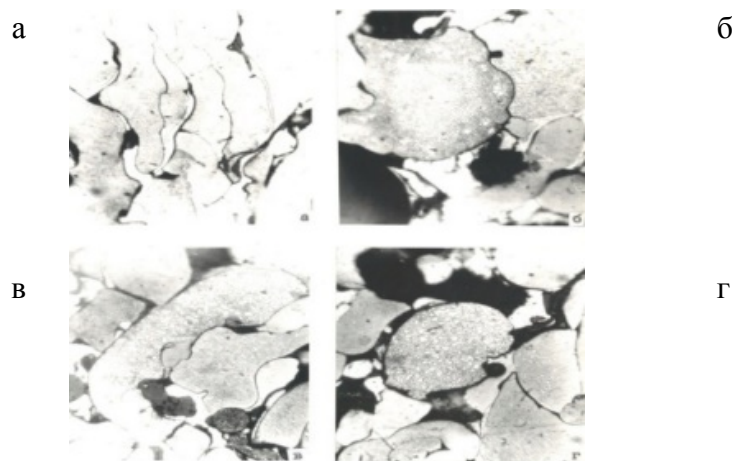


Рис. 1 – Структурні елементи неоплавленого покриття ПГСР4: а, в – деформовані частки; б, г – недеформовані частки.

Література не надає конкретних даних щодо структури досліджуваних сплавів системи Ni-Cr-Si-B з вуглецем і залізом. Відзначається лише, що їх висока твердість і зносостійкість пояснюються присутністю карбідів, боридів, карбоборидів у структурі. Зазвичай, хром, нікель і залізо повинні утворювати між собою тверді розчини. Кремній розчиняється в нікелі до 5% та в хромі до 1%, утворюючи ряд силіцидів хрому при більшому змісті.

Вуглець, ймовірно, взаємодіє з хромом і бором, оскільки нікель і кремній не утворюють карбідів. З хромом вуглець може утворювати карбіди у складі евтектик та перитетик.

Хоча характер перетворень у багатокомпонентній системі залежить від багатьох параметрів, основною структурою розглянутих сплавів повинен бути багатокомпонентний твердий розчин на основі нікелю. У роботі досліджено структуру та властивості такого сплаву в шарі і їх зміни під час деяких технологічних операцій.

Випробування на зносостійкість проводилися з метою підвищення тривалості служби поршневих кілець, які працюють в умовах високих ударних навантажень і абразивного зношування. Для порівняння використовувалася загартована ТВЧ сталь 38ХС. Експериментальні дані показали, що покриття сплавами Ni-Cr-Si-B значно підвищують зносостійкість виробів, зменшуючи при цьому зношування самої деталі. Додавання карбідів Cr_3O_2 більш ніж у три рази підвищує зносостійкість покриття порівняно зі сталлю 38ХС. Загартування покриттів з добавками карбідів хрому трохи знижує зносостійкість, але все-таки залишає її на високому рівні. Це свідчить про можливість термічної обробки виробу разом з покриттям, якщо потрібно.

УДК 621. 793

Діана Глушкова¹, д.т.н., проф.; Володимир Большаков², д.т.н., проф., Валерій Лазарюк³, к.т.н., доц.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

СТАЛЕМОЛІБДЕНОВЕ ПОКРИТТЯ, НАНЕСЕНЕ ГАЗОТЕРМІЧНИМ СПОСОБОМ

Анотація. Досліджене покриття, нанесене на поршневі кільця з високоміцного чавуну, забезпечує відмінну припрацьовуваність, низьку інтенсивність зношування та малий коефіцієнт тертя.

Ключові слова: покриття, припрацьовуваність, зношування

Diana Hlushkova, Ph.D., Prof.; Volodymyr Bolshakov, Ph.D., Prof.

STEEL-MOLYBDENUM COATING DEPOSITED BY THE GAS-THERMAL METHOD

Annotation. The investigated coating applied to the piston rings made of high-strength cast iron provides excellent conformability, low wear rate, and a low coefficient of friction.

Keywords: coating, workability, wear

Підвищення надійності та довговічності деталей машин є головною проблемою сучасного машинобудування. Відомі технології зміцнення мають недоліки, такі як зміна мікрогеометрії деталей, утворення напружень та екологічні проблеми.

Молібден, обраний як матеріал, має високу жаростійкість, корозійну стійкість, низький коефіцієнт теплового розширення, високу твердість і міцність при підвищених температурах. Це покращує якість покриття.

Метод дводрової металізації створює складну структуру покриття, де частинки сталі та молібдену розподіляються у шари з різною твердістю, що забезпечує високі антифрикційні властивості.

Поршневі кільця з сталєво-молібденовим покриттям групували в двадцять позицій і збирали в пристрої, що імітує втулку робочого циліндра, щоб уникнути розкриття замків. Робочі поверхні кілець мали канавки для покращення адгезії покриття.

Процес нанесення покриття включав попереднє очищення, дробеструйну обробку та напилення. Дробеструйна обробка збільшувала шорсткість основи, покращуючи адгезію покриття.

Молібденовий і сталевий дріт подавали з певною швидкістю. Покриття наносили електродуговим напиленням при температурі 150°C і товщині 0,8 мм. Після механічної обробки товщина покриття на готовому кільці становила $0,5 \pm 0,1$ мм.

Структуру сталєво-молібденового покриття досліджували за допомогою металографічного мікроскопа зі збільшенням 100-300 разів. Мікроструктура покриття типова для газотермічних шаруватих покриттів з рівномірно розташованими порами.

Промислове травлення зразків проводили реактивом Муракама, який виявляє структуру молібдену та інших тугоплавких матеріалів. Після травлення структура покриття складається з темних (молібден) і світлих (сталь) ділянок. Великодисперсна складова молібдену з'являється при більшому збільшенні через високі швидкості кристалізації в процесі нанесення. Крім основних фаз, в покритті є інші структурні компоненти, що утворюються від взаємодії матеріалів з киснем і азотом під час

плазмового напилення. Розмір пор покриття становить 5-10 мкм, що оптимально для поршневих кілець при значних силових і температурних навантаженнях. Пористість до 12% забезпечує підвищену витрату масла, що покращує припрацювання і роботу групи поршневих кілець.

Контроль міцності зчеплення покриття з підкладкою здійснювався на спеціальному приладі шляхом скручування групи кілець до моменту відшарування покриття при куті не менше 35°, що свідчить про задовільну адгезію. Вимірювання мікротвердості показало значення Н 550-590 для молібдену і Н 460-560 для сталі. Після випробувань на зношувальність мікротвердість молібдену підвищилася до Н 720-760, а сталі до Н 520-580.

Випробування антифрикційних властивостей показали, що сталєво-молібденове покриття не має адгезії до чавунної гільзи і забезпечує низький коефіцієнт тертя при високих навантаженнях. Зразки хромованих кілець витримували менші навантаження в жорстких умовах. У порівнянні з хромованими кільцями, сталєво-молібденове покриття має вищу стійкість до корозії та кращі антифрикційні характеристики. Випробування на довговічність показали, що сталєво-молібденове покриття є більш зносостійким і має менший коефіцієнт тертя.

Гістограми інтенсивності зношування за масою диска (вкладиша) і колодки (кільця) (рис.1) показують, що сталєво-молібденове покриття більш зносостійке, ніж електролітично хромоване. Аналіз результатів свідчить про кращу оброблюваність і меншу швидкість зношування сталєво-молібденових поршневих кілець, що підтверджує їхні хороші антифрикційні властивості.

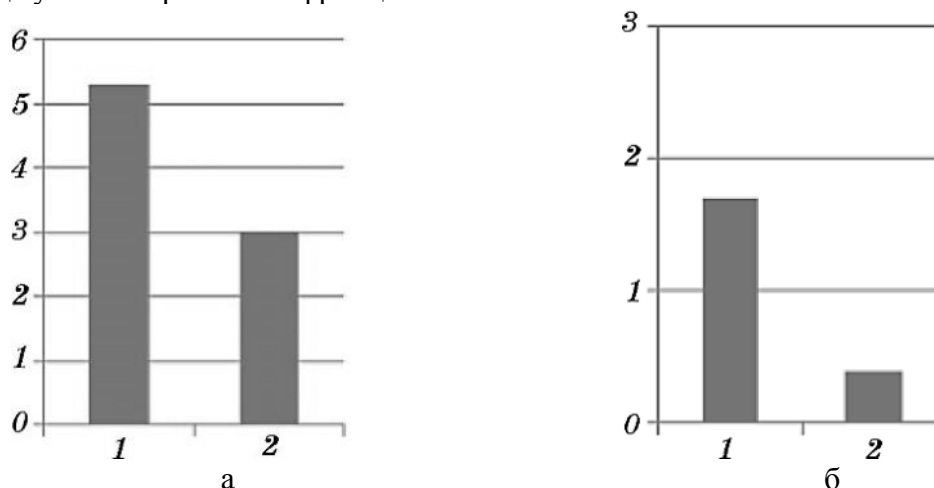


Рис. 1 – Гістограма інтенсивності зношувальності за масою колодок (кільця) (а) і диска (втулок) (б); 1—хромоване покриття; 2—сталемолібденове покриття.

На основі проведених досліджень можна зробити висновок про переваги сталєво-молібденового покриття поршневих кілець у порівнянні з хромованими. Структурний аналіз показав, що це покриття має гетерофазну структуру з рівномірно розташованими порами, що сприяє підвищеній витраті масла й позитивно впливає на процес припрацювання робочої пари. Крім того, сталєво-молібденове покриття демонструє менший коефіцієнт тертя на 20%, а також виявляється більш зносостійким, адже швидкість його зношування вдвічі нижча, ніж у випадку хромованих кілець. Покращена оброблюваність також є перевагою сталєво-молібденового покриття, що дозволяє ефективніше виготовляти та експлуатувати поршневі кільця. Цей комплекс властивостей свідчить про вищу стійкість до корозії та кращі антифрикційні характеристики сталєво-молібденових поршневих кілець у порівнянні з хромованими, роблячи їх більш ефективними у різноманітних умовах використання.

Ірина Воленко, к.т.н., доц.; Антон Зусін, к.т.н., доц.
Приазовський державний технічний університет, Україна

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ РОЗРОБЛЕНИМИ НАПЛАВНИМИ ДРОТАМИ З МЕТАСТАБІЛЬНИМ АУСТЕНІТОМ

Анотація. Ресурсозбереження є одним із найактуальніших, оскільки щорічно в різних галузях промисловості витрачаються сотні тисяч тонн металу на виготовлення запчастин і заміну деталей, які швидко зношуються. При цьому збільшуються прості агрегатів на заміну зношених деталей, знижується продуктивність машин і апаратів. Підвищення зносостійкості та ресурсу машин є актуальним завданням виробництва. Одним із ефективних напрямів її вирішення є відновлення деталей машин і інструментів та підвищення їх довговічності за допомогою електродугового наплавлення.

Ключові слова: структура наплавленого металу, твердість верхнього наплавленого шару, аустенітно-мартенситна структура.

Iryna Volenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Anton Zusin, Ph.D., Assoc. Prof.

THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE PERFORMANCE INDICATORS OF METAL DEPOSITED BY DEVELOPED DEPOSITED WIRES WITH METASTABLE AUSTENITE

Abstract. Resource conservation is one of the most relevant, since hundreds of thousands of tons of metal are spent every year in various industries to manufacture spare parts and replace parts that wear out quickly. At the same time, the downtime of units for replacement of worn parts increases, the productivity of machines and devices decreases. Increasing the wear resistance and service life of machines is an important task in production. One of the effective areas of its solution is the restoration of machine parts and tools and increasing their durability with the help of electric arc surfacing.

Keywords: the structure of the deposited metal, the hardness of the upper deposited layer, the austenite-martensitic structure.

Ресурсозберігання є однією з найбільш актуальних, оскільки в різних галузях промисловості щорік витрачаються сотні тисяч тонн металу на виготовлення запасних частин і заміну ними деталей, що швидко зношуються. При цьому, збільшуються прості агрегатів на заміну зношених деталей, знижується продуктивність машин і апаратів. Підвищення зносостійкості і терміну служби машин важливе завдання у виробництві. Одним з ефективних напрямів її рішення є відновлення деталей машин, інструменту і підвищення їх довговічності за допомогою електродугового наплавлення. У багатьох випадках для цього використовуються дефіцитні і дорогі легуючі матеріали, що обумовлює високу вартість деталей. Вирішувати дану проблему можливо шляхом розробки нових наплавлювальних матеріалів, які забезпечують підвищення експлуатаційних характеристик.

Структуру та властивості наплавленого металу можна ефективно змінювати за допомогою термічної обробки. Проведені раніше дослідження щодо вибору оптимального температурного режиму термообробки були використані для розроблених наплавних матеріалів. Проводились дослідження впливу відпуску на зносостійкість наплавленого металу. Низькотемпературний відпуск зазвичай використовується з метою зменшення термічної та структурної напруги в наплавленому металу отриманих у процесі наплавлення. Відпуск проводили

безпосередньо після наплавлення металу розробленими порошковими дротами. Наплавлений метал після наплавлення має переважно аустенітну структуру в поверхневому шарі.

Відпуск проводили за температур від 200 до 650°C, з витримкою протягом 1 години і подальшим охолодженням на відкритому повітрі. Відпуск у температурному діапазоні від 400 до 650°C призводить до виділення карбідів на кордонах зерен і в їхньому обсязі. Структура наплавленого металу в поверхневому шарі переважно залишається без змін і відповідає аустенітній. Заміри твердості в поверхневому шарі наплавленого металу проводили на твердомірі за Роквеллом, результати представлені на рисунку 1.

Твердість верхнього наплавленого шару за температури відпуску, що дорівнює 650°C, становить HRC 27...35, що відповідає аустенітно-мартенситній структурі. Зі зростанням глибини наплавлення, зростає твердість HRC до 33...35, що відповідає мартенситній структурі.

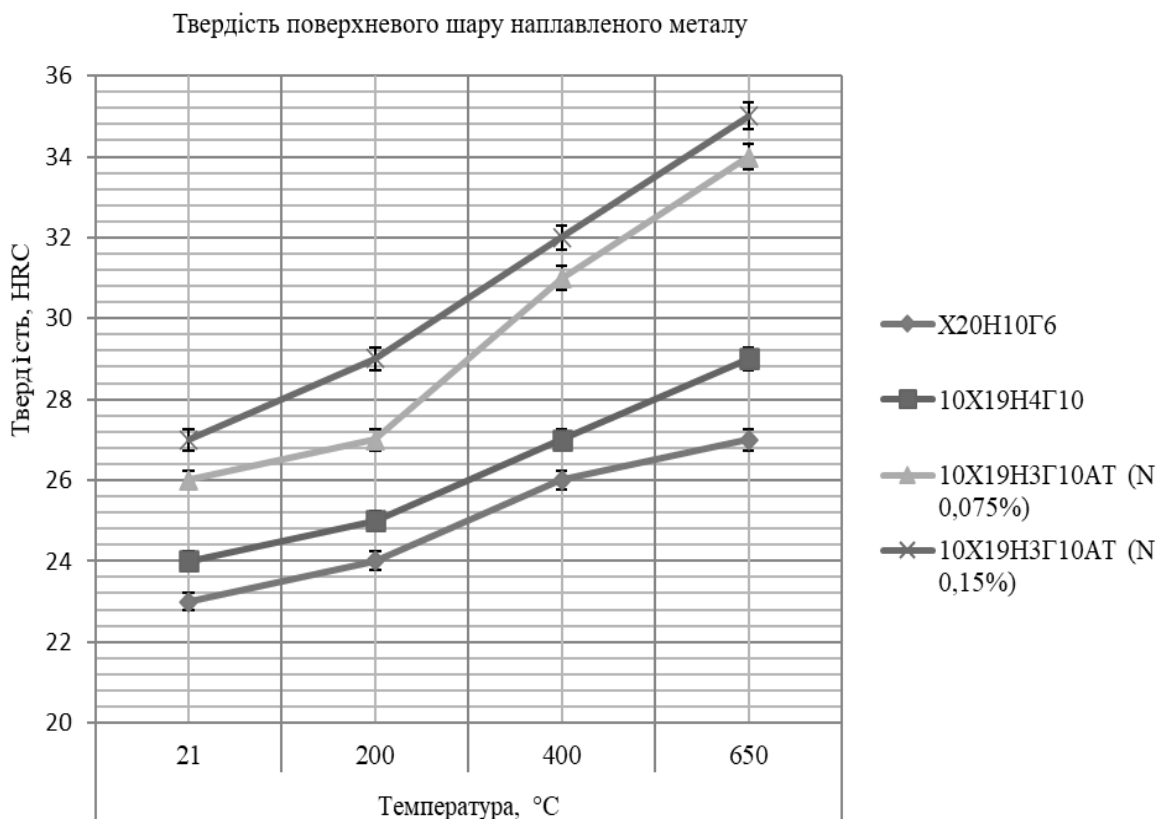


Рисунок 1 – Зміни твердості поверхневого шару наплавленого металу порошковими дротами, що випробовуються

З підвищенням температури відпуску в досліджуваному інтервалі збільшується кількість карбідів у наплавленому металі, що, своєю чергою, призводить до збіднення аустеніту вуглецем і легуючими елементами, що містяться в наплавленому металі. Ці чинники сприяють зменшенню стабільності аустеніту в поверхневому шарі та більшому виділенню карбідів. Підвищена дестабілізація аустеніту сприяє інтенсивнішому динамічному мартенситному перетворенню в процесі навантаження і самозміцнення.

Метал наплавлений порошковими дротами, що випробовуються, був підданий випробуванням на холодну пластичну деформацію, з метою визначення схильності до

самозміцнення, під впливом деформаційного навантаження, за допомогою металевої кульки. Потім в отриманому відбитку заміряли твердість за Брінелем.

Результати вимірів представлені на рисунку 2.

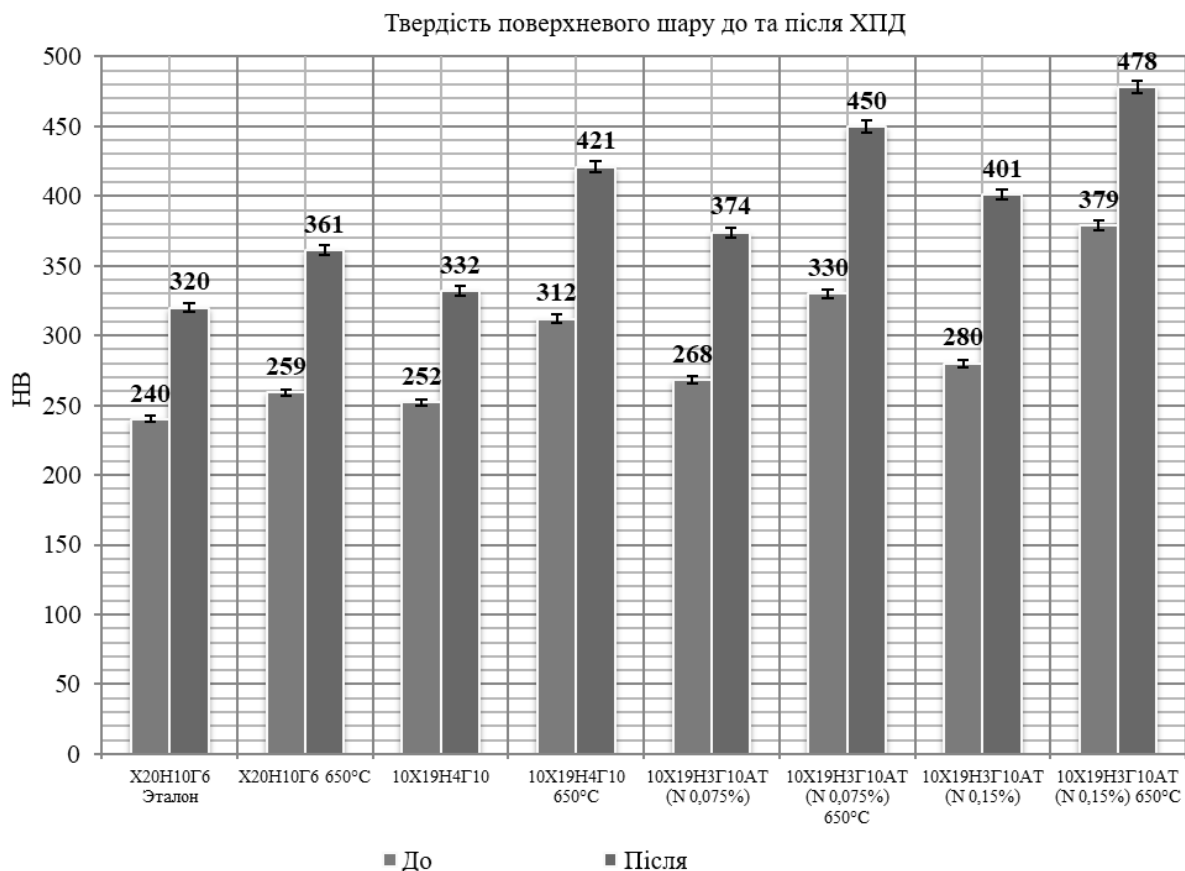


Рисунок 2 – Результати зміни твердості багат шарового наплавлення порошковими дротами, що випробовуються до і після ХПД

У результаті випробувань зразків наплавленого металу на холодно-пластичну деформацію, твердість наплавленого металу значно зростає, що свідчить про самозміцнення, за рахунок динамічного мартенситного перетворення в поверхневому шарі металу. Наплавлений метал не підданий низькотемпературному відпуску має нижчі показники самозміцнення. Більш висока температура відпуску призводить до більшого ступеня дестабілізації аустеніту і більш інтенсивного підвищення твердості при навантаженні. Відпуск за 650°C призводить до підвищення зносостійкості наплавленого металу за різних видів зносу.

УДК 621. 793

Діана Глушкова¹, д.т.н., проф.; Володимир Большаков², д.т.н., проф.; Галина Крамар³, к.т.н., доц.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ІОННО-ПЛАЗМОВЕ НАПИЛЕННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПРЕС-ФОРМ

Анотація. У роботі досліджено можливість використання іонно-плазмового напилення для обробки поверхні прес-форм. Це дозволяє замінити дорогі вольфрамвмісні сталі іншими матеріалами. Особливо ефективним виявилось застосування покриття нітриду титану, отриманого при тиску азоту 1 Па, яке надійно захищає робочі поверхні деталей прес-форм від руйнування. Лабораторні випробування показали, що нанесене при оптимальних технологічних параметрах покриття нітриду титану забезпечує збільшення корозійної стійкості деталей прес-форм в 3 рази та стійкості до оксидування у 2–4 рази.

Ключові слова: покриття, поверхня, фаза, зміцнення, параметри

Diana Hlushkova, Ph.D., Prof.; Volodymyr Bolshakov, Ph.D., Prof.; Halyna Kramar, Ph.D., Assoc. Prof.

ION PLASMA SPRAYING FOR THE PROTECTION OF PRESS MOLDS

Annotation: The paper considers the use of ion-plasma sputtering for the surface treatment of molds, which allows replacing expensive tungsten-containing steels. The titanium nitride coating, obtained at a nitrogen pressure of 1 Pa, effectively protects the working surfaces of the mold parts from destruction. It provides an increase in corrosion resistance by 3 times and oxidation resistance by 2-4 times, as shown by laboratory tests.

Keywords: coating, surface, phase, strengthening, parameters

Метод лиття під тиском, хоча дозволяє отримувати вироби високої точності та підвищує продуктивність, має недолік у низькій стійкості прес-форм. Понад 30% собівартості виливків витрачається на компенсацію зносу оснастки. Термічна втома приводить до руйнування прес-форм, що особливо актуально під час нагрівання та охолодження, спричинюючи тріщини розпалу. Для підвищення стійкості прес-форми використовують хімічні методи обробки, але це лише частково підвищує стійкість (на 20-30%).

Нові сталі, такі як 4X5B2C, 4X2B2MФC, 4X4BMФC, дозволяють зменшити використання високовольфрамової сталі 3X2B8Ф, що зараз є основним матеріалом для прес-форм лиття під тиском. Однак ці деталі виявляють низьку стійкість і містять вольфрам.

Це підкреслює важливість робіт щодо створення поверхневого шару з низькою теплопровідністю, гарною адгезією до основного металу, низькою адгезією до металу виливки, високою зносостійкістю та корозійною стійкістю.

Використання плазмових покриттів зі зносостійких матеріалів виявляє широкі можливості. Методи нанесення таких покриттів різноманітні, але перевагу слід віддати методу іонного бомбардування, оскільки він дозволяє регулювати температуру процесу та наносити покриття на деталі різних матеріалів. Хоча використання цього методу для прес-форм не досліджувалося, він може бути перспективним, оскільки дозволяє отримувати покриття з необхідними характеристиками та регулювати їх склад.

Поверхневі шари деталей прес-форм, захищені плазмовим покриттям, зазнають температурних коливань до 650°C, що аналогічно тим, що виникають під час лиття алюмінієвих та цинкових сплавів. Матеріал для підкладки підбирали з

напівтеплостійких сталей, які не містять вольфрам і відповідають вимогам щодо підкладки для покриття нітриду титану.

Для прес-форм обрали сталі 4Х5МФС та 5ХНМ. Покриття наносили методом конденсації речовини в умовах іонного бомбардування (КІБ) на установці "Булат-3Т"(рис. 1). Цей метод забезпечує стабільність властивостей, низьку пористість та міцне зчеплення з підкладкою.

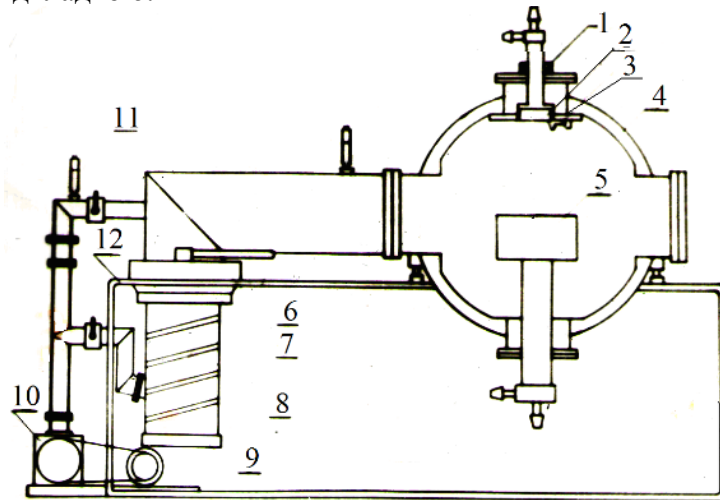


Рис. 1 – Загальна схема установки «Булат-3Т»: 1 – котушка, що фокусує; 2 – катод; 3 - підпалювальний електрод; 4 – камера-анод; 5 – підкладка; 6 – азотна пастка; 7 – водяна пастка; 8 – високовакуумний агрегат; 9 – нагрівач; 10 – форвакуумний насос; 11 – манометрична лампа; 12 – система водяного охолодження установки

Час нанесення покриття на установці "Булат-3Т" варіювався від 12 до 30 хвилин, з урахуванням оптимальної швидкості нанесення покриттів TiN, яка складала 10 мкм/год. Товщина покриття нітриду титану, що найбільш активно взаємодіє з підкладкою і підвищує термічну стійкість сталей 4Х5МФС і 5ХНМ, коливалася від 2 до 5 мікрон.

Гартування вибраних марок сталі проводили при температурах, що дозволяли розчинення більшої частини карбідів та отримання високолегованого мартенситу, зберігаючи при цьому дрібне зерно та достатню в'язкість. Після гартування сталі піддавались високотемпературному відпуску з метою підвищення ударної в'язкості та меж витривалості. Цей процес сприяв додатковому зміцненню внаслідок дисперсійного твердіння, супроводжуваний виділенням дрібних карбідів і досягненням твердості 42–45 HRC.

Лабораторні випробування показали, що покриття нітриду титану, нанесене за оптимальних технологічних параметрах, значно підвищує корозійну стійкість деталей прес-форм, на які воно нанесено, втричі, а окалиностійкість - у 2-4 рази.

Загальний висновок з отриманих результатів полягає в тому, що максимальна стійкість деталей прес-форм з плазмовими покриттями досягається при розігріванні робочої поверхні при іонному бомбардуванні до високих температур, але не вище за температуру відпуску матеріалу прес-форм. Це необхідно для забезпечення хорошої адгезії покриття з підкладкою, а також при подальшій конденсації на цю розігріту поверхню покриття з мінімальним вмістом краплинної фази для запобігання налипання покриття на матеріал виливки.

У разі нанесення покриття нітриду титану на установці "Булат-3Т" на робочі поверхні деталей прес-форм, виготовлених з економнолегованих сталей, найкраща адгезія покриття до підкладки, мінімальна взаємодія його з розплавом латуні, а також значне підвищення термічної витривалості матеріалу підкладки досягається при розігріванні до температури 500 °С та конденсації покриття при парціальному тиску азоту 1 Па.

УДК 621.791.754

**Тарас Майданчук¹, к.т.н., с.досл.; Анатолій Бондаренко¹; Євгенія Лук'янченко¹;
Сергій Мариненко², к.т.н., доц.; Валентин Ілюшенко¹, Дмитро Степченко¹**

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ЗВАРЮВАНOSTІ МІДНО-НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ІЗ ВМІСТОМ НІКЕЛЮ ДО 6,0%

Анотація. По результатам проведених досліджень встановлено, що найбільш схильні до утворення тріщин мідно-нікелеві сплави (з вмістом нікелю до 6,0%), в складі яких присутні до 1,0% алюмінію та домішки фосфору. Визначено, що найвищою стійкістю проти утворення пор мають сплави, в складі яких присутні до 0,9% алюмінію або до 0,9% марганцю.

Ключові слова: мідно-нікелеві сплави, зварювання, зона термічного впливу (ЗТВ), механічні властивості, структура, тріщини, пори.

Taras Maydanchuk, Ph.D.; Anatolii Bondarenko; Yevheniia Lukianchenko; Sergiy Marynenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Valentin Ilyushenko; Dmytro Stepchenko

SOME ISSUES OF WELDABILITY OF COPPER-NICKEL ALLOYS WITH NICKEL CONTENT UP TO 6.0%

Abstract. Based on the results of the research, it was established that copper-nickel alloys (with a nickel content of up to 6.0%), which contain up to 1.0% of aluminum and phosphorus impurities, are most prone to cracking. It has been determined that alloys with up to 0.9% aluminum or up to 0.9% manganese have the highest resistance against the formation of pores.

Keywords: copper-nickel alloys, welding, heat affected zone (HAZ), mechanical properties, structure, cracks, pores.

Мідно-нікелеві сплави мають чудове поєднання хорошої стійкості до корозії і низької схильності до прикріплення морських організмів в морській воді. Тому дані сплави є очевидним вибором для трубопроводів, систем протипожежного водопостачання, теплообмінників та інженерних споруд в суднобудуванні, а також для захисту зони розбризкування нафти і газу на ніжках морських платформ[1].

За кордоном найбільш широко використовуються дві основні марки мідно-нікелевого сплавів, що використовуються в морській техніці – 90-10 (10% нікелю) і 70-30 (30% нікелю) [2-5]. Однак у вітчизняному суднобудуванні широко використовуються мідно-нікелеві сплави марок МНЖ 5-1, МН-5, БС-3 з вмістом нікелю не більше 6,0%.

В даний час для з'єднання мідно-нікелевих сплавів використовують пайку (brazing), зварювання покритими електродами (ММА), в захисних газах плавким (MIG) та неплавким (TIG) електродами. Слід зазначити, що найбільш поширеним способом зварювання мідно-нікелевих сплавів є TIG-зварювання. При цьому не завжди забезпечується отримання якісних зварних швів, що пов'язане, на наш погляд, із обмеженою кількістю даних по зварюваності мідно-нікелевих сплавів. Як відомо, зварюваність мідних сплавів залежить від кількості основних легуючих елементів та присутності в сплаві шкідливих домішок, таких як Zn, C, Pb, S і P.

Для сплавів 90-10 та 70-30 вміст домішок визначений іноземними матеріалознавцями.

Дані щодо впливу шкідливих домішок на тріщиностійкість та пороутворення при зварюванні сплавів (з вмістом нікелю до 6%) марок МНЖ5-1, МН-5 та БС-3 відсутні.

Тому метою даної роботи є дослідження схильності до утворення тріщин та пор в зварних швах при аргонодуговому зварюванні Cu-Ni сплавів з вмістом нікелю до 6,0 % (див. табл. 1) в залежності від складу захисного газу та наявності різної кількості легуючих та шкідливих домішок.

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних мідно-нікелевих сплавів

Тип сплаву	Маркування зливка	Хімічний склад сплаву, %						
		Ni	Mn	Fe	Al	Si	P	Cu
МНЖ5-1	1584-2	5,05	0,82	0,6	-	-	0,022	зал.
МН-5	1591-2	4,05	0,28	0,02	-	-	0,005	зал.
МНЖ5-1	1591-3	4,0	0,15	0,96	-	-	-	-
БС-3	1617-1	6,02	0,92	1,14	0,87	0,11	0,15	-

Схильність до утворення тріщин в металі шва та ЗТВ мідно-нікелевих сплавів(до 6,0 % Ni)

В дослідній роботі вивчали мідно-нікелеві сплави, в складі яких до 6,0% нікелю та до 1,0% марганцю, алюмінію та заліза.

Схильність до утворення гарячих тріщин в металі шва визначали, зварюючи зразки постійної ширини малих розмірів при однаковому струмі та напрузі на дузі але при різних швидкостях зварювання, що забезпечують повне проплавлення зразка. Показником схильності металу шва до утворення тріщин є критична (мінімальна) швидкість зварювання, вище якої в шві з'являються тріщини. Чим більше ця швидкість, тим вище стійкість проти утворення тріщин.

Методика оцінки схильності металу до утворення тріщин в ЗТВ наступна: тест «Houldcroft» проплавають з неповним проваром вольфрамовим електродом в середовищі аргону на різних погонних енергіях по осі зразка. Наявність тріщин фіксується в ЗТВ у поперекових та повздожніх надрізах.

Критерієм оцінювання стійкості металу проти утворення тріщин слугує мінімальна погонна енергія, яка викликає в ЗТВ тріщину, у поздовжньому надрізі на зворотній стороні зразка.

Аналіз характеру та поверхні зломів зразків, а також мікроструктури швів та ЗТВ показує, що тріщини як в металі швів, так і в ЗТВ являються міжкристалічними.

Встановлено, що найбільш схильні до утворення тріщин сплави, в склад яких входить алюміній. Причому алюміній підвищує схильність до утворення тріщин як в металі шва, так і в ЗТВ. На наш погляд, механізм впливу алюмінію на утворення тріщин пов'язаний з проявленням ефекту адсорбційного зниження пластичності та міцності. З фізико-хімічної механіки відомо, що зміцнення сплаву збільшує вірогідність проявлення адсорбційного зниження пластичності та міцності, а алюміній, суттєво не впливаючи на характер кристалізації, зміцнює сплав, утворюючи інтерметалідні з'єднання з нікелем, і тим самим збільшує схильність до утворення тріщин при зварюванні.

Варто також відзначити, що при зварюванні зразків із сплаву БС-3 поряд з тріщинами в металі шва утворюються поперекові тріщини в основному металі, що

беруть початок як в ЗТВ, так і в металі шва, та поширюються до бокових кромок зразка по всій його товщині. Досить високу схильність до утворення тріщин сплаву МНЖ5-1 (з вмістом фосфору 0,022%) можна пояснити саме високим вмістом фосфору. Особливо це помітно при малих швидкостях зварювання, коли умови ліквідації більш сприятливі.

Схильність до утворення пор мідно-нікелевих сплавів(до 6,0 % Ni)

Для визначення впливу різних газів на пористість були виготовлені бінарні суміші аргону з додаванням азоту, кисню, вуглекислого та природного газів в концентраціях до 5,0 %. Виконувалось зварювання стикових з'єднань та проплавлення основного металу. За показник стійкості приймали концентрацію газу. Чим більший вміст досліджуваних газів, при якому пори у швах відсутні, тим більше стійкість сплаву до утворення пор.

Помічено, що при простому проплавленні зразків пористість значно менша, ніж при зварюванні стиків, що зумовлено наявністю газів та домішок, абсорбованих на торцях зварюваних кромок стику.

В результаті проведених досліджень встановлено, що природній газ практично не викликає пор як при проплавленні зразків, так і при зварюванні стиків.

Оскільки при зварюванні вольфрамовим електродом в сумішах з додаванням кисню (більше 0,5%) та CO₂(більше 3,0%) відбувається швидке обгорання робочої частини вольфрамового електроду, оцінку схильності до утворення пор різних сплавів виконували у сумішах Ag+N₂(вміст азоту 0,1...5,0%) та Ag+O₂(кисню не більше 0,5%). Із дослідів випливає, що мідно-нікелеві сплави найбільш схильні до утворення пор від азоту.

Встановлено, що найбільшою стійкістю проти утворення пор від кисню (об'ємна доля газу варіювалась в межах 0,1...0,5%) мають сплави, в складі яких присутні активні розкислюючі елементи – до 0,9% Mn або Al. Азот більш негативно впливає на щільність швів мідно-нікелевих сплавів (до 6,0% Ni). Проте при наявності в сплавах нітридоутворюючих елементів можливе отримання щільних швів навіть при вмісті в захисному газі до 5% азоту.

Результати проведених досліджень можуть бути використані при розробці спеціальних марок добре зварюваних мідно-нікелевих сплавів з вмістом нікелю до 6,0 %, а також при створенні нових зварювальних матеріалів – присадних дротів, покритих електродів та ін.

Перелік посилань

1. Copper Development Association, Copper-Nickel Welding and Fabrication, Copper Development Association Inc. Publication A7020-99/13, Revised in February 2013 2nd edition Nickel Institute Publication 12014, February 2013.
2. Pulsed Gas Metal Arc Welding of Copper-nickel Pipe Joints. Nick Kapustka, Paul Blomquist, EWI All Rights reserved. 2017
3. K. Lahti, J. Lukkari, "Welding of Copper-Nickel Alloys at Kvaerner Masa-Yards", Svetsaren, No. 2, 2002 9–10.
4. P. Ferro, F. Bonollo, A. Tiziani, Laser welding of copper-nickel alloys: a numerical and experimental analysis, Science and Technology of Welding and Joining 10 (3) (2005)299–310.
5. J.H. Devletian, M.J. Sullivan, Flux Cored Arc Welding of CuNi 90/10 Piping with CuNi70/30 Filler Metal, https://www.nsrp.org/wpcontent/uploads/2015/09/Deliverable-All Position Flux Cored Electrode Final Report. Portland_State_University.pdf 2006.

УДК 631.3.55

Марія Паньків¹, к.т.н., доц.; Віктор Барановський¹, д.т.н., проф.; Віталій Паньків¹, к.т.н., доц.; Сергій Мариненко¹, к.т.н., доц.; Г. Герасимчук², к.т.н., доц.

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

²Луцький національний технічний університет, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТАНГЕНЦІАЛЬНОЇ СИЛИ ПРУЖНОГО УДАРУ

Анотація. Руйнування або пошкодження матеріалу, яке виникає під час пружного удару є наслідком контактної взаємодії двох тіл – робочого органу машини та, наприклад, продуктів рослинництва галузі аграрного виробництва. Це значно погіршує якість продукту та економічну ефективність його виробництва. Тангенціальна сила, яка є складовою сумарної сили контакту двох тіл, відіграє також свою руйнівну роль в процесі пошкодження продукту. В статті наведено теоретичний аналіз кількісної оцінки впливу i -х дій тангенціальної сили удару по оброблюваному продукту.

Ключові слова: продукт, контакт, удар, пошкодження, сила, пляма, цикл, імпульс.

Maria Pankiv, Ph.D., Assoc. Prof.; Viktor Baranovsky, Ph.D., Prof.; Vitaliy Pankiv, Ph.D., Assoc. Prof.; Serhij Marinenko, Ph.D., Assoc. Prof.; H. Gerasimchuk, Ph.D., Assoc. Prof.

MODELING OF TANGENTIAL FORCE OF ELASTIC IMPACT

Abstract. The destruction or damage of the material that occurs during an elastic impact is the result of the contact interaction of two bodies - the working body of the machine and, for example, the products of crop production in the field of agricultural production. This significantly worsens the quality of the product and the economic efficiency of its production. The tangential force, which is a component of the total contact force of two bodies, also plays its destructive role in the process of product damage. The article provides a theoretical analysis of the quantitative assessment of the impact of tangential impact force on the processed product.

Keywords: product, contact, impact, damage, force, flame, cycle, momentum.

Ударна взаємодія робочого органу машини та матеріалу (в подальшому продукту обробки) проявляється у вигляді механічного контакту двох тіл і визначається імпульсом прискорень, середньою у часі контактною силою, різкістю удару та максимумом сумарної сили контакту [1].

В загальному випадку під час механічного удару жорсткого робочого органу машини по менше міцному продукту обробки виникають і інтенсифікуються нормальний S_n і тангенціальний S_τ ударні імпульси, які реалізуються за допомогою змінних в часі виникаючих нормальної F_n та тангенціальної F_τ сил, які прикладені до двох тіл.

Таким чином, щоб оцінити результати впливу силової дії робочого органу на продукт обробки необхідно визначити та проаналізувати ці складові сили контакту двох тіл. Технологічні вимоги до процесів виробництва корисного суспільного продукту, при яких робочий органа наносить удар по продукту обробки, визначають кількісні та якісні умови реалізації складових сил контактної взаємодії двох тіл. Це служить основою при виборі динамічних режимів роботи робочого органу або ударного тіла [2]. При цьому, ударна взаємодія двох тіл відбувається при дискретному механічному контакті та починається в момент їх дотику в точці найбільш високих виступів-нерівностей.

Дотик в такій точці контакту двох тіл є основною точкою дотику, або основною точкою удару, а навантаження удару, яке формується в результаті механічного контакту оцінюється повною змінною нормальною силою удару.

На основі моделі пружного удару [3] ця сила складається з двох компонентів $F_n^{(1k)}$ і $F_n^{(2k)}$, при чому

$$\left. \begin{aligned} F_n^{(1k)} &= C_m (\delta_{np} + \delta_{nl})^\alpha; \\ F_n^{(2k)} &= \mathcal{G}_{\delta_{np}} \gamma dV_n / dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де C_m , α – постійні коефіцієнти, які визначаються залежно від механічних характеристик тіл співудару; δ_{np} , δ_{nl} – відповідно, пружна та пластична деформація в точці контакту двох тіл; $\mathcal{G}_{\delta_{np}}$ – швидкість пружної деформації в точці удару; γ – щільність продукту обробки; dV_n / dt – змінний об'єм деформованих частин продукту, який залежить від швидкості розповсюдження зміни внутрішньої границі продукту в процесі пружної та пластичної деформації в зоні контакту.

Тоді повна (сумарна) сила F_n удару згідно (1) становить

$$F_n = C_m (\delta_{np} + \delta_{nl})^\alpha + \mathcal{G}_{\delta_{np}} \gamma dV_n / dt. \quad (2)$$

Нормальна F_n та тангенціальна F_τ сили прикладені в основній точці удару двох тіл. Під час удару доволі жорсткого робочого органу, який рухається з нормальною \mathcal{G}_n та тангенціальною \mathcal{G}_τ відносними швидкостями в природній системі координат, входить в контакт в основній точці дотику з продуктом обробки та під дією набутої ним кінетичної енергії викликає пружну та пластичну деформацію дотичних нерівностей поверхні ударяючого (робочого органу) та ударного (оброблювальний продукт) тіл.

Нормальна пружна δ_{np} та пластична δ_{nl} деформація нерівностей під час формування механічного контакту двох тіл є результатом їх стиснення нормальною силою F_n . При такому зближенні основна точка дотику генерується в пляму контакту. У процесі подальшого зближення двох ударних тіл в дотик входять нові нерівності, які мають виступи відносно меншої висоти. Це збільшує кількість одиничних плям контакту та сумарну фактичну площу плям, що в свою чергу зменшує тиск на ці плями. Відносне зближення двох ударних тіл припиняється тоді, коли навантаження на контакт, що формується дорівнює його несучій здатності.

Деформація зсуву являє собою місцеву деформацію контактуючих нерівностей плям контакту, які формуються в тангенціальному напрямку.

Дотичне напруження τ_{1k} одиничної плями контакту при відсутності тангенціального проковзування буде дорівнювати

$$\tau_{1k} \leq f_m \sigma_n, \quad (3)$$

де f_m – коефіцієнт тертя ковзання при відсутності тангенціального проковзування на всій площі одиничної плями контакту (коефіцієнт тертя спокою); σ_n – нормальне напруження плями контакту.

Вважається, що коефіцієнти f_m кожної одиничної плями контакту є постійними та рівними між собою [4]. Тоді в зоні тангенціального ковзання плям контакту виконується умова

$$\tau_{2k} > f_g \sigma_n, \quad (4)$$

де f_g – коефіцієнт тертя ковзання при тангенціальному проковзуванні на всій площі одиничної плями контакту (коефіцієнт тертя руху).

При цьому, приймаємо, що характер зміни коефіцієнта f_g кожної одиничної плями контакту однаковий. При формуванні наступних плям контакту дотику під впливом нормальної сили F_n значно зростає тангенціальна сила F_τ , яка має лінійну залежність відносно сили F_n . Сила F_τ передається силами тертя від ударяючого робочого органу ударному продукту переробки через плями контакту, що формуються, а з збільшенням тангенціальної сили F_τ зростають напруження зсуву одиничної плями контакту.

При виконанні умови (3) площа одиничної плями контакту являє собою зону фрикційного зчеплення [4], а коли відбувається перехід від умови (3) до умови (4) – на одиничній плямі контакту збільшується зона тангенціального ковзання за рахунок зменшення зони фрикційного зчеплення.

Якщо сила F_τ одиничної плями контакту більше сили тертя F_m цієї плями (за умови $F_m = f_m F_{1c}$, де F_{1c} – сила стиснення однієї плями контакту), тоді зона тангенціального ковзання охоплює всю її площу [4]. В цьому випадку тангенціальне проковзування $[\delta_\tau]$ досягає граничного значення та визначається за формулою

$$[\delta_\tau] = 3(2 - \mu) / 8Gr_k, \quad (5)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона; G – модуль зсуву продукту обробки; r_k – середній еквівалентний радіус плями контакту.

При подальшому збільшенні тангенціальної сили F_τ яка діє на одиничну пляму контакту за умови $F_\tau \geq F_{1\tau}$ при $F_n = const$, починається проковзування цієї плями по всій його площі [4]. При цьому приймаємо, що за такої еволюції плями контакту тіл співудару їх основні числові характеристики залишаються незмінними.

Тоді, при нормальному та тангенціальному навантаженні на фрикційний контакт, в ньому поряд з акумуляцією механічної енергії при пружній деформації дотичних нерівностей тіл контакту відбувається їх дисипація. Джерело її появи в одиничних плямах контакту тіл дотику при їх тангенціальному проковзуванню є пружний гістерезис, який реалізується за допомогою сил тертя в зоні знакоперемінного відносного ковзання плям контакту.

Подальший кількісний аналіз дисипативної енергії ΔW в одиничній плямі контакту, кінетичної енергії та роботи системи з врахуванням загального числа N активних циклів знакоперемінного тангенціального навантаження контактною силою F_τ дозволить розробити залежності, які будуть основою для кількісної оцінки тангенціальної сили удару робочого органу машини по продукту обробки за якогось реалізується тангенціальний ударний імпульс.

Перелік посилань

1. Войтюк Д.Г. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник; за ред. Д. Г. Войтюка / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін. К.: Вища освіта, 2005. 464 с.
2. Baranovsky V., Truhanska O. Pankiv M., Bandura V. Research of a contact impact of a root crop with a screw auger. Research in Agricultural Engineering, 2020. Vol. 66. No 1. P. 33–42.
3. А.С. Бабенко, М.І. Бобир, С.Л. Бойко [та ін.]. Теорія пружності. Київ : Основа, 2009. 244с.
4. Павловський М.А. Теоретична механіка. Вид. Техніка, Київ. 2002 р. 510 с.

УДК УДК 621.793.72

**Володимир Гвоздецький, к.т.н., с.досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.;
Олександра Студент, д.т.н., проф.; Христіна Задорожна, к.т.н.; Олександр
Лук'яненко, к.т.н.; Нестор Мозола**
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ, НАПИЛЕНИХ РІЗНОТИПНИМИ ДРОТАМИ

Анотація. Досліджено абразивну зносостійкість та трибологічні характеристики електродугових покриттів із різнотипних електродних дротів. У покриттях, напилених суцільним сталевим дротом (сталі 08Св або 65Г) у парі з порошковим дротом 90Х17Р2ГС, формувалась м'яка (150...450) HV_{0,1} та тверда (600...1000) HV_{0,1} матриці. Зносостійкість таких покриттів була в 1,3...1,4 рази вищою ніж покриття з однотипних ПД 90Х17Р3Г2С2.

Ключові слова: покриття, електродугове напилювання, порошкові дроти, сталеві електроди, трибологічні характеристики

Volodymyr Hvozdet's'kyi, Ph.D.; Mykhailo Student, Ph.D., Prof.; Oleksandra Student, Ph.D., Prof.; Khrystyna Zadorozhna, Ph.D.; Oleksandr Lukyanenko, Ph.D.; Nestor Mozola

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ARC COATINGS FROM DIFFERENT TYPES OF WIRES

Abstract. The abrasive wear resistance and tribological characteristics of arc coatings made of different types of electrode wires were studied. In coatings sprayed with solid steel wire (08Sv or 65G steel) paired with 90Cr17B2MnSi cored wire, soft (150...450) HV_{0.1} and hard (600...1000) HV_{0.1} matrices were formed. The wear resistance of such coatings was 1.3...1.4 times higher than coatings made of two similar types of CW 90Cr17B2MnSi.

Keywords: coatings, arc spraying, cored wires, steel electrodes, tribological characteristics

Вступ. Деталі типу «вал» (колінчасті та розподільчі вали, пальці поршнів та мотовила, варіатори, ротори та кришки електромоторів, соломотряси, найрізноманітніші деталі циліндричної форми тощо) експлуатуються у складних умовах контакту з частками абразиву і тому швидко зношуються та унеможливають експлуатацію всього агрегату. Як правило, такі деталі є складними і дорогими і їх заміна на нові істотно здорожує продукцію. В сучасних умовах витрати на відновлення деталей залежать від їх конструктивно-технологічних особливостей і геометрії наявних в них дефектів і становлять 5 – 30% від вартості нових деталей.

Серед усіх газотермічних методів електродуговий метод (ЕДМ) напилювання покриттів вважають технологічно найпростішим, найдешевшим, який не потребує дороговартісного обладнання та легко впроваджується у виробництво. Суттєвим недоліком цього методу є вузький асортимент електродних матеріалів. Використання порошкових дротів, як електродних матеріалів для цього методу дало змогу суттєво розширити сфери його застосування [1. 2]. Покриття, нанесені ЕДМ, від 3 до 10 разів дешевші за нанесені іншими газотермічними методами (газополуменевим, HVOF, HVAF, детонаційним, та плазмовим). Однак низька їх адгезія і когезія та високий рівень залишкових напружень розтягу в отриманих покриттях перешкоджає їх застосуванню за підвищених робочих навантажень. Для підвищення механічних та трибологічних характеристик покриттів використали різнотипні електродні дроти: порошковий дріт (ПД) ПД 90Х17Р2ГС в парі із суцільним дротом (СД) із

маловуглецевої (СД 08) або високовуглецевої (СД 65Г) сталей. Це дало б змогу формувати композиційні покриття, в яких тверді ламелі (їх твердість досягала би (800...1200) $HV_{0,1}$), поєднувалися з м'якими із твердістю (150...450) $HV_{0,1}$ відповідно.

Мета роботи визначити трибологічні характеристики електродугових покриттів із різнотипних електродних дротів.

Методика напилювання електродугових покриттів із різнотипних електродних дротів. Для формування покриттів використали різнотипні електродні дроти: порошковий дріт (ПД 90X17P3ГС) і сталевий дріт (СД 08св або СД 65Г). Покриття напиляли на сталеву підкладку з використанням електродугового металізатора із соплом Лавала (рис.1), яке забезпечило надзвукову швидкість повітряного струменю з числом Маха 2 [3]. Параметри напилювання покриттів: напруга 30В, сила струму 150А, тиск повітряного струменю 1,2 МПа, дистанція напилювання 120 мм. Після напилювання покриття шліфували. Його трибологічні характеристики в парі тертя з антифрикційним алюмінієвим сплавом АМО-7-3 досліджували на установці СМЦ- 2 в оливі 5W30 за питомого навантаження 2...10 МПа.

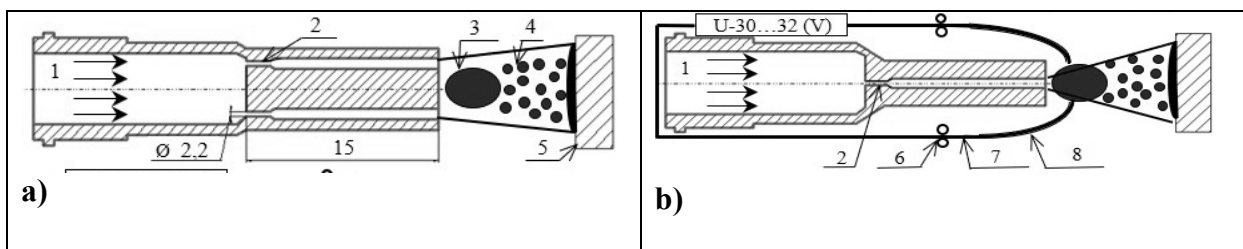


Рисунок 1. Схематичні зображення перерізу сопла металізатора для формування надзвукового потоку повітря (види спереду (а) та зверху (б) відповідно): 1 – потік повітря, 2 – критичний переріз сопла, 3 – розплав електродних матеріалів, 4 – метало-повітряний потік, 5 – сталева підложка з напиленим покриттям на поверхні, 6 – дроти, 7 – напрямні для подавання електродів до зони горіння дуги, 8 – ролики для переміщення дроту.

Експериментальні результати: За контактного навантаження P до 6 МПа покриття, сформовані з електродних дротів (ПД 90X17P2СГ + СД 08), за тертя у парі зі сплавом АМО-7-3 показали низький коефіцієнт тертя $f \sim 0,02...0,025$ (таблиця 1). За питомого навантаження понад 6 МПа значення f зросло, проте навіть за $P = 10$ МПа не перевищило значення 0,04. Для покриття, напиленого парою однотипних ПД 90X17P2СГ, практично незалежно від рівня P значення f було вищим ніж за використання різнотипних електродів.

Таблиця 1. Вплив питомого навантаження P на коефіцієнт тертя f покриттів, напилених різнотипними дровами, у парі з алюмінієвим сплавом АМО 7-3 за умов граничного мащення синтетичною оливою 5W30

Питоме навантаження P , МПа	Коефіцієнт тертя f покриттів, напилених різнотипними дровами			
	ПД 90X17P2СГ + СД 0,8	ПД 90X17P2СГ + СД 65Г	ПД 90X17P2СГ + ПД 90X17P2СГ	Еталон Ст45
2	0,020	0,015	0,020	0,020
4	0,020	0,020	0,025	0,025
6	0,025	0,020	0,030	0,025
8	0,030	0,025	0,040	0,035
10	0,040	0,040	0,050	0,045

За інтенсивністю зношування I аналізованих пар тертя за умов граничного мащення найкращі характеристики показало покриття з (ПД 90X17P2СГ + СД 08) (таблиця 2). Значення I для покриттів із різнотипних дротів (порошкового та суцільного

сталевого) були в 1,3...1,4 рази нижчими, ніж покриття із ПД90X17P2СГ та в 2,0...2,3 рази нижчі, ніж для сталі 45 (HRC 55).

Таблиця 2. Інтенсивність зносу I покриттів, напилених різними варіантами дротів, у парі з алюмінієвим сплавом АМО-7-3 за умов граничного мащення синтетичною оливою 5W30

Питоме навантаження P , МПа	Інтенсивність зносу I , 10^{-12}			
	ПД 90X17P2СГ + СД 0,8	ПД 90X17P2СГ + СД 65Г	ПД 90X17P2СГ + ПД 90X17P2СГ	Еталон Ст45
2	0,025	0,027	0,04	0,07
4	0,03	0,035	0,05	0,1
6	0,04	0,05	0,15	0,17
8	0,1	0,12	0,17	0,25
10	0,15	0,17	0,22	0,35

Висока зносостійкість покриттів зумовлена, насамперед, наявністю в їх структурі ламелей із невисокою мікротвердістю (180...400) HV_{100} (закристалізовані краплини із СД 08, 65Г) та ламелей із високою мікротвердістю (700...1000) HV_{100} (краплини із ПД 90X17P3ГС) відповідно. Залишкові напруження розтягу, що виникають під час напилування покриттів, релаксують за рахунок пластичного деформування м'яких ламелей. Тому під час шліфування в таких покриттях не виникають мікротріщини. Присутність у покриттях твердих фаз боридів, карбідів, а також легованого мартенситу, забезпечувала їх високу зносостійкість, а велика кількість оксидів Fe_2O_3 та V_2O_5 суттєво зменшувала коефіцієнт тертя та час на припрацювання, об'ємну та локальну температуру трибологічного розігрівання в зоні контакту пари тертя. Під час тертя тверді мікрочастинки (оксиди, бориди), які в процесі тертя зношувалися або відірвалися від поверхні покриття, втілювалися у м'який алюмінієвий сплав АМО-7-3 (контртіло) і зменшували період припрацювання пари тертя, а зношування самого покриття відбувалося завдяки цим закріпленим часточкам абразиву (рис. 1).

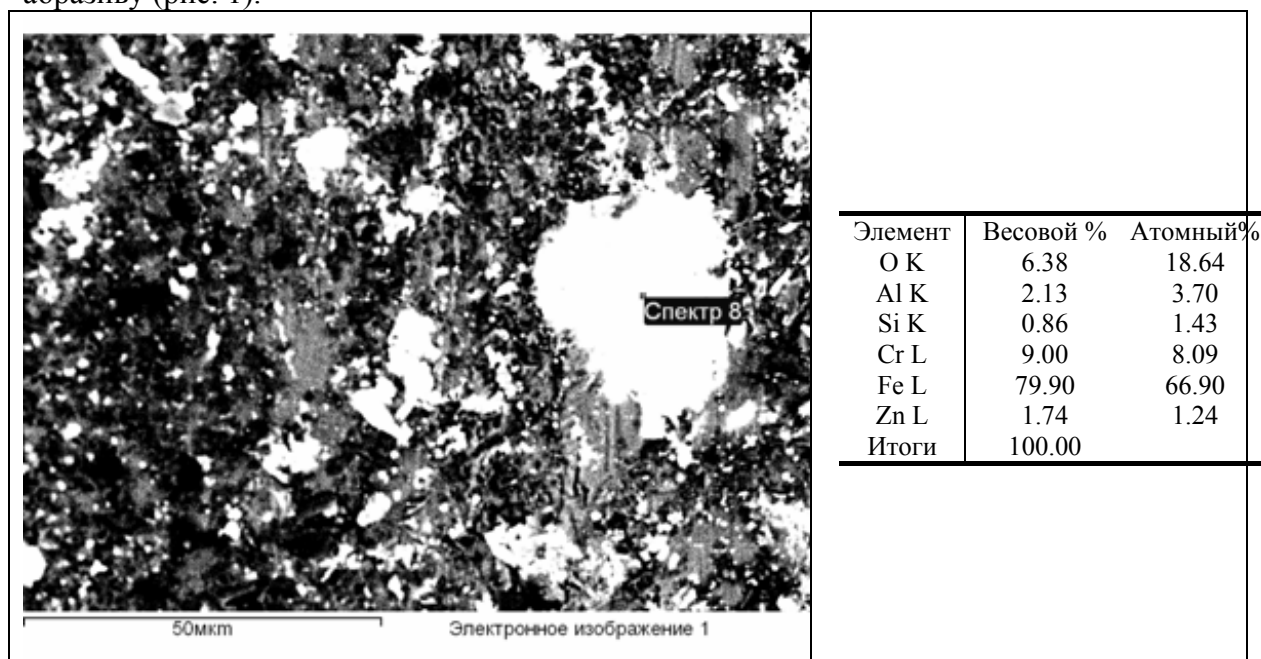


Рис. 1. Шаржування поверхні контртіла (АМО-7-3) часточками (оксидів, боридів, карбідів), відірваними від покриття.

Знос контртіла з антифрикційного алюмінієвого сплаву АМО 7-3 був вдвічі меншим в парі з покриттями із різнорідних дротів ніж з еталоном (сталь 45) навіть за найвищого питомого навантаження 10 МПа (таблиця 3). Внаслідок контакту з

покриттям із пари ПД 90X17P2CГ позитивний ефект на знос контр тіла від їх тертя був дещо меншим.

Таблиця 3. Втрата маси контртіла із антифрикційного алюмінієвого сплаву АМО 7-3 у фрикційній парі з аналізованими покриттями, напиленими різними дротами

Питоме навантаження P , МПа	Знос вкладки зі сплаву АМО 7-3 у парі з покриттями, $\times 10^{-4}$ г			
	ПД 90X17P2CГ + СД 08	ПД 90X17P2CГ + СД 65Г	ПД 90X17P2CГ + ПД 90X17P2CГ	Еталон Ст45
2	2	3	4	7
4	3	4	5	11
6	4	5	13	18
8	11	12	18	27
10	16	18	24	37

Під час тертя за високих питомих навантажень м'які ламелі у структурі покриттів, утворені внаслідок кристалізації крапель розплаву суцільних сталевих дротів, пластично деформувалися (рис. 2). Це суттєво зменшувало шорсткість поверхні покриття та збільшувало поверхню фрикційної взаємодії між поверхнею покриття та контртілом АМО 7-3. Як наслідок інтенсивність зношування поверхні контртіла зменшувалася.

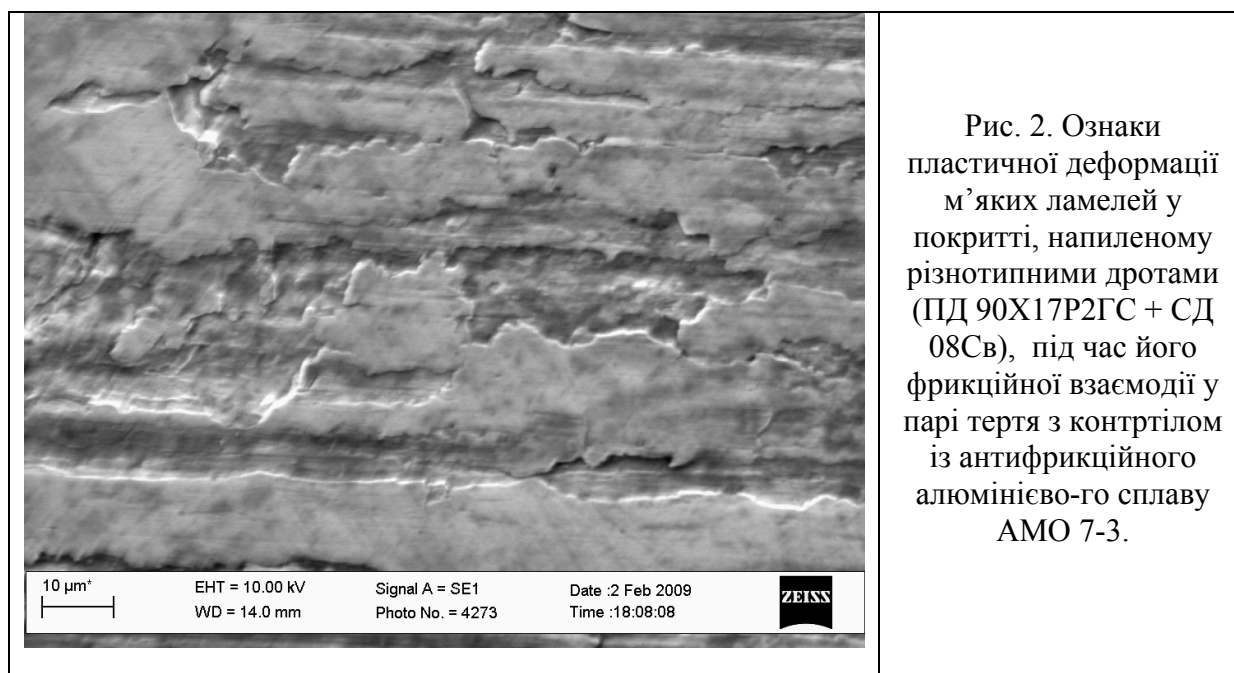


Рис. 2. Ознаки пластичної деформації м'яких ламелей у покритті, напиленому різнотипними дротами (ПД 90X17P2CГ + СД 08Св), під час його фрикційної взаємодії у парі тертя з контртілом із антифрикційного алюмінієво-го сплаву АМО 7-3.

Висновки:

1. Під час напилювання покриттів двома різнотипними дротами (порошкового і суцільного сталевого) формувалося покриття з типовою ламелярною структурою, сформованою закристалізованими краплями розплаву ПД та СД. Внаслідок значної їх відмінності за твердістю в структурі таких покриттів виявили два різних каркаси із м'якої (з краплин СД з твердістю (150...450) $HV_{0,1}$) та твердої (з краплин ПД з твердістю (600...1000) $HV_{0,1}$) матриць.
2. В умовах тертя за граничного навантаження зносостійкість покриттів із різнотипних дротів була в 1,3...1,4 рази більша, ніж покриття із двох однакових ПД 90X17P3Г2C2 та в 2,0...2,3 рази більша ніж еталону (сталь 45 з твердістю 55 HRC). Під час тертя тверді

мікрочастинки (оксиди, бориди), або зношувалися, або відривалися від поверхні покриття та втілювалися у м'який алюмінієвий сплав АМО-7-3 (як контртіло) і зменшували тривалість періоду припрацювання пари тертя. При цьому зношування покриття відбувалося цим закріпленим абразивом на поверхні контртіла АМО 7-3.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту № 2022.01/0005 “Концепція відновлення та подовження експлуатаційного ресурсу обладнання найважливіших галузей народного господарства України”.

Перелік посилань

1. Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. M. Hvozdets'kyi // *Materials Science*. – 2016. – 52(2) . – P. 165–172. DOI:10.1007/s11003-016-9939-8
2. Tribological properties of PEO layers synthesized on arc spray coatings on aluminum alloys in contact with various friction materials / V. Hvozdets'kyi, J. Padgurskas, M. Student, I. Pohrelyuk, O. Student, K. Zadorozhna, O. Tkachuk, R. Rukuiža // *Coatings*. – 2024. – 14(4). – 460. <https://doi.org/10.3390/coatings14040460>
3. The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires / M. Student, V. Gvozdetsky, O. Student, O. Prentkovskis, P. Maruschak, O. Olenyuk, L. Titova // *Journal of Mechanical Engineering – Strojnický Časopis*. – 2019. – 69, 4. – P. 133–146. [https:// DOI: 10.2478/scjme-2019-0048](https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0048)

УДК 621.793.72

Володимир Гвоздецький, к.т.н., с.досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.;
Олександра Студент, д.т.н., проф.; Христина Задорожна, к.т.н.; Олександр
Лук'яненко, к.т.н.; Нестор Мозола

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

ТОПОГРАФІЯ ПОВЕРХНІ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ РІЗНОГО СКЛАДУ І ЇЇ ВПЛИВ НА МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ

Анотація. Проаналізовано топографію поверхонь електродугових покриттів, напилених порошковими дротами з різним складом шихти. Показано, що оксиди елементів легування з різною твердістю визначала шорсткість поверхні покриттів та механізм їх зносу за тертя.

Ключові слова: електродугове напилювання, порошкові дроти, покриття, шорсткість поверхні, оксиди елементів, механізм зношування

Volodymyr Hvozdet's'kyi, Ph.D.; Mykhailo Student, Ph.D., Prof.; Oleksandra Student, Ph.D., Prof.; Khrystyna Zadorozhna, Ph.D.; Oleksandr Lukyanenko, Ph.D.; Nestor Mozola

TOPOGRAPHY OF THE SURFACE OF ARC COATINGS SPRAYED WITH THE CORED WIRES OF DIFFERENT COMPOSITIONS AND ITS INFLUENCE ON THE WEAR MECHANISM

Abstract. The topography of the surfaces of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions is analyzed. It was shown that oxides of alloying elements with different hardness determined the roughness of coating surfaces and the mechanism of their wear during friction.

Keywords: arc spraying, cored wires, coatings, surface roughness, element oxides, wear mechanism.

Вступ. Електродугові покриття (ЕДП) із порошкових дротів (ПД) широко використовують для відновлення деталей типу «вал», експлуатованих за високих питомих навантажень в умовах граничного мащення. Серед газотермічних методів отримання покриттів найпоширенішим є електродуговий метод (ЕДМ) напилювання [1–4]. До переваг ЕДМ порівняно з іншими газотермічними методами відносять простоту технологічного процесу, мінімальні затрати та висока його продуктивність, можливість сформуванню напиленого шару необхідної товщини (у діапазоні 0,1...10 мм) з необхідними властивостями та незначне нагрівання деталей (до 150°C). Отже ЕДМ дає змогу відновити розміри зношених деталей та підвищити їх зносостійкість. Чистота шліфованої поверхні ЕДП визначає довговічність пари тертя. Звідси мета роботи – виявити, як компоненти шихти ПД впливатимуть на стан шліфованої поверхні ЕДП.

Методика напилення електродугових покриттів із порошкових дротів. Для напилювання ЕДМ використали електрометалізатор (рис. 1а) та ПД діаметром 1,8 мм, до шихти яких додавали порошки феросплавів (FeSi, FeTi, FeMn), чистих металів (Al, Cr) та карбиду В₄С, а оболонку виготовляли зі стрічки шириною 10 мм із сталі 08кп товщиною 0,4 мм. Поперечний переріз ПД показано на (рис. 1б). Коефіцієнт заповнення ПД шихтою досягав 24%. Режим напилювання покриття: струм – 150 А, напруга – 32 В, тиск повітряного струменю 0,6 МПа, дистанція напилювання 120 мм.

Експериментальні результати. Під час розроблення ПД для напилювання ЕДП дослідили вплив компонентів шихти ПД на топографію поверхні одержаних покриттів після її шліфування. Адже чистота та шорсткість поверхні визначають трибологічні властивості пар тертя (зокрема деталей типу «вал – контргіло»). Електронно-мікроскопічні дослідження шліфованої поверхні ЕДП за невисокої роздільної здатності

виявили на ній велику кількість різних за розмірами впадин у вигляді пор (рис. 2а), а за вищої – виступів (рис. 2б), що суттєво відрізняло її від поверхні сталі ШХ15 (рис. 2в).

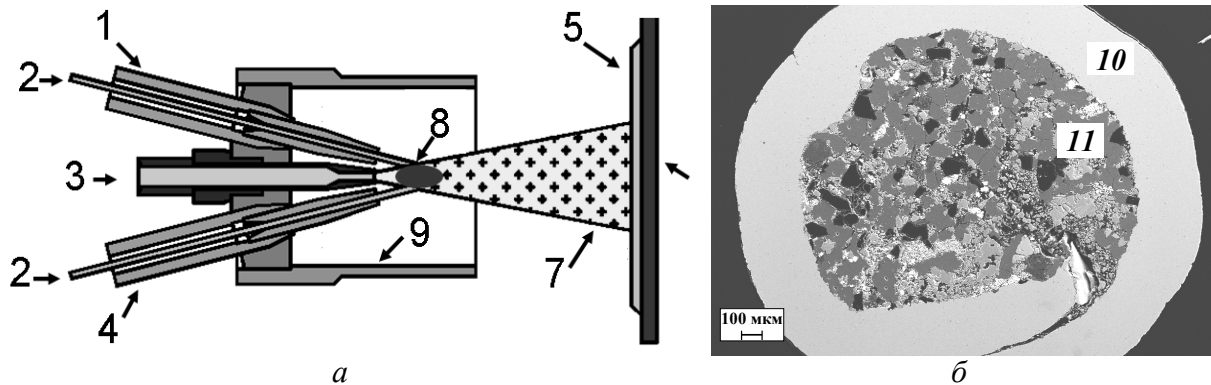


Рис. 1. Типова схема металізатора для ЕДН покриттів (а) та поперечний переріз ПД (б): 1 – катод; 2 – ПД; 3 – стиснене повітря; 4 – анод; 5 – покриття; 6 – підложка; 7 – розплавлений метал; 8 – дуга; 9 – захисний кожух; 10 – оболонка; 11 – шихта.

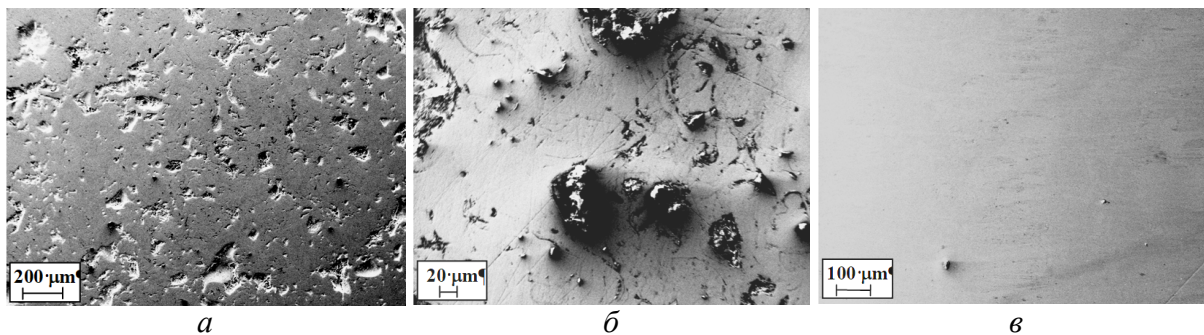


Рис. 2. Поверхні ЕДП із ПД 150Х6Р2ФМВ4 (а, б) та гартованої сталі ШХ15 (в) після шліфування та полірування. Впадини (а) та виступи (б) на поверхні ЕДП.

Таку топографію поверхні ЕДП пов'язали з його ламелярною структурою. Адже ламелі ЕДП, як правило, мають різний хімічний склад та мікротвердість. В матричній фазі покриттів попри включення карбідів і боридів виявляли ще з значну кількість оксидів заліза та легувальних елементів, які розташовувалися у структурі покриття переважно вздовж меж ламелей. Все це високоміцні, але водночас крихкі складові покриття, які легко руйнуються і вищерблюються під час механічної обробки, полишаючи по собі впадини. Але водночас незруйновані високо тверді виступи на поверхні ЕДП сприяють інтенсивному зношуванню поверхні фрикційної пари шляхом її шаржування. Зрозуміло, що після однакової механічної обробки (шліфування з наступним поліруванням) шорсткість поверхні ЕДП, напиленого ПД Х6РЗЮ6, була значно вищою (R_a 1,88), ніж властива гартованій сталі ШХ15 (R_a 0,88). Так після такої механічної обробки на поверхні ЕДП фіксували виступи до 1 мкм заввишки та западини до 1,6 мкм в глибину. Тоді як на сталевій поверхні вони не перевищували 0,25 мкм (рис. 3). Неоднорідна топографія поверхні покриття має як недоліки, так і переваги. За умов граничного тертя за високих питомих навантажень виявлені виступи можуть виконувати роль ріжучих крайок, що спричиняє катастрофічний знос матеріалу контртіла та вихід із ладу пари тертя. Проте впадини та порожнини на його поверхні виконують роль своєрідних “резервуарів” для мастила, яке потрапляючи в зону тертя, збільшує товщину граничної плівки мастила. Внаслідок цього за недостатньої кількості мастила в зоні тертя таке покриття може працювати краще.

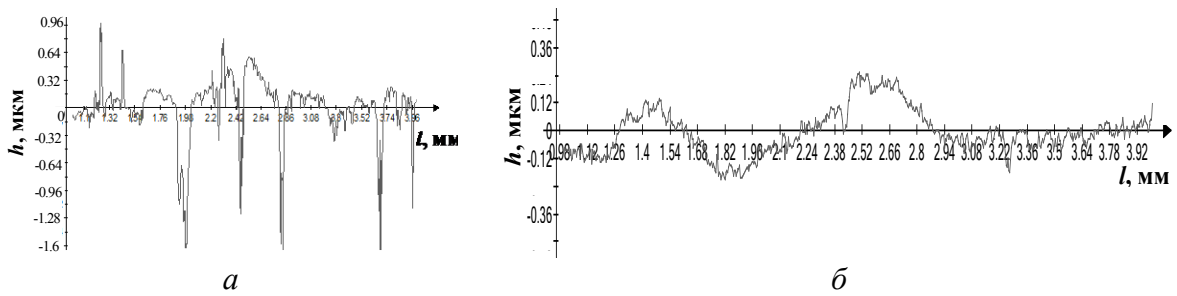


Рис. 3. Профілограми поверхонь ЕДП з ПД Х6РЗЮ6 з шорсткістю R_a 1,88 (а) та сталі ШХ15 з шорсткістю R_a 0,88 (б) після їх шліфування і полірування. По осі ординат відкладено перепад висот рельєфу h на поверхнях, а по осі абсцис – довжину шляху l , на якому здійснювались заміри.

Характер фрикційної взаємодії шліфованої поверхні покриття з контртілом визначається співвідношенням глибини врізання виступу в поверхню контртіла (h) до радіуса заокруглення його гострої вершини (r). Так, за співвідношення $h/r < 0,02$ відбувається тільки пружна взаємодія виступу на поверхні ЕДП з поверхнею контртіла з подальшим пружним відскоком деформованого шару. Тоді як за $0,02 < h/r < 0,7$ такі виступи спричиняють пластичну деформацію контртіла. І лише тоді, коли $h/r > 0,7$ гострі виступи врізаються в поверхню контртіла, зрізуючи її з утворення мікростружки.

Встановлено що, як правило, в парі тертя “ЕДП – бронза БРС-30” максимальне питоме навантаження в умовах граничного мащення не перевищує 14 МПа. За вищих навантажень відбувається катастрофічний знос контртіла внаслідок зрізання його поверхні гострими виступами оксидів, карбідів або боридів із утворенням мікростружки. Тому зменшення кількості великих включень оксидів, карбідів і боридів у структурі покриттів та розмірів цих включень загалом, а також збільшення радіусів заокруглення їх вершини є однією з головних завдань з підвищення зносостійкості пар тертя “ЕДП – контртіло” в умовах граничного мащення.

Хімічний склад виступів на шліфованій поверхні після її полірування. При напилюванні ЕДП розплавлений в дузі ПД струменем повітря диспергується на краплини різного розміру (рис. 4а), які інтенсивно взаємодіють з наявним в атмосфері киснем. Металографічний аналіз краплин розплаву ПД, вловлених у снігову мішень, підтвердив наявність у метало-повітряному потоці краплин з різним ступенем окиснення (рис. 4б).

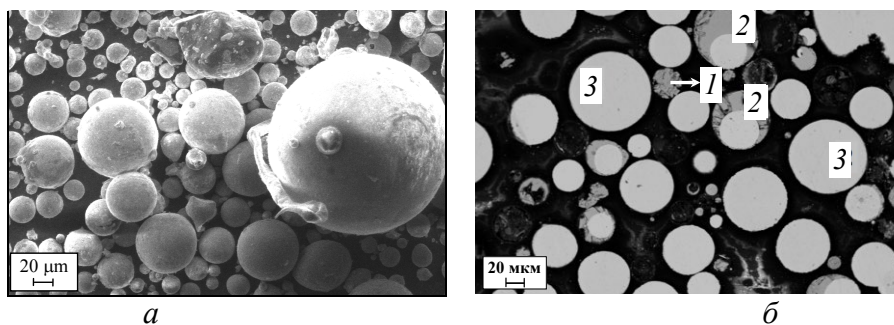


Рис. 4. Морфологічні особливості (а) та поперечний переріз краплин (б) із ПД 60Х6РЗЮ6, вловлених у снігову мішень для пришвидшення їх кристалізації. 1, 2, 3 – краплини відповідно з повним або частковим окисненням поверхні, або за його відсутності.

Згідно термодинамічного аналізу алюміній найшвидше взаємодіє з киснем, формуючи в покритті крупні включення оксиду алюмінію з високою мікротвердістю (20 ГПа). За наявності у складі шихти ПД значної кількості Cr в покритті формувались оксиди хрому з ще вищою мікротвердістю (30 ГПа) (рис. 5а). Однак у більшості випадків у покритті формувались складні оксиди із суміші оксидів Fe та Cr. Під час шліфування таких покриттів корундовим абразивним кругом (20 ГПа) на їх поверхні формувались виступи, які за високих питомих навантажень виконували роль різців.

Оскільки тверді включення оксиди хрому та алюмінію не зрізалися абразивним кругом, то вони або відривалися від покриття, залишаючи на його поверхні виразки, або руйнувалися від контакту з ним з утворенням гострих виступів із їх залишків.

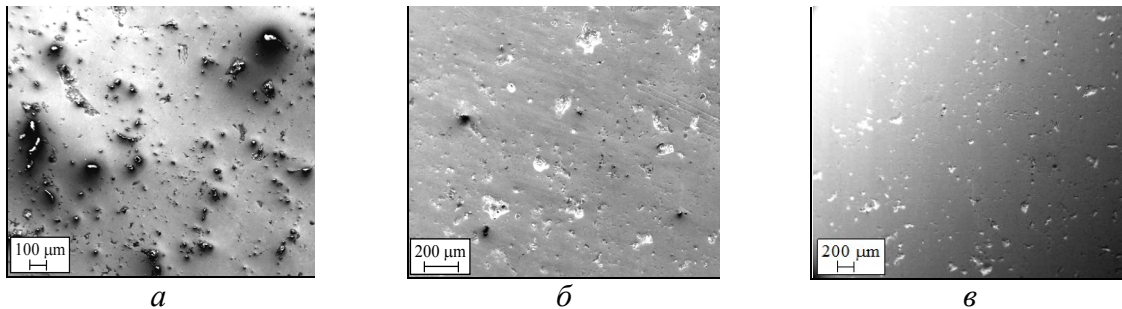


Рис. 5. Топографія поверхні шліфованої поверхні покриттів із ПД Х6Р3Ю6 (а), ПД Х6Р3ГС (б) та ПД Х6Р3ГСТ (в), які відрізнялись за вмістом легуючих елементів

За додавання до шихти ПД феромарганцю у структурі покриття утворювалися оксиди марганцю з невисокою мікротвердістю, які не формували ріжучих крайок за фрикційної взаємодії у парах тертя (рис. 5 б). Під час напилювання ЕДП з використанням ПД, до складу шихти якого входив титан з його здатністю швидко реагувати з киснем повітряного струменю, у покритті формувалися включення оксиду титану з мікротвердістю 7 ГПа. Однак, на відміну від оксидів інших елементів, включення на основі оксиду титану та марганцю були значно дисперсними і не ставали ріжучими крайками під час фрикційної взаємодії покриття із контртілом (рис. 5в). Суттєве зниження шорсткості поверхні таких покриттів робить їх привабливими для застосування у парі з ширококовжливаними контртілами.

Висновки. На шліфованій поверхні покриттів із ПД, що містили Al та Cr, залишалися мікростави з їх оксидів, які не усувалися під час шліфування абразивним (корундовим) кругом та слугували ріжучими крайками за фрикційної взаємодії у парах тертя. За додавання до шихти ПД феромарганцю або феротитану в структурі ЕДП формувалися дрібнодисперсні оксиди на основі Mn та Ti з дещо нижчою мікротвердістю, які легко шліфувалися абразивним кругом, забезпечуючи низьку шорсткість поверхні і підвищену їх роботоздатність в парі з традиційними контртілами.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проекту № 2022.01/0005 “Концепція відновлення та подовження експлуатаційного ресурсу обладнання найважливіших галузей народного господарства України”.

Перелік посилань

1. A review on the wear, corrosion and high-temperature resistant properties of wire arc-sprayed Fe-based coatings / J. N. Ndumia, M. Kang, B.V. Gbenontin, J. Lin, S.M. Nyambura // *Nanomaterials* 2021, 11, 2527. <https://doi.org/10.3390/nano111025272>.
2. Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings / T.R. Stupnyts'kyi, M.M. Student, H.V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdet's'kyi // *Materials Science*, 2016, 52(2), 165–172. DOI:10.1007/s11003-016-9939-8
3. Assessment of abrasive wear of nanostructured WC–Co and Fe-based coatings applied by HP-HVOF, flame, and wire arc spray / C. Lima, R. Libardi, R. Camargo, H. Fals, V. Ferraresi // *J. Therm Spray Techn.*, 2014, 23, Article number: 10971104. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0101-6>.
4. Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions / M. Student, V. Hvozdet'skyi, T. Stupnytskyi, O. Student, P. Maruschak, O. Prentkovskis, P. Skačkauskas // *Coatings*, 2022, 12(7), 925. DOI:10.3390/coatings12070925

УДК 621.7

В. Коржик^{1,2}, д.т.н., чл.кор.НАНУ; Петро Стухляк^{2,3}, д.т.н., проф.; О. Берднікова¹, д.т.н., с.н.с.; М. Долгов⁴, д.т.н., проф.; А. Гринюк¹, к.т.н., н.с.; А. Бабич², к.т.н., н.с.; Олег Тотосько³, к.т.н., доц.; Данило Стухляк³, к.т.н., доц.; О. Дем'янов¹, к.т.н., с.н.с.

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Україна

²Науково-дослідний інститут зварювальних технологій ім. Є.О. Патона провінції Чжецзян, Китайська Народна Республіка

³Тернопільський національний технічний університет ім.І.Пулюя, Україна

⁴Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ВПЛИВ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗРАЗКІВ ІЗ СТАЛІ AISI 304 НА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ

Анотація. Досліджено вплив чотирьох методів виготовлення металевих зразків із сталі AISI 304 на їх характеристики міцності та особливості деформування під час випробування плоских зразків на розтяг. Оцінили вплив лазерної та електроіскрової різки листового матеріалу перпендикулярно та вздовж напрямку прокату на границю міцності та плинності отриманих зразків. Отримано криві деформування зразків. Зроблено статистичну обробку результатів дослідження.

Ключові слова: нержавіюча сталь, випробування на розтяг, характеристики міцності, границя міцності, статистична обробка.

V. Korzhyk, Ph.D.; Petro Stukhliak, Ph.D., Prof.; O. Berdnikova, Ph.D.; N. Dolgov, Ph.D., Prof.; A. Grynyuk, Ph.D.; O. Babych, Ph.D.; Orlh Totosko, Ph.D., Assoc. Prof.; Danylo Stukhliak, Ph.D., Assoc. Prof.; O. Dem'ianov, Ph.D.

INFLUENCE OF MANUFACTURING METHODS OF AISI 304 STEEL SPECIMENS ON THEIR STRENGTH CHARACTERISTICS

Abstract. The influence of four methods of manufacturing metal specimens from AISI 304 steel on their strength characteristics and deformation features during tensile testing of flat specimens was investigated. The influence of laser and electric spark cutting of sheet material perpendicular to and along the direction of rolling on the tensile strength and yield strength of the obtained samples was evaluated. The deformation curves of the samples were obtained. The results of the study were statistically processed.

Keywords: stainless steel, tensile testing, strength characteristics, tensile strength, statistical processing.

Розвиток сучасної промисловості України передбачає використання крупногабаритних металевих конструкцій, що складаються з окремих елементів. Вказані елементи, у більшості випадків, зібрані між собою за допомогою зварних з'єднань. До них відносять несівні великогабаритні конструкції, ємності для зберігання та транспортування рідких та сипучих речовин у харчовій і хімічних галузях, різноманітні опори, металеві корпуси плавзасобів тощо. У багатьох випадках такі зварні вироби виконують із нержавіючих сталей. Найменш міцними, як правило, є зварювальний шов та область його термічного впливу. В такій зоні зароджуються та розповсюджуються тріщини і, нерідко, таких місць може бути декілька, що призводить до пошкодження, і в подальшому при експлуатації, виробу до механічного руйнування зварного з'єднання. Функція виробу з точки зору конструкційної міцності, герметичності та корозійної тривкості порушується. У зв'язку з цим навіть незначне зміцнення зварного шва і його захист від дії агресивних середовищ значно підвищить довговічність експлуатації виробу.

Метою даного дослідження було порівняти поведінку при розтягуванні зразків із нержавіючої сталі AISI 304 після різних методів обробки листової сталі вздовж та поперек прокату.

Механічні властивості металів залежать не лише від хімічного складу, а й від технології виробництва, тобто операційної технологічної спадковості, яка визначає внутрішню будову матеріалу. В роботі дослідження зразків із сталі AISI 304 виконували після виготовлення зразків на розтяг електроіскровим та лазерним різанням на установках DK7745, FLC-C4000S. Зразки виготовляли із листової сталі вздовж та поперек прокату. Вивчення впливу способу виготовлення дозволяє оптимізувати вибір матеріалу для конкретних елементів конструкцій.

Було виготовлено зразки товщиною 2,85 мм з шириною в робочій частині 10 мм зі сталі AISI 304 чотирма методами. Довжина зразків в робочій частині становила 50 мм. Перша та друга група зразків виготовлена методом лазерної різки перпендикулярно та паралельно напрямку прокату, відповідно. Третя та четверта групи зразків виготовлені методом електроіскрового різання перпендикулярно і вздовж напрямку прокату, відповідно. Методи виготовлення зразків вибрано такими, які використовують при виробництві виробів для їх подальшого зварювання. Проведено випробування на розрив зразків на універсальній електронній машині Instron-5982 із швидкістю деформації 10 мм/хв. Описано методику експериментального дослідження, зокрема по визначенню таких параметрів як границя міцності, границя плинності та довжина зразка після випробування. Для статистичної обробки отриманих експериментальних даних були використані наступні методи: обчислення середнього арифметичного значення для кожного параметру з метою усереднення результатів окремих випробувань, визначення середньоквадратичного відхилення отриманих параметрів від середнього значення, використання t-критерію Стьюдента для порівняння середніх значень параметрів між двома вибірками (отриманими для зразків за різних методів виготовлення), обчислення довірчого інтервалу для середнього значення з імовірністю 95% для оцінки статистичної значущості отриманих результатів. Результати випробування зразків чотирьох груп приведено в таблиці 1. Отримано криві «напруження – деформація» для зразків із різних груп зі сталі AISI 304. Приклади кривих деформування показано на рис. 1 –рис. 4.

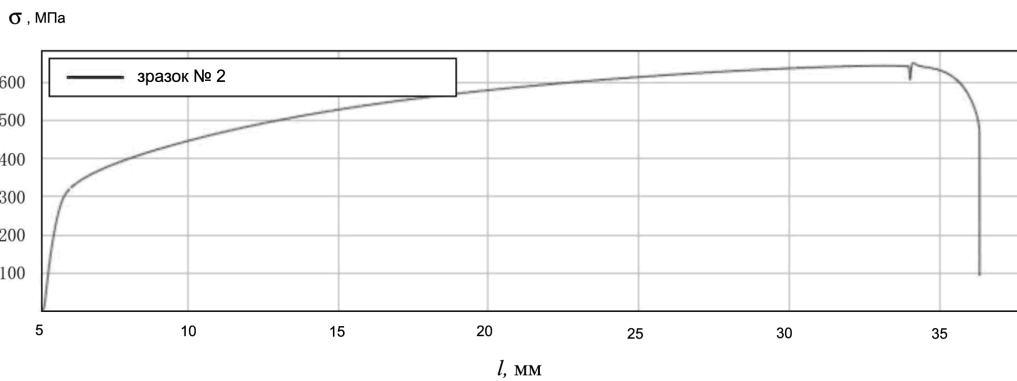


Рис. 1. Крива деформування зразка № 2

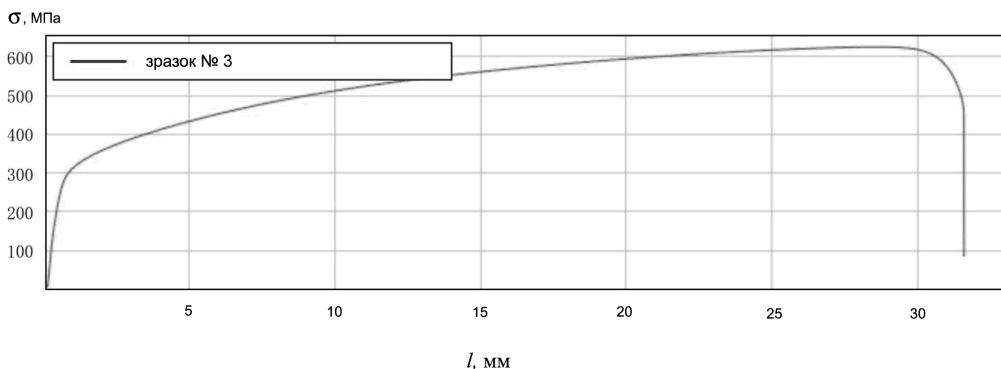


Рис. 2. Крива деформування зразка № 3

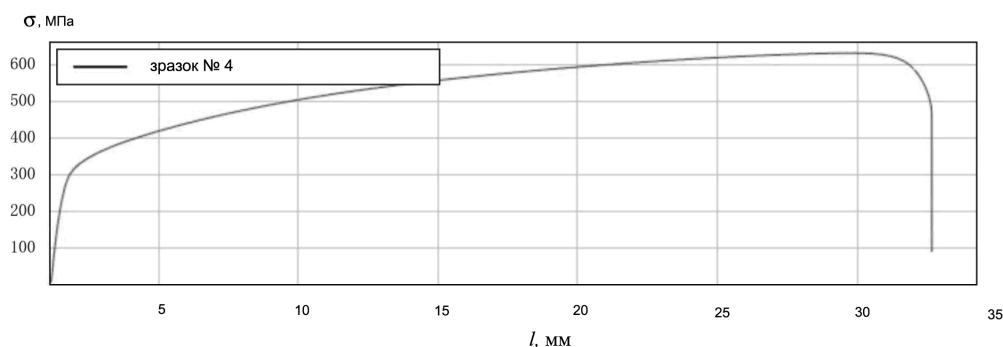


Рис. 3. Крива деформування зразка № 4

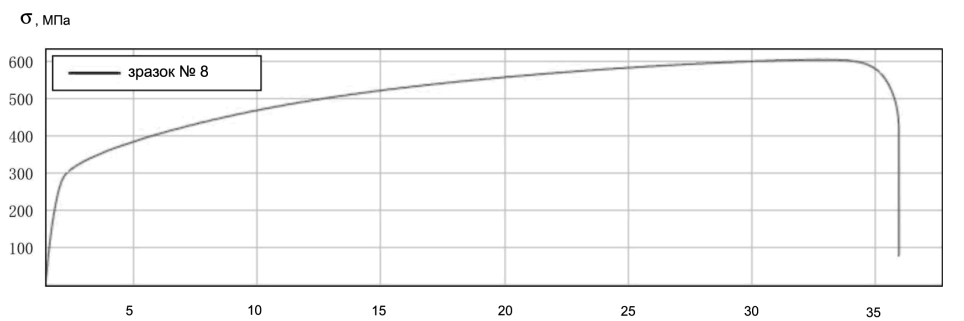


Рис. 4. Крива деформування зразка № 8

Таблиця. Характеристики міцності зразків, виготовлених зі сталі AISI 304

Номер зразка	Технологія підготовки	Напрямок прокату	Границя міцності	Границя плинності, МПа
1	Електроіскрове різання	Перпендикулярно до напрямку різання	709,5	492,4
2			651,8	249,3
3		Вздовж до напрямку різання	624,8	233,9
4			630,4	241,3
5	Лазерне різання	Вздовж до напрямку різання	633,1	237,6
6			629,1	232,4
7		Перпендикулярно до напрямку різання	610,0	220,4
8			606,2	221,7

Проаналізовано вплив способу виготовлення зразків зі сталі AISI 304 на їх механічні властивості на підставі експериментальних даних. Обговорено можливі механізми зміцнення та підвищення пластичності для різних методів виготовлення зразків. Зроблено висновки, що зразок № 1 має кращі характеристики міцності порівняно з іншими зразками. Зразки № 7 та № 8 мають найнижчі характеристики міцності. Це необхідно враховувати від час проектування та виготовлення елементів конструкцій зі сталі AISI 304. Наведено рекомендації щодо подальших досліджень. В роботі продемонстровано вплив технології виготовлення зразків на поведінку сталі при розтягуванні. Отримані результати статистичної обробки дозволили оцінити достовірність впливу способу виготовлення на характеристики міцності зразків та зробити висновки щодо переваг одного методу над іншими. Подальші дослідження будуть стосуватись доцільності проведення додаткових досліджень зварних швів з цих же матеріалів.

УДК 621.326

Олександр Іванов¹, Ph.D.; Павло Присяжнюк², к.т.н., доц., Сергій Мариненко³, к.т.н., доц.; Людмила Бодрова³, к.т.н., проф., Галина Крамар³, к.т.н., доц.; Ігор Коваль³, к.т.н., доц.

¹ВСП «Фаховий коледж електронних приладів ІФНТУНГ», Україна

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ТЕРМОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ Fe-Me-C-B

Анотація. Обґрунтування важливості та проведення термодинамічного моделювання багатокомпонентної системи на основі Fe-Me-C-B

Ключові слова: термодинамічне моделювання, багатокомпонентна система, наплавлення порошковими електродами.

Olexandr Ivanov, Ph.D.; Pavlo Prysyzhnyuk, Ph.D., Assoc. Prof.; Sergiy Marynenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Liudmyla Bodrova, Ph.D., Prof.; Halyna Kramar, Ph.D., Assoc. Prof.; Ihor Koval, Ph.D., Assoc. Prof.

THERMODYNAMIC MODELING OF THE PHASE COMPOSITION OF MULTICOMPONENT SYSTEM BASED ON Fe-Me-C-B

Abstract. Justification of the importance and thermodynamic modeling of a multicomponent system based on Fe-Me-C-B

Keywords: thermodynamic modeling, multicomponent system, welding with powder electrodes.

Термодинамічне [1, 2] та моделювання структури, що оснований на теоретичних та експериментальних даних, не тільки дозволяють прогнозувати властивості матеріалів, але і взаємодоповнюватись, для більш точного опису і аналізу закономірностей будови, формування структури, властивостей та інших чинників, що дозволяють ефективніше експлуатувати і використовувати матеріали відповідно до певних галузей.

Окремо, змодельовані і експериментальні дані, не дають вичерпної інформації щодо матеріалів. Проведення моделювання, незалежно від якості та методів, не дозволяє врахувати всі фактори та чинники, що впливають на формування матеріалу, а, відповідно, його структуру, властивості та експлуатаційні можливості. Отримання лише експериментальних даних потребує вкладання часу та ресурсів у проведення експериментів і не дозволяє прогнозувати властивості матеріалів подібного складу, оскільки результати експериментів базуються тільки на конкретному матеріалі. Саме тому для повного та детального дослідження матеріалів і їх властивостей необхідно поєднання моделювання та експериментальних досліджень.

Моделювання різного роду [3] важливе для різноманітних задач, включаючи також ті, в яких матеріали працюють в умовах підвищених абразивного зношування, ударної дії, температури. Під такий опис підпадають більшість сучасних, актуальних галузей, від тих, що пов'язані з виготовленням та обробкою будівної кераміки, обробкою ґрунту і деревної продукції, нафтогазопромислового сектору та інші.

Для вказаних вище галузей необхідно використання матеріалів, що економічно доцільно використовувати в таких умовах. В даному випадку економічна доцільність ґрунтується не тільки на вартості матеріалів, але і на їх експлуатаційних та технологічних властивостях. Важливим і є можливість відновлювати робочі поверхні деталей та елементів конструкцій, оскільки маса шару, що зношується в процесі роботи зазвичай становить тільки 2-6 % самої деталі. Відновлення дозволяє не тільки відновити робочу геометрію деталей, але і підвищити їх зносостійкість в декілька разів, що дозволяє забезпечити не тільки матеріал відновлення, але і матеріал самих деталей, яким, переважно, є високолегована сталь.

Вказані умови роботи це практично завжди підвищені питомі та циклічні навантаження (шнеки для виготовлення будівельної кераміки – 75 МПа, для виготовлення паливних брикетів/гранул > 45 МПа), ударні навантаження (корознімальні ножі, леза для подрібнення пластикових відходів), зношування закріпленим та незакріпленим абразивом (глинозем – 15...19 ГПа, кремнезем – 9...11 ГПа). Серед властивостей матеріалів для відновлення потрібно зазначити не тільки високу твердість, але і стійкість до абразивної дії. Створення такого матеріалу ускладнюється тим, що збільшення твердості матеріалу (для типових матеріалів для наплавлення на основі хрому і вольфраму) призводить до підвищення його крихкості. Для ефективної експлуатаційної роботи матеріалу потрібно забезпечення формування структури, що складається з твердих, дрібних, рівномірно-розподілених, рівновісних включень у відносно менш твердій матриці. Перспективними для таких цілей є багатокомпонентні системи, що на даний момент можна розглядати як відносно нові, а саме Fe-Me-B-C, де Me – карбидоутворюючий та боридоутворюючий метал IV – VI групи періодичної системи елементів, розглядаючи у якості кандидатів Ti, Nb, Mo. Додатково, на користь Ti, впливає і те, що в Україні знаходяться найбільші в Європі його ресурси та запаси (близько 17 родовищ, в Київській, Дніпропетровській, Харківській та Житомирській областях).

Враховуючи необхідність відновлення та підвищення зносостійкості деталей і елементів конструкцій актуальним для таких цілей є дугове наплавлення порошковими електродами [4, 5], оскільки відзначається простотою виконання, високою продуктивністю та універсальністю, дозволяючи застосовувати як метод для відновлення і підвищення зносостійкості, практично до будь-якої геометрії деталей і без особливої підготовки поверхні для нанесення матеріалу. Системою для нанесення обрано Fe-Ti-Mo-B-C у зв'язку з поширенням Ti в Україні та відносно низькою вивченістю Mo для застосування таким методом для відновлення та підвищення зносостійкості деталей.

Моделювання фазового складу у багатокомпонентних покриттях на основі заліза, у яких необхідний рівень зносостійкості забезпечується наявністю тугоплавких карбідів [6] та боридів, а також складних сполук на їх основі шляхом експериментальних досліджень є ускладненим через високі температури та широкі інтервали первинної кристалізації таких сполук. З огляду на це, найбільш раціональним шляхом для визначення температурно-концентраційних діапазонів існування фаз, необхідних для забезпечення зносостійкості є екстраполяція даних, відомих для систем нижчих порядків (подвійних та потрійних), які містять усі необхідні комбінації компонентів. Саме на таких засадах побудована методика CAPLHAD, відповідно до

якої рівновага за умов постійної температури, тиску та компонентного складу має місце при мінімальному значенні вільної енергії багатоконпонентної системи.

Математичний апарат необхідний для практичної реалізації методики CALPHAD найбільш повно представлений у роботах М. Хіллєрта зокрема у [7].

Експериментальні дані термодинамічних функцій чистих компонентів і фаз подвійних та основних потрійних систем вибирались з спеціалізованих науково-періодичних видань (Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, Metallurgical Transactions A, Journal of Alloys and Compounds, International Journal of Thermophysics, Journal of Phase Equilibria та ін.) та баз даних термодинамічних функцій наукових установ: NIMS (Японія), NIST (США). Квантовохімічні розрахунки проводились з використанням програмного коду CASTEP 19.11, результатом чого стали: оптимізація геометрії кристалічної структури; визначення енергії формування фази із компонентів; визначення електронної густини та фононні розрахунки; визначення та екстраполяція термодинамічних характеристик для вибраного температурного інтервалу. Також було використано базу даних кристалічних структур The Materials Project. Розрахунок рівноважного фазового складу проводився шляхом оптимізації даних, створення моделей фаз та бази даних термодинамічних функцій для визначення вільної енергії багатоконпонентної системи із використанням підґраткової моделі М. Хіллєрта програмними засобами обчислювальної термодинаміки Thermo-Calc та Open Calphad. Результатом стали прогнозовані концентраційно-температурні діапазони існування фаз, які відповідають охолодженню при електродуговому наплавленні порошковими електродними матеріалами.

Розраховане політермічне січення системи Fe-Ti-Mo-B-C в області перспективній для розроблення матеріалів для наплавлення представлено на рисунку 1.

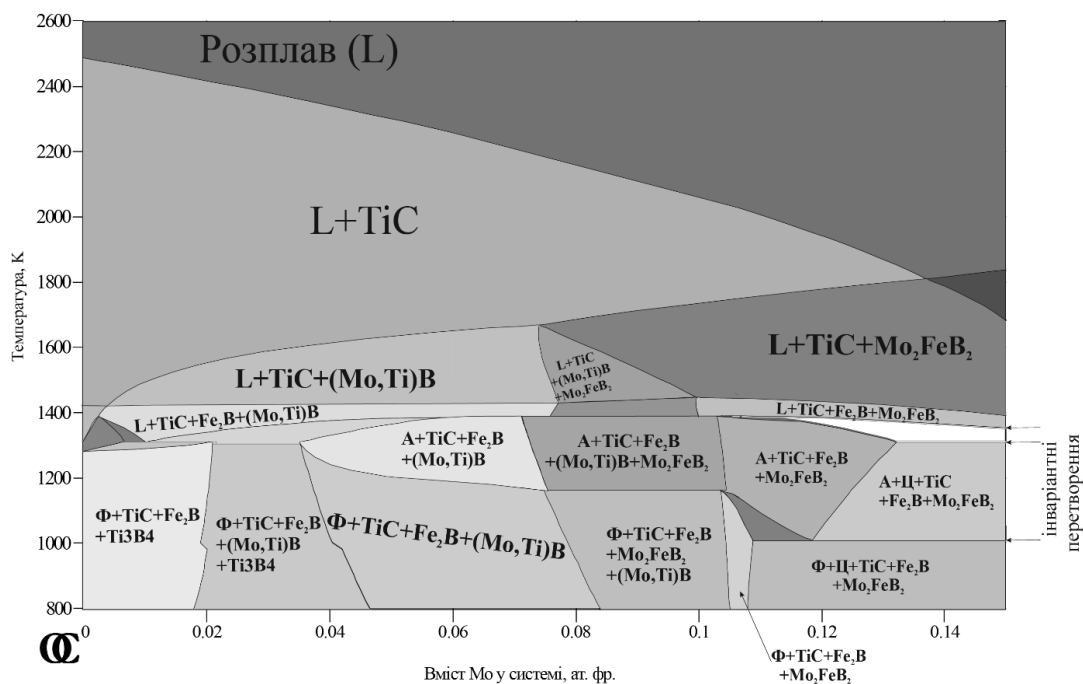


Рисунок 1 – Політермічне січення системи Fe-Ti-Mo-B-C в області, перспективній для розроблення матеріалів для наплавлення

Як висновок, розроблену модель можна використовувати для вибору оптимального співвідношення компонентів в системі для отримання матеріалу з необхідним фазовим складом для експериментального дослідження та виявлення експлуатаційно перспективних матеріалів. Подальші дослідження варто направити на експериментальну апробацію матеріалів і тестування моделі на відповідність її даних реальним.

Перелік посилань

1. Lozynskiy, Vasyl & Trembach, Bohdan & Hossain, Md. Mukter & Kabir, Mohammad & Silchenko, Yury & Krbařa, Michal & Sadovyi, Kostiantyn & Kolomiitse, Oleksii & Ropyak, Liubomyr. (2024). Prediction of phase composition and mechanical properties Fe–Cr–C–B–Ti–Cu hardfacing alloys: Modeling and experimental Validations. *Heliyon*. 10. e25199. 10.1016/j.heliyon.2024.e25199.
2. Prysyzhnyuk, Pavlo & Di Tommaso, Devis. (2023). The thermodynamic and mechanical properties of Earth-abundant metal ternary boride Mo₂(Fe,Mn)B₂ solid solutions for impact- and wear-resistant alloys. *Materials Advances*. 4. 10.1039/D3MA00313B.
3. Trembach, Bohdan & Hlushkova, D. & Hvozdet'skyi, V. & Vynar, Vasyl & Zakiev, Vadim & Kabatskyi, O. & Savenok, D. & Zakavorotnyi, O.. (2023). Prediction of Fill Factor and Charge Density of Self-Shielding Flux-Cored Wire with Variable Composition. *Materials Science*. 59. 10.1007/s11003-023-00738-7.
4. Olexandr Ivanov, Pavlo Prysyzhnyuk, Liubomyr Shlapak, Sergiy Marynenko, Lyudmyla Bodrova, Halyna Kramar, Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current, *Procedia Structural Integrity*, 36, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.028>.
5. Lozynskiy, Vasyl & Trembach, Bohdan & Katinas, Egidijus & Sadovyi, Kostiantyn & Krbařa, Michal & Balenko, Oleksii & Krasnoshapka, Ihor & Rebrova, Olena & Knyazev, Sergey & Кабацкий, Алекс & Kniazieva, Hanna & Ropyak, Liubomyr. (2024). Effect of Exothermic Additions in Core Filler on Arc Stability and Microstructure during Self-Shielded, Flux-Cored Arc Welding. *Crystals*. 14. 335. 10.3390/cryst14040335.
6. Pavlo Prysyzhnyuk, Olexandr Ivanov, Oleh Matvienkiv, Sergiy Marynenko, Oleh Korol, Ihor Koval, Impact and abrasion wear resistance of the hardfacings based on high-manganese steel reinforced with multicomponent carbides of Ti-Nb-Mo-V-C system, *Procedia Structural Integrity*, 36, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.014>.
7. Hillert, M. "Some viewpoints on the use of a computer for calculating phase diagrams." *Physica B+ C* 103.1 (1981): 31-40. [https://doi.org/10.1016/0378-4363\(81\)91000-7](https://doi.org/10.1016/0378-4363(81)91000-7)

УДК 519.21

Діана Глушкова¹, д.т.н., проф., Володимир Большаков², д.т.н., проф., Сергій Мариненко³, к.т.н., доц.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація: Технологія виробництва прокатних валків застосовується до багатопараметричних технологій, де дію органів можна підсилити фізичними властивостями металу, як-от твердість і пластичність. Для дослідження використовують сплав Fe-Cr-Ni на валках марки SSHN, з модифікаціями Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, V1 57 (M), Barinoc, Elgraf. Графоаналітичний метод визначив зону найбільш ефективних механічних характеристик для прокатних машин у межах хімічного складу та структурних параметрів.

Ключові слова: робоча зона параметрів, технологічний режим, хімічний склад, сплав Fe-Cr-Ni, механічна потужність

Diana Hlushkova, Volodymyr Volchuk, Serhii Marynenko

OPTIMIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF ROLLING ROLLS USING MULTIPARAMETRIC TECHNOLOGIES

Annotation: The technology of roll production is applied to multiparametric technologies, where the action of components can be enhanced by the physical properties of the metal, such as hardness and plasticity. The Fe-Cr-Ni alloy on SSHN rolls with modifications Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, V1 57 (M), Barinoc, Elgraf is used for the research. The graphical-analytical method identified the region of the most effective mechanical characteristics for rolling machines within the chemical composition and structural parameters.

Keywords: working area of parameters, technological mode, chemical composition, Fe-Cr-Ni alloy, mechanical power

Деякі з багатопараметричних технологій, наприклад, технологія прокатки валків, націлені на створення матеріалів із певними властивостями. Важливо зазначити, що деякі з цих властивостей можуть суперечити одна одній за своєю фізичною природою. Наприклад, підвищення твердості чавуну або сталі часто знижує їх пластичність і збільшує крихкість. Через це виникає необхідність визначити область компромісу, де протиріччя між різними критеріями залишаються в допустимих межах, забезпечуючи збалансовані властивості. Реалізація етапу визначення області компромісу за механічними властивостями досліджуваних валків вимагає врахування багатьох факторів. Більшість критеріїв, що характеризують продуктивність і ефективність технології, встановлюються стандартними технологічними процесами і нормативними документами, які підтримують технологічний процес в оптимальній робочій зоні параметрів для досягнення максимальної продуктивності і якості продукції.

У цьому дослідженні використовували чавунні валки версій СШХН (з 280 плавок загальною вагою близько 800 тонн) для покращення їх експлуатаційних характеристик, зокрема, твердості і зносостійкості. Обрані чавунні валки мали кулеподібну форму графіту та були леговані хромом і нікелем. Такі валки, такі як СШН-41, СШХН-45, СШХН-47, СШХН-50, стали популярними у металургійному виробництві, особливо на чорнових і передчистових станах, де потрібна висока міцність. Для виготовлення валків

також використовувалися модифікатори, такі як Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, VI 57 (M), Elgraf. Механічні властивості (σ_b , $\sigma_{зг}$, КС та HSD) визначали для робочої зони бочок чавунних валків виконання СШХН з гладкою бочкою на стандартизованому обладнанні, використовуючи випробувальну машину «INSTRON», маятниковий палеутворювач ПСВ 5, випробувальну машину ЦД-40, твердомір - склероскоп Шора. Аналіз хімічного складу, способів легування, умов термічної обробки та інших параметрів, що впливають на властивості валків, є ключовим аспектом цієї роботи, з використанням даних з різних джерел, включаючи результати лабораторних досліджень і нормативні документи.

Для поліпшення властивостей валків важливо було провести комплексний аналіз взаємозв'язку між складом матеріалу і його механічними властивостями, такими як міцність на розрив (σ_b), ударна в'язкість (КС), твердість (HSD) і міцність на вигин ($\sigma_{зг}$). Дослідження показали, що зміна вмісту хрому і нікелю значно впливає на ці властивості.

Крім хімічного складу, важливу роль відіграє структура матеріалу, включаючи розподіл і форму графітових включень і карбідів. Встановлення взаємозв'язку між конструктивними елементами і механічними властивостями дозволило розробити рекомендації щодо оптимального поєднання компонентів хімічного складу, що покращує експлуатаційні характеристики валків.

Визначення області компромісу є важливим кроком у розробці та вдосконаленні технологій виготовлення прокатних валків. Це дозволяє визначати пріоритети різних механічних властивостей, прогнозувати можливі зміни в процесі та автоматично коригувати склад сплаву для досягнення найкращих результатів. Такий підхід підвищує якість і довговічність продукції, що є важливим фактором у сучасній металургійній галузі.

Зона допустимих значень механічних властивостей для валків СШХН (рис. 1) враховує широкий спектр умов охолодження.

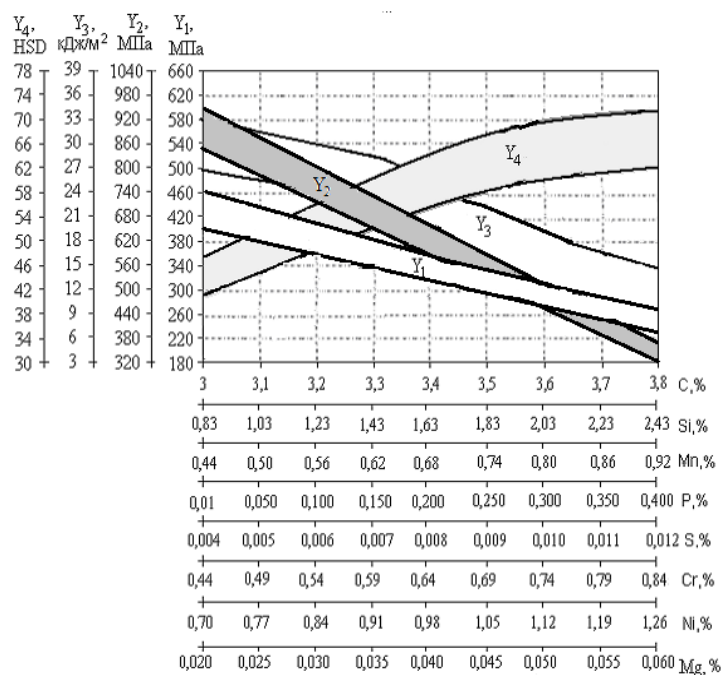
Середні розкиди хімічного складу для цих валків становили $\pm 0,22\%$ маси, а прогнозованих значень - $\pm 0,24\%$. Похибка значень механічних властивостей не перевищує 4,6% для експериментальних досліджень та 7,8% для прогнозів.

Для валків діаметром 300-1100 мм з перліт-графіт-цементитовим робочим шаром рекомендується знижувати концентрацію вуглецю до менше 2,8%. Це пов'язано з утворенням графітових включень, що знижують міцність і пластичність матеріалу. Вміст зв'язаного вуглецю до 1,2% підвищує твердість і міцність, але знижує пластичність.

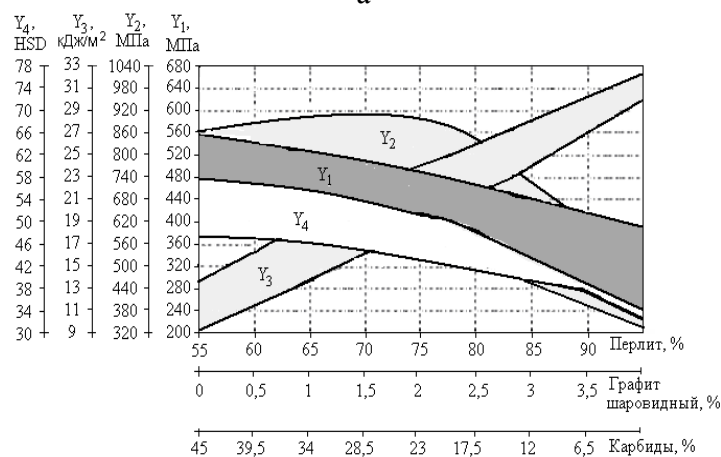
Дослідження показало, що вміст вуглецю в діапазоні 2,6-3,6% впливає на механічні властивості валків. Зі збільшенням вмісту вуглецю знижується межа міцності на вигин (з 940 МПа до 320 МПа) і ударна в'язкість (з 33 кДж/м² до 8 кДж/м²). Додаткові 0,1% вуглецю знижують міцність на 20 МПа.

Магнієві добавки ($\geq 0,03\%$) утворюють сферичні графітові включення, що підвищують зносостійкість, жароміцність і міцність валків. Кремній (0,2-0,4%) використовується для досягнення необхідного ступеня графітизації. Нікель (до 1,3%) легує ферит, зменшуючи графітові включення, що підвищує міцність і зносостійкість. Легування нікелю в межах 1,12-1,26% покращує ударну в'язкість і створює дрібнодисперсний перліт. Фосфор (до 0,5%) негативно впливає на міцність через утворення крихких фосфідних евтектик. Сірка (до 0,1%) збільшує твердість і крихкість валків.

Збільшення кількості пластинчастого перліту до 90% при вмісті карбиду до 6,5% підвищує ударну в'язкість до 33 кДж/м². Поєднання легуючих елементів і структурних компонентів оптимізує механічні властивості чавунних валків, забезпечуючи баланс між твердістю, міцністю і зносостійкістю.



а



б

Рис. 1 – Зони з найефективнішим поєднання механічних властивостей валків (області компромісу) з кулеподібною формою графіту в залежності від хімічного складу (а) та параметрів структури (б)

У дослідженні встановлено зону компромісу, яка забезпечує найбільш оптимальне поєднання механічних властивостей, таких як межа міцності σ_b , міцність на згин σ_{zg} , ударна в'язкість КС і твердість HSD, для робочої зони бочок прокатних валків типу СШХН (СШХН-41, СШХН-45, СШХН-47, СШН-50). Ця зона визначається конкретними межами вмісту компонентів, хімічним складом і параметрами структури, що включають відсотковий вміст кулеподібного графіту, пластинчастого перліту і карбідів.

Застосування запропонованого методу для визначення зони компромісу дозволяє надати пріоритет механічним характеристикам валків, прогнозувати зміни в технологічному процесі та автоматично вносити корективи в хімічний склад матеріалу. Рекомендації стосовно досягнення оптимального поєднання механічних властивостей σ_b , σ_{zg} , КС та HSD базуються на встановлених межах вмісту компонентів хімічного складу.

УДК 539.4

Альона Середя¹, головний інженер-дослідник

Роман Кравчук¹, канд. техн. наук, старший науковий співробітник

Олег Каток², канд. техн. наук, старший науковий співробітник

Микола Рудницький¹, канд. техн. наук, старший науковий співробітник

Володимир Швець¹, канд. техн. наук, старший науковий співробітник

Валерій Харченко¹, академік НАН України

¹Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренко НАН України, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЗНЕВУГЛЕЦЬОВАНОГО ШАРУ ЛЕГОВАНИХ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРІВ ТВЕРДОСТІ

Представлено використання методики визначення величини зневуглецьованого шару легованих високоміцних сталей за результатами вимірів твердості.

На зразках з листового прокату легованої високоміцної сталі марки Armoх 500Т різними методами, а саме металографічними дослідженнями мікроструктури, аналізом хімічного складу, мікро- та макроіндентування отримано результати, які підтвердили ефективність запропонованої методики.

Ключові слова: *метод, твердість, зневуглецьований шар, товщина зневуглецьованого шару, леговані сталі.*

Alona Sereda, Roman Kravchuk, Oleg Katok, Mykola Rudnyts'kyi, Volodymyr Shvets, Valeriy Kharchenko

DETERMINATION OF THE DECARBONIZED LAYER OF HIGH STRENGTH ALLOYED STEEL FROM THE RESULTS OF HARDNESS MEASUREMENTS

The use of a technique for determining the value of the decarbonized layer of high-strength alloy steels based on the results of hardness measurements is presented.

Key words: *method, hardness, decarbonized layer, decarbonized layer thickness, alloyed steels.*

Леговані високоміцні сталі застосовуються при виготовленні відповідальних деталей і елементів складних конструкцій спеціального призначення, які працюють в складних умовах статичного навантаження та короточасних інтенсивних динамічних навантажень в тому числі й імпульсних. Проведення вхідного контролю і контролю механічних характеристик під час виготовлення і експлуатації таких спеціальних конструкцій і їх елементів потребує вдосконалення методик контролю їх механічних характеристик. Особливо це стосується вуглецевих і легованих сталей з вмістом вуглецю не менше 0,3%, де є необхідність перевіряти наявність зневуглецьованого шару [1].

Згідно стандарту [2] встановлюються наступні методи оцінки глибини зневуглецьовання в загартованих і незагартованих сталевих виробках:

- а) відбіркові методи;
- б) мікроскопічні методи;
- в) методи вимірювання мікротвердості;
- г) методи хімічного аналізу.

Зазначені методи призначені для виявлення змін в мікроструктурі, твердості або вмісті вуглецю у поверхнях сталевих виробів внаслідок зневуглецьовання,

обумовленого нагріванням до високих температур під час гарячої деформації або термічної обробки. Ці методи трудомісткі і енергозатратні.

Пропонується методика визначення величини знеуглецьованого шару за допомогою результатів вимірів твердості у макродіпазоні зусиль індентування [3], що відноситься до відбіркових методів за [2].

Зважаючи на специфіку виробництва та використання конструкцій спеціального призначення (включаючи листовий прокат) пріоритетним було застосування апробованих методів та приладів неруйнівного контролю. Для цього підходить портативний твердомір ERNST Computest SC [4], що задовольняє всім вимогам методики, а саме нанесення малих розмірів відбитків.

Портативний твердомір Ernst Computest SC працює зі статичним навантаженням за методом Роквелла: з попереднім (11,8 Н) і робочим (49 Н) навантаженнями. Перевагою застосування даного твердоміра є малі розміри відбитків, що дає змогу зменшити відстань між ними, за рахунок чого можна уникнути використання методів мікроіндентування.

Підготовку поверхні зразка проводять у відповідності до ASTM E 3 [5].

На підтвердження придатності запропонованої методики визначення знеуглецьованого шару за результатами вимірів твердості були проведені порівняльні комплексні дослідження легваної високоміцної сталі марки Armoх 500Т у вигляді листового прокату товщиною 6 мм, що використовується для виробництва конструкцій спеціального призначення.

Зокрема вимірювали твердість за Брінеллем *HBW* згідно стандартів [6, 7] на стаціонарному твердомірі типу ТШ-2. Значення твердості за Брінеллем *HBW*, що отримані шляхом осереднення результатів п'яти вимірювань, на бокових поверхнях поперек прокатки та на верхній і нижній поверхнях листового матеріалу, приведено в таблиці.

Таблиця. Результати вимірювання твердості за Брінеллем легваної сталі Armoх 500Т.

Напрямок визначення твердості	Твердість за Брінеллем, HBW
Бокова поверхня поперек прокатки	543
Верхня поверхня зразка	418
Нижня поверхня зразка	424

Як видно з даних, наведених в табл., значення твердості за Брінеллем сталі Armoх 500Т, що визначені на бокових поверхнях поперек прокатки вищі ніж на поверхнях листового матеріалу на 30%.

Проведено металографічні дослідження мікроструктури на наявність знеуглецьованого шару, а також аналіз його хімічного складу. Металографічні дослідження проводили оптичним інвертованим мікроскопом «AXIOVERT 40 MAT» з фіксацією мікроструктур цифровою фотокамерою CANON A640 в програмі «AXIOVISION LE» при збільшеннях від 100 до 1000. Мікрошліфи виготовляли на установці «BUENLER» за стандартною методикою з подальшим виявленням мікроструктури травленням в 4% розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Хімічний склад поверхневого шару металу аналізували спектрометром DFS-36 на глибині 0,1 – 0,25 мм від поверхні, а також в середині листа на глибині 3 мм.

Як видно із рисунка, мікроструктура сталі в знеуглецьованих зовнішніх шарах металу містить бейніт і мартенсит, при цьому доля мартенситної складової та вміст вуглецю зростають по мірі віддалення від поверхні.

Також було визначено мікротвердість $HV_{0,1}$ і твердість за Брінеллем HB_{30} по товщині листа. Вимірювання мікротвердості $HV_{0,1}$ при навантаженні 100 г проводили мікротвердоміром ПМТ-3 згідно [8]. Твердість за Брінеллем HB_{30} вимірювалась портативним твердоміром ERNST Computest SC. Розподіл мікротвердості за Віккерсом $HV_{0,1}$ та твердості за Брінеллем HB_{30} по товщині листа представлено на рисунку.

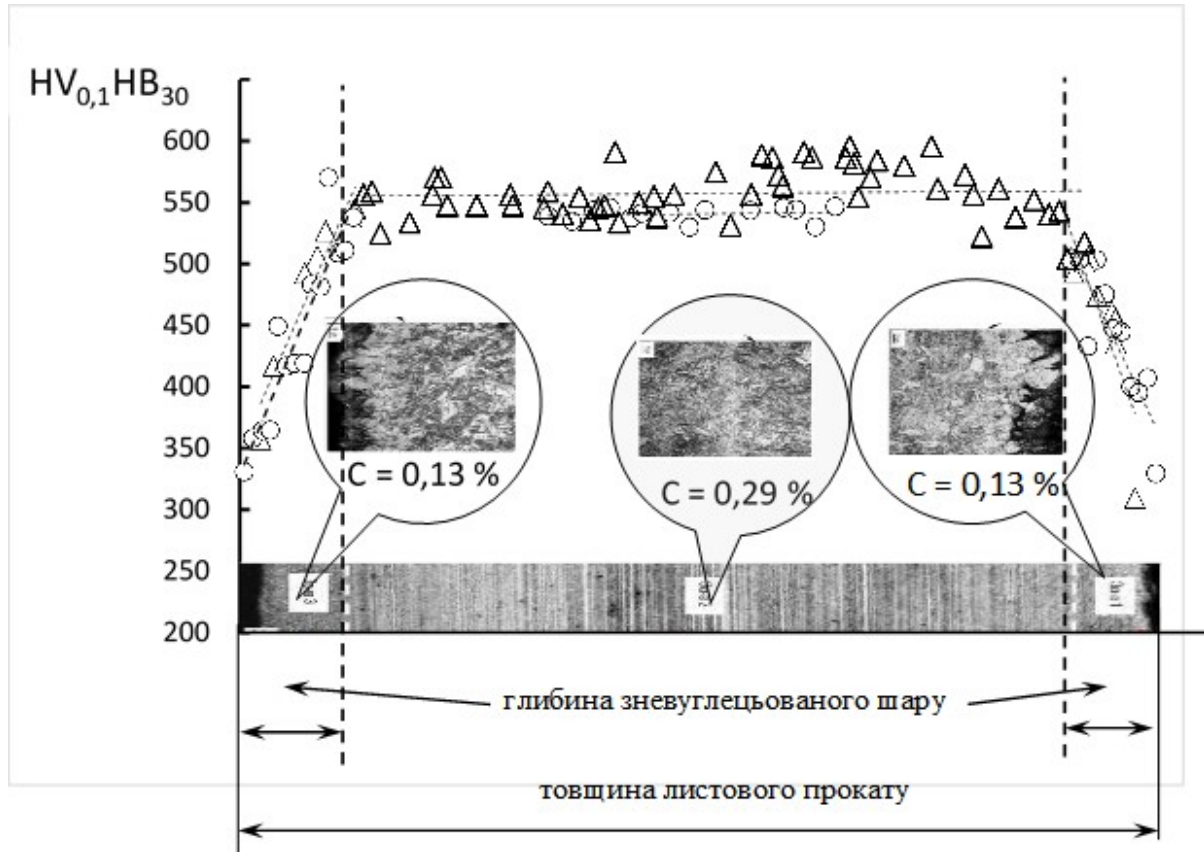


Рисунок. Розподіл мікротвердості за Віккерсом $HV_{0,1}$ (\circ) і твердості за Брінеллем HB_{30} (Δ) по товщині листа поперек прокатки, а також макро- та мікроструктура (винесні вставки) легированої сталі Armax 500T по товщині листа 6 мм в тій же площині за різних збільшень.

Розподіли твердості за Брінеллем і мікротвердості за Віккерсом по товщині листа носять аналогічний характер, а значення твердості HB_{30} змінюються від 330 з країв верхньої і нижньої поверхонь до 580 одиниць в середині листа. Різниця значень сягає 43%. Глибина знеуглецьованого шару сягає 0,8 мм.

Отримані результати свідчать про успішне застосування досить швидкої і економічної методики визначення величини знеуглецьованого шару за результатами вимірів твердості в макродіпазоні зусиль індентування на прикладі листового прокату легированої сталі Armax 500T.

Запропонована методика може бути використана для вхідного контролю якості матеріалу, встановлення припусків на обробку різанням, та оцінки впливу технології виробництва на знеуглецьовання.

Список літератури

[1]. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. В 3-х т. Под ред. Бернштейна М. Л., Рахштадта А. Г.

[2]. ASTM E 1077 Стандартні методи випробувань для оцінки глибини знеуглецювання сталевих зразків (ASTM E 1077 Standard test method for Estimating the Depth Decarburization of Steel Specimens).

[3]. Katok, O.A., Muzyka, M.R., Shvets, V.P. et al. Determination of Hardness of High-Strength Steels by Brinell Method. Part 2. Improvement of the Method and Measurement Results. Strength Mater 54, 802–808 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00456-6>.

[4]. Руководство по эксплуатации портативного твердомера Ernst Computest SC. – Ernst: Редакция 07.2002. – 34 с.

[5]. ASTM E 3-01 Методика приготування металографічних зразків. (ASTM E 3-01 Guide for Preparation of Metallographic Specimens).

[6]. СОУ 56-36-2021 «Матеріали металеві. Високоміцні та броньовані листові сталі. Визначення твердості за методом Брінелля». – Чинний з 06.01.2021.

[7]. ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 Матеріали металеві. Випробування на твердість по Брінеллю. Частина 1. Метод випробування (EN ISO 6506-1:2014, IDT; ISO 6506-1:2014, IDT). – Чинний з 01.11.2019.

[8]. ISO 6507-1:2023 specifies the Vickers hardness test method for the three different ranges of test force for metallic materials including hardmetals and other cemented carbides. – Чинний з 01.10.2023.

ББК 72
УДК 001+621
П66

Голова програмного комітету	Павло МАРУЩАК	/Україна/
Заступник голови програмного комітету	Володимир ДЗЮРА	/Україна/
Голова організаційного комітету	Ігор ОКІПНИЙ	/Україна/
Науковий секретар	Сергій МАРИНЕНКО	/Україна/

Члени програмного комітету

Андрейків О.Є.	Книш В.В.	Петраков Ю.В.
Барановський В.М.	Ковальов В.Д.	Підгурський М.І.
Биковський О. Г.	Кусий Я.М.	Пилипець М.І.
Брезінова Ж.	Косарчук В.В.	Повстяной О.Ю.
Будзан Б.П.	Кречковська Г.В.	Пискунов С.О.
Васильченко Я.В.	Келемен М.	Рябцев І.О.
Вухерер Т.	Марчук В.І.	Славов С.
Вінаш Я.	Макаренко Н.О.	Студент М.М.
Грицай І.Є.	Максимов С.Ю.	Ступницький В.В.
Грушко О.В.	Максимович О.В.	Стухляк П.Д.
Гуцайлюк В.Б.	Майданчук Т.Б.	Чаусов М.Г.
Гурей В.І.	Мено А.	Тарасовська С.О.
Дімітров Д.	Михайлишин Р.І.	Чирков О.Ю.
Духон Ф.	Никифорчин Г.М.	Ясній В.П.
Залога В.О.	Охріменко О.А.	Ясній О.П.
Звірко О.І.	Пашенко В.М.	Васильків В.В.
Кальченко В.В.	Пермяков О.А.	

П66 Прикладна механіка. Праці I Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль 6-7 червня 2024 р.) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. – 356 с.

ISBN 978-617-7875-80-1

У збірнику висвітлені доповіді I Міжнародної науково-технічної конференції "Прикладна механіка" (Тернопіль, 6-7 червня 2024 р.). Розглянуто наступні питання: сучасні технології машинобудування; нові методи зварювання, наплавлення, напилення; механіка руйнування матеріалів і конструкцій; надійність і довговічність механізмів і машин; покриття, нові технології нанесення; мехатроніка, робототехніка, дрони; прикладне матеріалознавство.

Відповідальний редактор Павло МАРУЩАК

Всі права захищені. Жодна з доповідей цього видання не може бути повністю чи частково відтворена або розмножена електронним, механічним, фото- чи будь-яким іншим способом без попереднього письмового погодження з програмним комітетом конференції. Всі доповіді відтворено з дозволу їх авторів.

Видавець не несе відповідальності за будь-який збиток, заподіяний особам чи власності внаслідок некоректності наданої в збірнику інформації або при використанні будь-яких методів, виробів чи ідей, які описано в поданих авторами доповідях.

ISBN 978-617-7875-80-1

©Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024

Підписано до друку 14.06.2024. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно-друк. арк. 21,3. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 14062024

Друк ФОП Паляниця В. А.
Свідоцтво ДК №4870 від 20.03.2015 р.
м. Тернопіль, вул. Б. Хмельницького, 9а, оф.38.
тел. (0352) 528-777.

