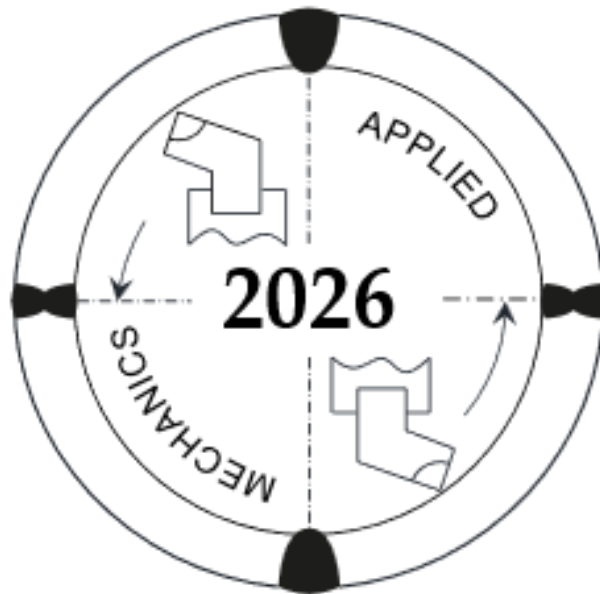


**Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України
Національний технічний університет 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 (Польща)
Маріборський університет (Словенія)
Товариство зварників України**



**II Міжнародна науково-технічна конференція
“ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА”**

**4 - 5 червня,
Тернопіль, 2026**

ББК 72
УДК 001+621
П66

Голова програмного комітету	Павло МАРУЩАК	/Україна/
Голова організаційного комітету	Ігор ОКІПНИЙ	/Україна/
Науковий секретар	Сергій МАРИНЕНКО	/Україна/

Члени програмного комітету

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

Прикладна механіка. Праці II Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль 4-5 червня 2026 р.) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026. – 292 с.

ISBN 978-617-8751-20-3

У збірнику висвітлені доповіді II Міжнародної науково-технічної конференції "Прикладна механіка" (Тернопіль, 4-5 червня 2026 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

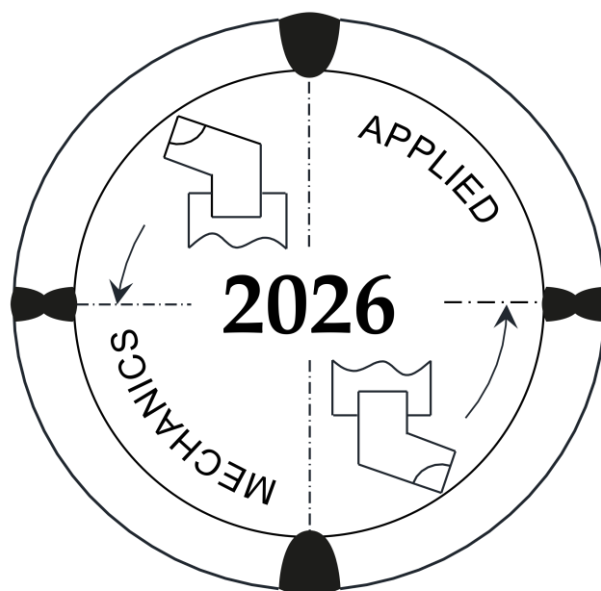
Всі права захищені. Жодна з доповідей цього видання не може бути повністю чи частково відтворена або розмножена електронним, механічним, фото- чи будь-яким іншим способом без попереднього письмового погодження з програмним комітетом конференції. Всі доповіді відтворено з дозволу їх авторів.

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 978-617-8751-20-3

©Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,2026

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
Karpenko of Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine
G.S. Pysarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Lviv Polytechnic National University
Zaporizhzhia Polytechnic National University
Donbas State Machine-Building Academy
Vinnytsia National Technical University
Košice Technical University
Military-Technical Academy (Poland)
University of Maribor (Slovenia)
Association of Welders of Ukraine**



**II International Scientific and Technical Conference
“APPLIED MECHANICS”**

**June 4–5,
Ternopil, 2026**

ЗМІСТ

Секція: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

Іван Бельмас; Ганна Танцура, д.т.н., проф.; Олена Білоус, к.т.н., доц.; Ангеліна Швачка АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ЗМІННОГО ПЕРЕРІЗУ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОПОТЕНЦІАЛЬНОГО МЕТОДУ	12
Роман Бица, к.т.н., доц. ОБМЕЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ КІЛЬКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ОЦІНЮВАННІ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ ОБ'ЄМНОГО КЛАСУ	15
Василь Васильків, д.т.н., проф.; Назарій Маковинський; Олександр Корнев ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ГВИНТОВИХ ВИРОБІВ, СИНТЕЗОВАНИХ МЕТОДАМИ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ	17
Ігор Грицай, д.т.н., проф.; Богдан Столяр КІНЕМАТИЧНА КОНЦЕПЦІЯ ФОРМОТВОРЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ЧЕРЕЗ КЕРОВАНИЙ РУХ ІНСТРУМЕНТУ	21
Катерина Дейнека, к.т.н.; Юрій Науменко, д.т.н., доц. ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ РОЗВ'ЯЗАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МІЖГАЛУЗЕВОЇ ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ В БАРАБАННИХ МАШИНАХ НА ОСНОВІ ВСТАНОВЛЕНОГО ЕФЕКТУ САМОЗБУДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ.....	25
Наталія Доценко, д.пед.н, проф.; Олена Баранова АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І СИЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ У МЕХАНІЗМАХ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ РОСЛИННОЇ ОЛІЇ.....	29
Андрій Дячун, к.т.н., доц.; В. Грасовник ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НАВИВНИХ СТРІЧКОВИХ ГВИНТОВИХ ЗАГОТОВОК.....	33
Віктор Ковальов, д.т.н., проф.; Галина Клименко, д.т.н., проф.; Яна Васильченко, д.т.н., проф.; Максим Шаповалов, к.т.н., доц.; Юрій Лобур СИСТЕМА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТОЧНІСТЮ З ПОКРАЩЕНОЮ ДИНАМІКОЮ ДЛЯ ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ ЯК МЕХАТРОННА СИСТЕМА.....	36
Олексій Куроп'ятник, к. т. н., доц. ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ШАХТНИХ КОНВЕЄРІВ.....	40
Олександр Лисенко, к.т.н, доц.; Іван Валявський, к.т.н, доц.; Михайло Короленко ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО АЛМАЗУ (ЛОНСДЕЙЛІТУ) В ІНСТРУМЕНТАЛЬНОМУ ВИРОБНІТВІ.....	44
Ярослав Литвиненко, д.т.н., проф.; Володимир Дзюра д.т.н., проф.; Катерина Марущак КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕГУЛЯРНОГО І ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПЛОЩИННОЇ ОДНОРІДНОСТІ.....	47

Ігор Луців, д.т.н., проф.; Віталій Волошин, к.т.н., доц.; Валерій Буховець, к.т.н.	
ЗАТИСКНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ З ІНТЕГРОВАНИМИ ПРУЖИННИМИ ПРИВОДАМИ ЗАТИСКУ.....	50
Володимир Нерубацький, к.т.н., доц.	
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТЕПЛОВОЗА НА РЕЖИМИ ЙОГО РОБОТИ ЗАСОБАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	53
Микола Підгурський, д.т.н., проф.; Наталія Макаренко, д.т.н., проф.; Микола Сташків, к.т.н., доц.; Іван Підгурський, к.т.н., доц.; Денис Биків, Віталій Сенчишин	
ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО ПІДСИЛЕНИХ ОТВОРІВ В ПРИОПОРНІЙ ЗОНІ ПЕРФОРОВАНИХ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК.....	55
Роман Рогатинський, д.т.н., проф.; Андрій Дячун, к.т.н., доц.; Тарас Пелешок, к.т.н.; Павло Леськів; Владислав Пеньонжко	
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ХОЛОДНОГО НАВИВАННЯ СПІРАЛЕЙ ШНЕКІВ НА РЕБРО.....	59
Володимир Савків к.т.н., доц., Петро Федорів, Ігор Федорів, Андрій Ландяк	
ПНЕВМО-СТРУМЕНЕВІ ПРИСТРОЇ ПОДАЧІ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ. Андрій Сенік, к.т.н., доц.; Володимир Кобельник, к.т.н., доц.; Роман Лещук, к.т.н., доц.; Оксана Кобельник, к.т.н.	62
ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПРИВОДНИХ РОЛИКОВИХ ЛАНЦЮГІВ ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ НА ЗГОРТНИХ ВТУЛКАХ МЕТОДОМ ВІБРООБКОЧУВАННЯ.....	64
Вадим Ступницький, д.т.н., проф.; Тарас Оленюк	
ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАМІНИ ОПЕРАЦІЇ КООРДИНАТНОГО ШЛІФУВАННЯ НА ОПЕРАЦІЮ ЧИСТОВОГО РОЗТОЧУВАННЯ ПІДЧАС ОБРОБЛЕННЯ ГАРТОВАНОЇ ЗАГОТОВКИ.....	69
Секція: НОВІ МЕТОДИ ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ, НАПИЛЕННЯ	
Viktor Shapovalov, Kostiantyn Zlyhoriev, Vitalii Porokhonko, Farit Biktagirov, Volodymyr Barabash, Oleksandr Hnatushenko, Anatolii Ihnatov	
EFFECT OF METAL BATH STIRRING INTENSITY ON STEEL INGOTS CONTAMINATION WITH SLAG INCLUSIONS.....	73
Роман Бішак, к.т.н., доц.; Павло Марушак, д.т.н., проф.; Андрій Блавіцький	
ОСОБЛИВОСТІ РЕМОНТУ КОРОЗІЙНИХ ДЕФЕКТІВ ГАЗОПРОВІДІВ НАПЛАВЛЕННЯМ.....	77
Станіслав Драган, к.т.н.; Юрій Ярослав, к.т.н.; Дмитро Гладченко	
ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДУГИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ АРМАТУРНИХ СТРИЖНІВ РОЗТЯГНУТОЮ ДУГОЮ ПІД ФЛЮСОМ	80
Лагодзінський І.М., PhD; Квасницький В.В., д.т.н., проф.; Чорний А.В., к.т.н.; Зворикін К.О., к.т.н., доц.; Черній В.О.	
АЛГОРИТМІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЦИКЛУ ВААМ ВИГОТОВЛЕННЯ З АДАПТИВНИМ УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ПРОСТОРОВИХ ВИРОБІВ.....	82
Валерій Лазарюк, к.т.н., доц.; Зіновій Грондзаль, к.т.н.; Андрій Блавіцький, Павло Сокіл	
ВПЛИВ ТЕРМІЧНОГО ЦИКЛУ НА ПОВЕДІНКУ ВОДНІЮ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ СТАЛЕЙ.....	85

Іван Лентюгов, к.т.н, ст. досл.; Владислав Осін, к.т.н.; Андрій Северин, к.т.н, ст. досл.	
ОЦІНКА ЯКОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО ШАРУ З ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ ВИКОНАНОГО ЗА ДОПОМОГОЮ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ.....	87
Тарас Майданчук, к.т.н., ст. досл.; Анатолій Бондаренко; Євгенія Лук'янченко; Сергій Мариненко; Дмитро Степченко	
ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВОЇ СТАЛІ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВПЛИВОМ НА ЗВАРЮВАЛЬНУ ВАННУ.....	90
Тарас Майданчук, к.т.н.,ст. досл.; Дмитро Степченко; Сергій Мариненко; Євгенія Лук'янченко	
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТАЛОПОРОШКОВОГО ДРОТУ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ З ВИСОКИМИ ПОКАЗНИКАМИ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ.....	94
Тарас Майданчук, к.т.н.,ст. досл.; Андрій Ганчука; Євгенія Лук'янченко; Сергій Мариненко; Анатолій Бабинець, к.т.н., с.н.с.	
ОСОБЛИВОСТІ З'ЄДНАНЬ МІДНИЙ СПЛАВ – СТАЛЬ МАРКИ 20Х13, ОТРИМАНИХ ПЛАЗМОВО-ДУГОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ.....	98
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.; Анатолій Мініцький, д.т.н., проф.; Віталій Михайліченко; Роман Марчук; Іван Вдовиченко; Дмитро Вдовиченко	
КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ТА ПЕРЕВАГИ ТЕХНОЛОГІЇ WAAM ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ КРИВОЛІНІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ...	101
Марія Паньків, д.т.н.,проф.; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Віталій Паньків, к.т.н., доц.	
ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ТОЧКОВОГО КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	103
Марія Паньків, д.т.н.,проф.; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Ігор Окіпний, к.т.н., доц.; Олег Гурик, к.т.н., доц.; Віталій Паньків, к.т.н., доц.	
ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ В УМОВАХ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	105
Валерій Перемітько, д.т.н., проф.; Ігор Коломоець, PhD, доц.; Сергій Плітченко, к.т.н., доц.; Михайло Чумак; Денис Драничер	
КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ.....	107
Юрій Попіль, к.т.н., доц.; Денис Степанов, к.т.н., доц.; Сергій Мінаков, к.т.н., доц.; Антон Мінаков, к.т.н.; Євгенія Чвертко, к.т.н., доц.; Наталія Стреленко, к.т.н., доц.; Ілля Перемітько; Прищепка Аліна; Євгеній Приймак	
РІЗАННЯ МЕТАЛІВ ВЕЛИКОЇ ТОВЩИНИ КИСНЕМ НИЗЬКОГО ТИСКУ.....	111
Олексій Прокоф'єв, к.т.н.; Руслан Губатюк, к.т.н., с.н.с.; Сергій Римар, д.т.н., с.н.с.; Євген Пантелеймонов, к.т.н., с.н.с.; Валерій Абдулах; Олексій Нікрітін	
ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ-ПАЯННЯ ПІД ТИСКОМ У ВИГОТОВЛЕННІ БАГАТОШАРОВИХ ОБОЛОНКОВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	113
Пулька Ч.В., д.т.н., проф.; Сенчишин В.С., к.т.н., доц.; Окіпний І.Б. к.т.н., доц.; Сенчишин Віт. С.; Бордун В.Л.	
ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРООБРОБЛЕННЯ В ЗВАРЮВАННІ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ.....	115

І. Серебряник, к.т.н.; М. Полещук, к.т.н.; В. Бовкун; І. Кривко; Сергій Мариненко, к.т.н., доц. ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЦНОСТІ КОАКСІАЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ ДЕТАЛЕЙ КРУГЛИХ ФОРМФАКТОРІВ, ВИКОНАНОГО МАГНІТНО – ІМПУЛЬСНИМ ЗВАРЮВАННЯМ ВІД ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ.....	119
Святослав Фик ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ БАГАТОШАРОВИХ ЗВАРНИХ ШВІВ У ВУЗЛІ КРІПЛЕННЯ НОЖІВ ДО ВАЛІВ ДВОХВАЛЬНОГО ШРЕДЕРА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ.....	121
Олексій Швець, к.т.н., доц.; Сергій Березовецький, к.т.н., доц.; Петро Коруняк, к.т.н., доц. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АДИТИВНОГО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ.....	124
Секція: МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ	
Олег Герасимчук, д.т.н., с.н.с.; Олег Кононученко, к.т.н., ст. досл. ОЦІНКА ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ СТАЛЕВИХ ЗРАЗКІВ ЗА ЗМІННОГО РОЗМАХУ НАПРУЖЕНЬ ЦИКЛУ.....	128
Галина Кречковська, д.т.н., ст. досл. МЕТАЛОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАКЛЕПКОВИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ.....	132
Юрій Крутій, д.т.н., проф.; Алла Перпері, к.т.н., доц.; Данило Величко ПРО ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ КРУГЛИХ ПЛАСТИН НА СТЕПЕНЕВО-ЗМІННІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ.....	135
Микола Чаусов, д.т.н., проф.; Павло Марущак, д.т.н., проф.; Владислав Шманенко ЕФЕКТИ СУМІСНОГО ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ НЕЗРІВНОВАЖЕНИХ ПРОЦЕСІВ І КРІОГЕННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ЗМІНУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ AISI 201.....	138
Володимир Семенюк; Ярослав Ковальчук, к.т.н., доц. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ ЗА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ СТАТИЧНИХ ТА ВИПАДКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	141
Петро Соловей м.н.с.; Галина Кречковська, д.т.н., ст. досл.; Олександра Студент, проф., д.т.н.; Іван Курнат МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 20X13 ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЛОПАТКАХ РОТОРА ПАРОВОЇ ТУРБИНИ.....	143
Василь Антонюк; Микола Сташків, к.т.н., доц.; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Іван Брошак, к.с-г.н., доц. АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НАПІВПРИЧЕПА-ЦИСТЕРНИ З ДІАГНОСТИКОЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ТРІЩИН.....	147
Вадим Хворостяний, к.т.н., ст. досл.; Микола Долгов, д.т.н., проф.; Світлана Тарасовська, к.т.н., ст. досл.; Наталія Немерцева; Андрій Кравчук, к.т.н., ст. досл.; Максим Цисар, к.т.н.; Володимир Бодунов ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРИВАЛОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ІОННОГО ОБМІНУ НА ГРАНИЦЮ МІЦНОСТІ ФЛОАТ-СКЛА В УМОВАХ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ЗГИНУ.....	150

Вікторія Пастернак, к.т.н, доц.; Олег Ясній, д.т.н, проф.; Георгій Сулим, д.ф.-м.н., проф.	
ЕНЕРГЕТИЧНІ УМОВИ КОНТАКТУ КРИСТАЛІЧНИХ ТА КВАЗИКРИСТАЛІЧНИХ ТІЛ.....	154
Олег Ясній, д.т.н., проф.; Павло Марущак, д.т.н., проф.; Ірина Дідич, д-р філософії, доц.; Дмитро Тимошук, Любов Цимбалюк, к.ф.-м.н., доц.	
АНАЛІЗ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ В ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ ЗА РІЗНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ НАВАНТАЖЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОЯСНЮВАЛЬНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ...	156
Секція: НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН	
Іван Бельмас, д.т.н., проф.; Дмитро Часов, к.т.н., доц.; Всеволод Бейгул, к.т.н., доц.; Назар Захаров; Дмитро Серілко, к.т.н., доц.	
ДО ПИТАННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕНТІВ ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ (ДВОШАРОВІ КОМПОЗИТИ).....	160
Григорій Габрусев, к.ф.-м.н., доц.; Ірина Габрусєва, к.т.н., доц.; Борис Шелестовський, к.ф.-м.н., доц.	
ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПЛАСТИНІ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВАННІ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ..	162
Андрій Гупка, к.т.н., доц.; Олег Цьонь, к.т.н., доц.; Олег Ляшук, д.т.н., проф.; Тетяна Пиндус; Степан Остапчук	
СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ.....	166
Антон Нетяга, к.т.н., н.с.; Юрій Кусков, д.т.н., с.н.с.	
ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ У СТРУМОПРОВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ФУТЕРОВОК ЩОКОВОЇ ДРОБАРКИ СМД-111.....	171
Сергій Попов, д.ф.н., проф.; Михайло Гребешков	
НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ І КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗНОШУВАННІ В СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ІНЖЕНЕРНИХ КАДРІВ.....	174
Роман Рогатинський, д.т.н., проф.; Олена Дмитрів, к.т.н., доц.; Лілія Рогатинська; Ігор Головач; Андрій Скоропляс	
КОЛИВАННЯ БЕЗВАЛЬНИХ СПІРАЛЬНИХ ШНЕКІВ.....	179
Наталія Сметанкіна, д.т.н., проф.;Сергій Моргун, к.т.н., доц.	
КОНТАКТНІ НАПРУЖЕННЯ В РОТОРІ СУДНОВОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА.....	183
Секція: ПОКРИТТЯ, НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ	
Володимир Гвоздецький, д.т.н., ст. досл.; Нестор Мозола; Назар Остапчук; Михайло Студент, д.т.н., проф.; Христина Задорожна, к.т.н., с.н.с.; Олександр Гасій, д.т.н., проф.; Іван Гончар, к.т.н., доц.; Галина Веселівська, к.т.н., ст. досл.	
ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ НАДЗВУКОВИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ НАПИЛЕНИХ НА ПІДКЛАДКИ ІЗ СТАЛІ ТА АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ	186
Володимир Гвоздецький, д.т.н., ст. досл.; Дмитро Яремчук; Михайло Студент, д.т.н., проф.; Христина Задорожна, к.т.н., с.н.с.; Олександр Гасій, д.т.н., проф.; Іван Гончар, к.т.н., доц.; Галина Веселівська, к.т.н., ст. досл.	
ВИБІР ЕЛЕКТРОЛІТУ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО АНОДУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.....	190

Сергій Калюжний, к.т.н., ст. досл.; Сергій Войнарович, к.т.н., с.н.с.; Олександр Кислиця, к.т.н., ст. досл.; Людмила Малахова ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ДИСПЕРГОВАНИХ ЧАСТИНОК ТАНТАЛОВОГО ДРОТУ В ПРОЦЕСІ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ.....	192
Олег Кравченко ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЛАМІНУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ.....	196
Лариса Лопата, к.т.н., доц.; Віталій Калініченко, к.т.н., с.н.с.; Олександр Лопата, PhD, с.н.с. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ ТА КОНСТРУКЦІЙ.....	200
Павло Присяжнюк, д.т.н.; проф.; Коржов Андрій ДЕФОРМАЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ НАПЛАВЛЕНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ВИСОКОМАРГАНЦЕВОЇ СТАЛІ, АРМОВАНОЇ КОМПЛЕКСНИМИ КАРБИДАМИ, ЯК МЕХАНІЗМ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ В УМОВАХ УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ.....	203
Олег Ткачук, к.т.н., ст. досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.; Ірина Погрелюк, д.т.н., проф.; Роман Проскурняк, к.т.н.; Христина Задорожна, к.т.н., ст. досл. ВПЛИВ ПАРЦІАЛЬНОГО ТИСКУ АЗОТУ НА ФОРМУВАННЯ НІТРИДНИХ ШАРІВ НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ ВТ6.....	206
Секція: МЕХАТРОНІКА, РОБОТОТЕХНІКА, ДРОНИ	
Андрій Горкуненко, к.т.н., доц. РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ В МЕДИЦИНІ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ.....	210
Віталій Корендій, к.т.н., доц.; Олег Парацин; Тарас Вільчинський; Олександр Янів; Владислав Киричук ПЕРСПЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ ВІБРОЗБУДНИКІВ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	212
Віталій Корендій, к.т.н., доц.; Назарій Федунішин; В'ячеслав Пасіка, д.т.н., проф.; Ігор Лаушник, к.т.н., доц.; Наталія Гембара, к.т.н., доц. СИЛОВИЙ АНАЛІЗ ШАРНІРНО-ВАЖІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ОДНОРУЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРЬОМА ПЕДАЛЯМИ АВТОМОБІЛЯ.....	216
Артур Микитишин; Ігор Коноваленко, к.т.н., доц.; Павло Марущак, д.т.н., проф. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИЯВЛЕННІ ДЕФЕКТІВ СТАЛЕВОЇ ПЛАСТИНИ НА ОСНОВІ МЕРЕЖІ YOLO26.....	220
Роман Михайлишин, к.т.н.; Флоріс Еріх, к.т.н.; Франтішек Духон, к.т.н., проф.; Іван Віргала, к.т.н., проф.; Міхал Келемен к.т.н., проф.; Джін Сяо, к.т.н., проф.; Енн Маєвич Фей, к.т.н., проф.; Кенсукє Харада, к.т.н., проф.; Яукіясу Домає, к.т.н. ВІБРАЦІЇ ДЕФОРМІВНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ РІЗНИХ МЕТОДАХ ЗАХОПЛЕННЯ	223
Володимир Савків к.т.н., доц.; Ігор Федорів; Соломія Федорів БЕЗКОНТАКТНЕ ЗАХОПЛЕННЯ У РОБОТОТЕХНІЦІ.....	227
Віталій Яропуд, д.т.н., доц. АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕНЬ АПК З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....	230

Секція: ПРИКЛАДНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Lauris Jankovskis, M.Sc., PhD Student, researcher, Inese Kokina, Dr. biol., Professor, Iona Plaksenkova, PhD., Researcher, Marija Jermalonoka, M.Sc., researcher, Aleksandra Mošenoka, B.Sc., researcher, Agnieszka Ostrowska PhD., researcher, Renata Galek, PhD., Professor, Karolina Wiśniewska M.Sc, researcher, Marta Kutwin, PhD., Professor	
ROLE OF MEDICAGO SATIVA L. MEDIATED BIOLOGICAL SYNTHESIS OF AU AND AG NANOPARTICLES IN ANTICANCER APPLICATIONS.....	234
Ігор Вакуленко, д.т.н., проф.; Сергій Плітченко, к.т.н., доц.; Тетяна Калініна, к.т.н., доц.	
ВПЛИВ ІМПУЛЬСІВ НАПРУЖЕНЬ НА ЦИКЛІЧНУ ВИТРИВАЛІСТЬ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНОЇ СТАЛІ.....	237
Володимир Волчук, д.т.н., проф.; Діана Глушкова, д.т.н., проф.; Дмитро КАЗАРЯН; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Віктор Сенчишин, к.т.н., доц.; Ігор КОВАЛЬ, к.т.н., доц.	
ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНІВ.....	241
Діана Глушкова, д.т.н., проф.; Володимир Волчук, д.т.н., проф.; Ігор Тимченко; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Тарас Майданчук, к.т.н., доц.; Ігор Коваль, к.т.н., доц.	
ВСТАНОВЛЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ТВЕРДОСТІ ДО СТРУКТУРИ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ.....	246
Василь Ковбашин, к.х.н., доц.; Ігор Бочар, к.т.н., доц.	
ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ МОЛІБДЕНУ ТА ВОЛЬФРАМУ...	249
Володимир Нерубацький, к.т.н., доц.; Артур Каграманян, к.т.н., доц.; Ганна Комарова, к.т.н., доц.; Олена Зінченко, к.т.н.; Дмитро Волошин, к.т.н., доц.	
АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТІВ ZrO ₂ -WC.....	252
Віталій Порохонько, к.т.н.; Євгеній Тітков, PhD; Тарас Майданчук, к.т.н.; Сергій Мариненко, к.т.н.	
ВПЛИВ ТЕРМОЦИКЛІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МІКРОСТРУКТУРНУ ЕВОЛЮЦІЮ СПЛАВУ TiNi, ОТРИМАНОГО МЕТОДОМ МАГНІТОКЕРОВАНОЇ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ПЛАВКИ.....	255
Павло Присяжнюк, д.т.н., проф.; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Людмила Бодрова, к.т.н., доц.; Галина Крамар, к.т.н., доц.; Олег Гурик, к.т.н., доц.; Ігор Коваль, к.т.н., доц.	
СПЕКТРАЛЬНІ ФУНКЦІОНАЛИ ТЕНЗОРА ПРУЖНОЇ ЖОРСТКОСТІ ЯК ФІЗИЧНО ОБҐРУНТОВАНА ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТВЕРДОСТІ ТА СПРЯМОВАНОГО ПОШУКУ КРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУР.....	258
Павло Присяжнюк, д.т.н., проф.; Андрій Харлов	
МІКРОМЕХАНІЧНО ОБҐРУНТОВАНИЙ ІНДЕКС РІЖУЧОЇ КРИВИНИ ЧАСТИНОК АБРАЗИВУ ТА КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ ПРИСКОРЕНИХ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ.....	261
Михайло Студент, д.т.н., проф.; Олександр Лук'яненко, к.т.н., ст. досл.; Олександра Студент, д.т.н., проф.; Володимир Гвоздецький, д.т.н., ст. досл.; Василь Труш, д.т.н., ст. досл.; Христина Задорожна, к.т.н.	
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВУ ВТ6 ПІСЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДИФУЗІЙНИМ НАСИЧЕННЯМ АЗОТОМ ТА КИСНЕМ У ДИНАМІЧНОМУ ВАКУУМІ.....	265

Петро Стухляк, д.т.н., проф.; Олег Вербицький АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	269
Володимир Ромащенко, к.т.н., с.н.с.; Світлана Тарасовська, к.т.н., ст. досл.; Петро Лепіхін, д.ф.-м.н., проф.; Олег Бейнер; Сергій Мариненко, к.т.н., доц. МІЦНІСТЬ МЕТАЛОКОМПОЗИТНИХ ЦИЛІНДРІВ ЗА УМОВ ВНУТРІШНЬОГО ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	273
Олександр Яровицин, к.т.н., ст. досл.; Микола Черв'яков, д.т.н., с.н.с.; Юрій Никитенко, к.т.н., ст. досл.; Едуард Вржижевський; Іван Волосатов; Олександр Наконечний ОЦІНКА ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ НІКЕЛЕВОГО ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ INCONEL 718, ВИКОНАНОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ЗВАРЮВАННЯМ.....	277
Kamila Narojczyk, Barbara Nasiłowska, Marta Kutwin, Robert Szczepaniak SELECTED PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GRAPHENE – OXIDE – COATED DENTAL IMPLANTS.....	281
Микола Шашків, Микола Підгурський, Іван Підгурський, Олег Підлужний, Василь Антонюк, Василь Оливко ВПЛИВ ТРІЩИНИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНИЙ СТАН ШВЕЛЕРА З КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРУЖЕНЬ У ВИГЛЯДІ КРУГЛОГО ОТВОРУ ...	285
Valentyn Uchanin, Oleg Karpash, Sergiy Voytenko, Ihor Rybitskyi, Maksym Karpash EDDY CURRENT AND ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE TECHNIQUES FOR STRUCTURAL INTEGRITY MONITORING.....	288

Секція: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.05:620.179.1

Іван Бельмас¹; Ганна Танцура¹, д.т.н., проф.; Олена Білоус¹, к.т.н., доц.; Ангеліна Швачка²

¹ Дніпровський державний технічний університет, Україна

² Мукачівський машинобудівний завод, Україна

АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ЗМІННОГО ПЕРЕРІЗУ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОПОТЕНЦІАЛЬНОГО МЕТОДУ

Анотація. У роботі представлено наукове обґрунтування автоматизованої системи моніторингу зварних вузлів змінного перерізу з використанням електропотенціального методу. Розроблений алгоритм дозволяє ідентифікувати мікротріщини на стадії зародження ($h < 1$ мм), забезпечуючи зниження металоемності конструкцій на 5–10% за рахунок точного контролю запасів міцності.

Ключові слова: моніторинг стану конструкцій, електропотенціальний метод, змінний переріз, напружено-деформований стан, зародження дефектів, металоемність.

Ivan Belmas, Hanna Tancura, Olna Bilous, Anhelina Schvachka

AUTOMATED CONDITION MONITORING OF VARIABLE CROSS-SECTION METAL STRUCTURES BASED ON THE ELECTRIC POTENTIAL METHOD

Abstract. The paper provides a scientific substantiation for an automated monitoring system for welded nodes with variable cross-sections using the electric potential method. The developed algorithm allows for the identification of microcracks at the initiation stage ($h < 1$ mm), ensuring a 5–10% reduction in the metal intensity of structures due to precise control of actual strength reserves.

Keywords: structural health monitoring, electric potential method, variable cross-section, stress-strain state, defect initiation, metal intensity.

Забезпечення надійності складних металоконструкцій (навантажувальних рам, мобільних платформ) виробництва провідних брендів (Lemken, King, Movex тощо) потребує впровадження систем безперервного моніторингу (SHM). Традиційні методи дефектоскопії не дозволяють проводити діагностику в реальному часі під час експлуатації обладнання «в полі».

Розробка наукових засад та технічних засобів автоматизованого контролю напружено-деформованого стану (НДС) вузлів змінного перерізу з використанням тіла конструкції як діагностичного середовища.

В основу роботи покладено електропотенціальний метод контролю [1-2]. Наукова новизна полягає у переході від аналізу гумотросових канатів до жорстких зварних вузлів змінного перерізу. Суть методу полягає у пропуску стабілізованого струму через критичну ділянку. При виникненні мікротріщин змінюється локальна густина струму j , що описується рівнянням Лапласа для потенціалу електричного поля ϕ :

$$\Delta\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0$$

з граничними умовами, що враховують зміну геометрії перерізу.

Для виключення впливу зовнішніх факторів (температура, вологість) застосовано диференціальну схему з використанням компенсаційного зонда. Це дозволяє пристрою «Smart-Ramp-Control» стабільно працювати в діапазоні від -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Розроблено алгоритм, який дозволяє ідентифікувати дефекти на стадії їх зародження глибиною < 1 мм. На рис. 1 представлена отримана залежність відносної зміни потенціалу $\Delta U/U$ від глибини тріщини h , що підтверджує високу чутливість методу. Впровадження системи дозволяє не тільки підвищити безпеку, а й знизити металлоємність виробів на 5-10% за рахунок точного знання реальних запасів міцності кожного вузла.

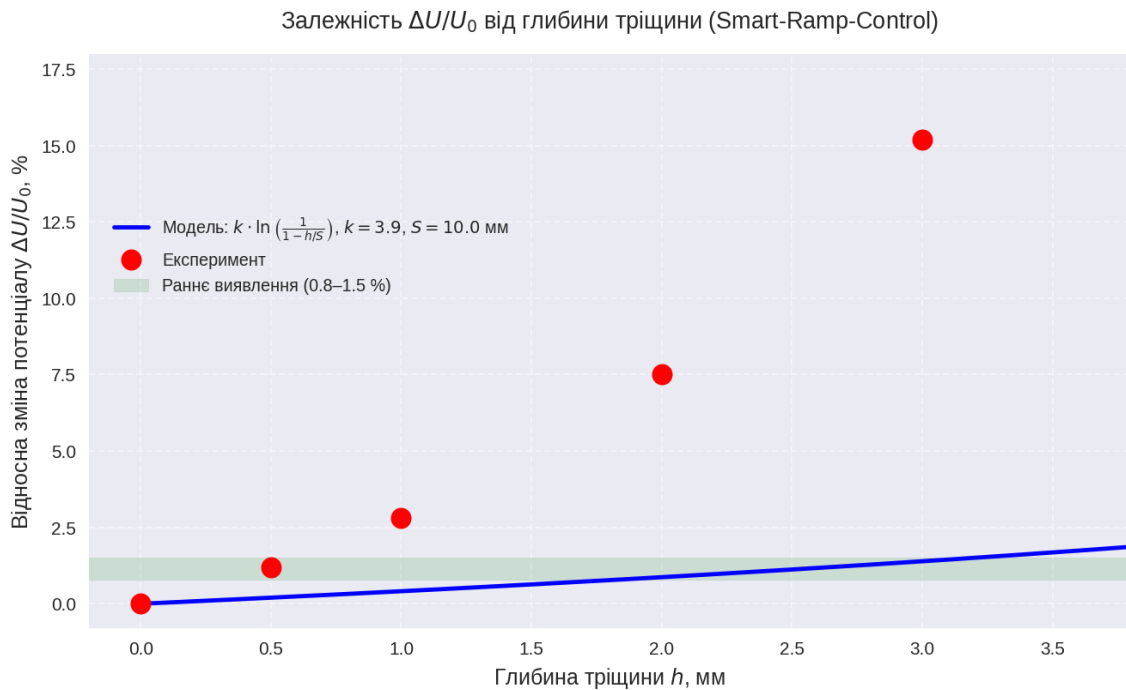


Рисунок 1 – Залежність діагностичного сигналу від глибини дефекту. Відносна зміна потенціалу від глибини тріщини

Цей графік ілюструє високу чутливість системи до зародження тріщин.

Математична апроксимація: Синя лінія відображає теоретичну модель, де зміна потенціалу корелює з глибиною тріщини h та товщиною перерізу $S=10$ мм. Експериментальні дані: Червоні точки демонструють реальні виміри, які значно перевищують теоретичний мінімум, що забезпечує надійність детектування. Раннє виявлення: Зелена зона (0.8-1.5%) показує діапазон, у якому система фіксує дефекти глибиною менше 1 мм. Це дозволяє перейти від періодичного огляду до безперервного моніторингу в реальному часі.

Графік обґрунтовує необхідність використання диференціальної схеми для роботи обладнання «в полі». При зміні температури спостерігається значний дрейф сигналу (похибка сягає 8%), що призвело б до хибних спрацювань системи.) Завдяки застосуванню компенсаційного зонда, залишкова похибка утримується в межах допустимого шуму ($\pm 0.6\%$) у всьому робочому діапазоні температур. Це доводить, що система зберігає працездатність та точність як при екстремальних морозах, так і під час літньої спеки.

Експериментальні дослідження (рис. 1) підтвердили, що пристрій стабільно фіксує мікротріщини на стадії їх зародження. При цьому використання диференціальної схеми вимірювання дозволило мінімізувати температурну похибку до

рівня ($\pm 0.6\%$) (рис. 2), що забезпечує стабільність роботи системи «Smart-Ramp-Control» у польових умовах

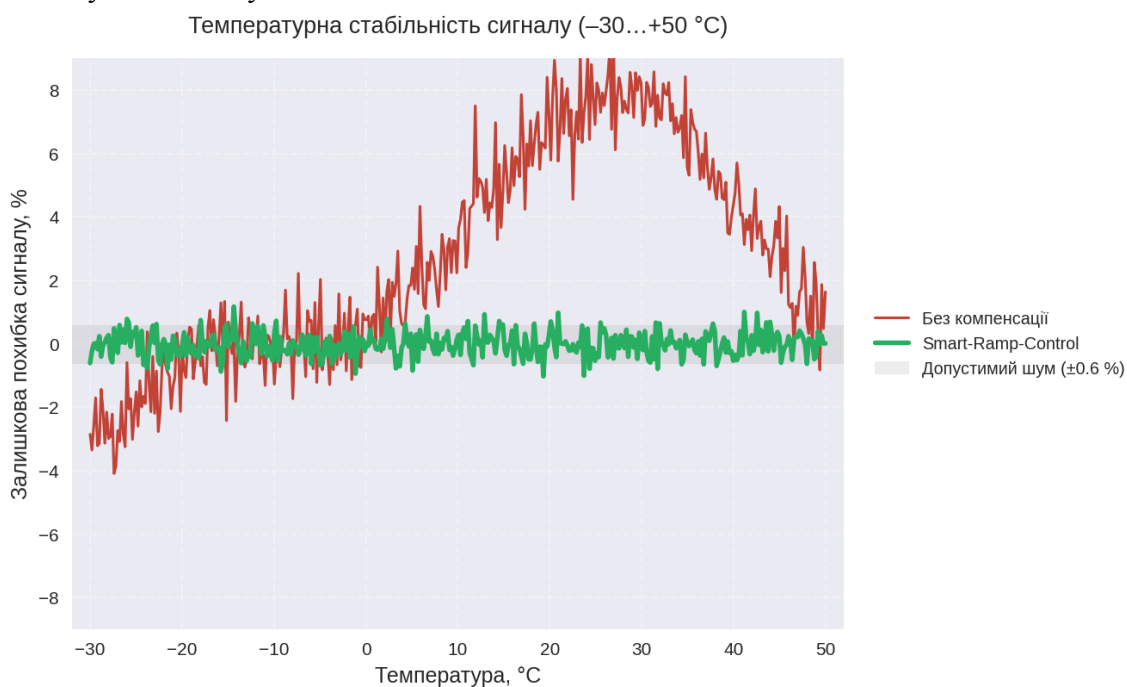


Рисунок 2 – Температурна стабільність

Запропонований метод є універсальним і може бути адаптований для діагностики відповідальних вузлів авіаційної техніки, виготовлених із титанових сплавів, що є перспективним напрямом подальших досліджень.

Перелік посилань

1. Пристрій автоматичного контролю поривів тросів гумотросового канату пат. 371868 Україна: МПК В 65 G 43/02 № u202402030; заявл. 17.04.24.

2. Гумотросові канати /Бельмас І., Колосов Д., Білоус О., Танцура Г., Часов Д., Швачка А. — Кам'янське: ДДТУ, 2023. — 199 с

УДК 621.87

Роман Бица, к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОБМЕЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ КІЛЬКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ОЦІНЮВАННІ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ ОБ'ЄМНОГО КЛАСУ

Анотація. Встановлено, що існуючі кількісні параметри оцінювання поверхонь з регулярними мікрорельєфами на враховують зміну форми поперечного січення канавок, яка суттєво впливає на експлуатаційні властивості поверхні з регулярними мікрорельєфами. Визначено необхідність у створенні такого параметра, який буде враховувати як форму поперечного перерізу канавок регулярних мікрорельєфів та її зміну вздовж осьової лінії канавки та визначити область його оптимальних значень.

Ключові слова: кількісні параметри, оцінювання, регулярні мікрорельєфи, канавки, елементи

Roman Bytsa

LIMITATIONS OF EXISTING QUANTITATIVE PARAMETERS IN THE EVALUATION OF VOLUMETRIC-CLASS REGULAR MICRO RELIEFS

Abstract. It has been established that the existing quantitative parameters for evaluating surfaces with regular microreliefs do not account for changes in the cross-sectional shape of grooves, which significantly affect the operational properties of surfaces with regular microreliefs. The necessity has been determined to develop a parameter that would take into account both the cross-sectional shape of regular microrelief grooves and its variation along the groove centerline, as well as to determine the range of its optimal values.

Keywords: quantitative parameters, evaluation, regular microreliefs, grooves, elements

Інженерія поверхні спрямована на пошук нових інженерних рішень щодо форми, структури, фізико-механічних та геометричних параметрів робочих поверхонь деталей машин, з метою забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей цих поверхонь. Одним із методів покращення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин є формування на них регулярних мікрорельєфів. Регулярні мікрорельєфи можуть бути як з дискретними елементами у вигляді лунок сферичної чи пірамідальної форми, або ж із неперервними елементами у формі канавок різної форми.

Таким чином для мікрорельєфів із елементами (канавками) однакової глибини і відповідно ширини площа проекції такої канавки на площину буде однаковою вздовж осьової лінії канавки.

Однак сучасне машинобудування вимагає функціональних поверхонь, експлуатаційні властивості яких можна забезпечити лише новими підходами та технічними рішеннями, такими як об'ємний клас мікрорельєфів. В таких мікрорельєфах канавки змінюють свою глибину, наприклад для покращення гідродинамічного режиму тертя у спряжених поверхнях.

Існуючий критерій оцінки поверхонь з регулярними мікрорельєфами – відносна площа мікрорельєфу є нечутливим до зміни глибини канавки мікрорельєфу, оскільки враховує лише площу проекції канавки. Якщо ширина основи поперечного перерізу канавки b_g у формі напів кола, половини еліпса, трикутника, прямокутника чи трапеції є однаковою, то й площа проекції цієї канавки на площину також буде однаковою (рис. 1).

Таким чином відносна площа мікрорельєфу для усіх цих форм поперечних перерізів канавок буде абсолютно однаковою. Це свідчить про нечутливість цього параметра до зміни форми поперечного перерізу канавки.

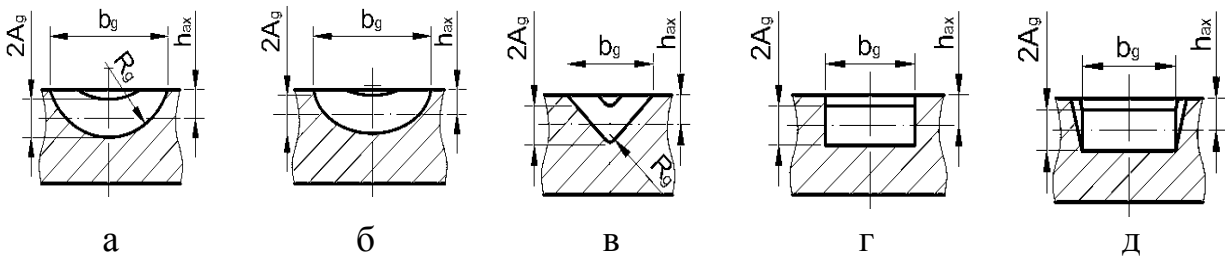


Рисунок 1 – Типи поперечних січень канавок мікрорельєфів:

а – напівкругла; б – еліпсна; в – трикутна; г – прямокутна; д – трапецеподібна

Існують інші методи кількісної оцінки поверхонь з регулярними мікрорельєфами. До них відноситься методи визначення площинної неоднорідності розподілу площі канавок мікрорельєфу [2] може оцінити рівномірність розподілу площі канавок на площині, де сформовано регулярний мікрорельєф. Цей метод дозволяє визначити такі кількісні параметри як коефіцієнт однорідності розподілу площі канавки k_g . Однак цей параметр також нечутливий до зміни глибини канавок, яка має місце для канавок об'ємного виду [3, 4], а враховує лише проекцію площі канавок мікрорельєфу та взаємне розміщення канавок на площині.

Відомий також параметр під назвою коефіцієнт деградації канавки k_d , який визначається як відношення зміни сумарної площі проекції канавки мікрорельєфу до часу за який ця зміна відбулась [4]. Цей параметр показує, яка форма канавки збереже максимальну функціональну здатність (потенційно йдеться про утримання мастила) при зношуванні поверхні.

Таким чином існує нагальна потреба у створенні кількісного критерію, який враховував зміну форми канавки у поперечному січенні, її глибину та область оптимальних значень цього критерію. Це дозволило б проводити оцінку канавок об'ємного виду та пов'язати цю критеріальну оцінку з експлуатаційними властивостями поверхонь з регулярними мікрорельєфами об'ємного виду.

Перелік посилань

1. Шатунний вкладиш із регулярним мікрорельєфом об'ємного типу : пат. 161648 Україна : F01C1/07. Дзюра В.О., Дживак Т.Р., Бица Р.О. заявл. 20.02.2025. опубл. 24.12.2025, бюл. № 52/2025.
2. Dzyura, V.; Maruschak, P.; Bytsa, R.; Zinchenko, I. Planar Non Uniformity of Regular and Partially Regular Microreliefs and Method for Its Evaluation. Eng 2025, 6, 314. <https://doi.org/10.3390/eng6110314>
3. Спосіб формування регулярних мікрорельєфів об'ємного класу : пат. 158484 Україна : B23P 9/00. Дзюра В.О., Бица Р.О. заявл. 22.07.2024. опубл. 12.02.2025, Бюл.№ 7.
4. V. Dzyura P. Maruschak, R. Bytsa. Classification of Regular Microreliefs of the Volumetric Class. Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering ISSN: 2229-2152 (Print); 2697-424x (Online) (2026) Vol. 14, No. 1, Paper No. JRAME 26-14-015 [DOI: 10.14456/jrame.2026.15].

УДК 621.791.75:621.9.04:004.94

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

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ГВИНТОВИХ ВИРОБІВ, СИНТЕЗОВАНИХ МЕТОДАМИ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ

Анотація. У роботі досліджено технологічні особливості використання сучасних адитивних технологій при виготовленні деталей типу шнеків складної геометрії, отриманих за результатами реалізації методики генеративного дизайну відповідно до умов експлуатації та характеру силових факторів, прикладених до витків. Показано, що класичні технології формоутворення гвинтових поверхонь мають суттєві обмеження при виготовленні полегшених багатопорожнинних конструкцій із локально змінною жорсткістю та змінним законом розподілу товщини витка. Встановлено раціональні умови використання технологій SLM, EBM, WAAM, SLS та FDM для виготовлення шнекових виробів із функціонально-градієнтною структурою. Запропоновано підхід до інтеграції результатів топологічної оптимізації та генеративного проектування з адитивним виробництвом шнеків. Показано, що використання генеративного дизайну дозволяє формувати структури витків із мінімізованою масою при забезпеченні необхідної жорсткості, а застосування адитивних технологій забезпечує можливість їх практичної реалізації без технологічних обмежень традиційних способів формоутворення.

Ключові слова: шнек, гвинтова поверхня, генеративний дизайн, адитивне виробництво, SLM, WAAM, топологічна оптимізація, функціонально-градієнтна структура.

Vasyl Vasylykiv, Nazarii Makovynskiy, Oleksandr Korniev

FEATURES OF THE APPLICATION OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF AUGER TYPE PARTS SYNTHESIZED BY GENERATIVE DESIGN METHODS

Abstract. This paper investigates the technological features of applying modern additive manufacturing technologies to the production of screw products with complex geometry obtained through the implementation of a generative design methodology in accordance with operating conditions and the nature of force factors acting on the flights. It is shown that conventional technologies for forming helical surfaces have significant limitations in the manufacture of lightweight multi-cavity structures with locally variable stiffness and a non-uniform flight thickness distribution law. Rational conditions for the application of SLM, EBM, WAAM, SLS, and FDM technologies in the fabrication of auger type parts with a functionally graded structure have been determined. An approach for integrating the results of topology optimization and generative design with additive manufacturing of screw components is proposed. It is demonstrated that the use of generative design enables the creation of flight structures with minimized mass while ensuring the required stiffness, whereas additive manufacturing technologies provide the possibility of their practical implementation without the technological limitations inherent in traditional forming methods. Keywords: auger, helical surface, generative design, additive manufacturing, SLM, WAAM, topology optimization, functionally graded structure.

Сучасні тенденції розвитку транспортуючих, змішувальних, дозувальних і ґрунтообробних машин обумовлюють необхідність створення деталей типу шнеків із

високою питомою міцністю, адаптивною жорсткістю та мінімізованою масою. Особливо актуальною ця проблема є для гвинтових виробів великого діаметра, що працюють в умовах змінних осьових і крутних навантажень, циклічного абразивного спрацювання та динамічної нерівноваженості.

Традиційні технології виготовлення таких виробів – навівання стрічки ребром, штампування секторів, лиття або механічне формоутворення – орієнтовані переважно на геометрично регулярні конструкції із постійною та суцільною товщиною витка. Такі методи практично непридатні для реалізації виробів, отриманих за результатами генеративного проєктування, де геометрія витка формується відповідно до реального розподілу напружень і силових потоків.

У сучасних CAD/CAE-системах генеративний дизайн дозволяє створювати конструкції гвинтових виробів із:

- локально змінною товщиною витка;
- внутрішніми гратчастими або комірчастими структурами;
- криволінійними каналами охолодження;
- адаптивними ребрами жорсткості;
- функціонально-градієнтним розподілом матеріалу.

Реалізація таких конструкцій традиційними методами практично неможлива або економічно недоцільна. Саме тому адитивні технології стають не допоміжним, а базовим способом виробництва шнекових виробів нового покоління.

Аналіз сучасного стану досліджень. За останні 5–7 років найбільш інтенсивний розвиток у виробництві металевих шнекових елементів отримали технології: SLM (Selective Laser Melting); LPBF (Laser Powder Bed Fusion); EBM (Electron Beam Melting); WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing); DED (Directed Energy Deposition).

Для виготовлення навантажених гвинтових виробів особливий інтерес становлять сплави: 316L; Inconel 718; AlSi10Mg; Ti6Al4V; мартенситностаріючі сталі типу Maraging M300.

Сучасні дослідження Fraunhofer ILT (Німеччина), Oak Ridge National Laboratory (США) та University of Nottingham показують, що при використанні LPBF можливо отримувати тонкостінні спіральні елементи товщиною 0,4–0,8 мм із відносною густиною понад 99,2 % та границею міцності до 1180 МПа для сталей типу Maraging.

Особливо перспективною для великогабаритних шнеків є технологія WAAM, продуктивність якої досягає 6–9 кг/год, що у 15–25 разів перевищує продуктивність SLM. При цьому забезпечується формування багат шарових функціонально-градієнтних структур із локальним підсиленням зон концентрації напружень.

Однак головною проблемою при адитивному формоутворенні деталей з гвинтовими поверхнями залишається прогин тонких витків, термічні деформації, залишкові напруження, анізотропія механічних властивостей та нестабільність геометрії при великій висоті витка.

Ці явища особливо проявляються при друпці консольних ділянок витків із малим кутом нахилу до площини побудови.

Тому метою роботи є дослідження особливостей використання сучасних адитивних технологій для виготовлення гвинтових виробів, синтезованих методами генеративного дизайну відповідно до реальних умов експлуатації та дії силових факторів на витки.

Генеративний дизайн шнеків. На відміну від класичного параметричного проєктування, генеративний дизайн формує геометрію шнека не за наперед заданою формою, а на основі граничних умов, прикладених навантажень, зон допустимого розміщення матеріалу, критеріїв мінімізації маси та обмежень жорсткості та довговічності.

При цьому розподіл товщини витка визначається не конструктивними міркуваннями, а величинами осьових сил, крутних моментів, контактних тисків, локальних згинальних напружень.

У результаті генеративної оптимізації формуються конструкції із змінною товщиною витка, біонічними ребрами жорсткості, внутрішніми порожнинами та багаторівневими комірчастими структурами (рис. 1).

Такі конструкції дозволяють знизити масу шнека на 28–47 % при одночасному підвищенні питомої жорсткості.

Технологічні особливості адитивного виготовлення. Для шнекових виробів найбільш критичним параметром є співвідношення:

$$\lambda = LzD^{-1},$$

де Lz – осьова довжина шнека; D – зовнішній діаметр витка.

При $\lambda > 6$ суттєво зростає ймовірність термічного викривлення та втрати точності кроку спіралі.

Для тонкостінних витків визначальним є також параметр консольності яким є питома висота витка $b = Bh^{-1}$ (B - висота витка; h - товщина витка).

За умови $b > 18$ у процесі SLM спостерігається локальна втрата стійкості через накопичення залишкових термічних деформацій.

Встановлено, що найбільш ефективними є такі схеми побудови:

- вертикальне формування шнека із сегментацією по висоті;
- друк секторальних модулів із подальшим дифузійним з'єднанням;
- комбінована схема WAAM + механічне фрезерування;
- друк витків на попередньо виготовленому валу.

Останній варіант є особливо перспективним для великогабаритних комбінованих гвинтових виробів.

Особливості структури матеріалу. Для адитивно виготовлених витків шнеків характерна виражена анізотропія властивостей. При SLM границя текучості вздовж шарів може бути на 18–27 % нижчою, ніж у поперечному напрямку.

Тому орієнтацію шнека в камері побудови необхідно узгоджувати із напрямками основних експлуатаційних навантажень.

Для гвинтових виробів транспортуючих систем найбільш раціональною є орієнтація, при якій траєкторії наплавлення збігаються із напрямком головних дотичних напружень.

Сучасні дослідження показують, що використання комірчастих структур типу Gyroid дозволяє зменшити масу витка до 35 %, підвищити демпфувальні властивості, знизити рівень вібрацій, а також покращити умови тепловідведення.

Перспективи інтеграції генеративного дизайну та АМ-технологій. Поєднання генеративного дизайну та адитивного виробництва формує принципово новий підхід до створення гвинтових виробів.

У такому випадку на основі CAE-аналізу визначаються реальні силові потоки, формується оптимізована топологія витка, створюється функціонально-градієнтна структура та здійснюється безпосереднє виготовлення виробу адитивним методом.

Це дозволяє перейти від концепції «виготовлення геометрії» до концепції «виращування функціональної структури».

Особливо перспективним є використання multi-material АМ, коли периферійна



Рисунок 1 – Конструкція шнека, яка синтезована з використанням методу генеративного дизайну на основі урахування впливу на нього силового фактору у вигляді крутного моменту

зона витка формується із зносостійких матеріалів, а внутрішній об'єм – із легших енергопоглинаючих структур.

Встановлено, що адитивні технології є найбільш ефективним способом виготовлення деталі типу шнеків, синтезованих методами генеративного дизайну.

Показано, що результати генеративного проектування формують конструкції зі змінною геометрією витків, які практично неможливо реалізувати традиційними методами формоутворення.

Визначено, що для тонкостінних шнекових елементів основними обмежувальними факторами є прогин витків, термічні деформації, залишкові напруження та анізотропія властивостей.

Найбільш перспективними для виготовлення шнекових виробів є технології SLM, WAAM та LPBF, які забезпечують реалізацію функціонально-градієнтних структур і внутрішніх порожнин.

Інтеграція генеративного дизайну з адитивним виробництвом дозволяє зменшити масу шнекових виробів до 40–50 % при одночасному забезпеченні необхідної жорсткості та довговічності.

Перелік посилань

1. Васильків В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації. – Львів, 2015. – 48 с.

2. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // *Progress in Materials Science*. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.

3. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.07.019](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019).

4. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. – 3rd ed. – Springer, 2021. – 670 p. ISBN: 978-3-030-56127-7. DOI: [10.1007/978-3-030-56127-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7).

5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. DOI: [10.1016/j.compositesb.2018.02.012](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012).

6. Cunningham R., Zhao C., Parab N., Kantzos C., Pauza J., Fezzaa K., Sun T., Rollett A.D. Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging // *Science*. – 2019. – Vol. 363(6429). – P. 849–852. DOI: [10.1126/science.aav4687](https://doi.org/10.1126/science.aav4687).

7. Vaneker T., Bernard A., Moroni G., Gibson I., Zhang Y. Design for additive manufacturing: Framework and methodology // *CIRP Annals*. – 2020. – Vol. 69(2). – P. 578–599. DOI: [10.1016/j.cirp.2020.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.006).

8. Gu D. *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. – Springer, 2021. – 512 p. DOI: [10.1007/978-3-662-46089-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46089-4)

9. ASTM International. *ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. – West Conshohocken, PA, USA, 2023.

10. Wei H.L., Mukherjee T., Zhang W. et al. Mechanistic models for additive manufacturing of metallic components // *Progress in Materials Science*. – 2021. – Vol. 116. – P. 100703. DOI: [10.1016/j.pmatsci.2020.100703](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100703).

11. DebRoy T., Mukherjee T., Wei H.L. et al. Metallurgy, mechanistic models and machine learning in metal printing // *Nature Reviews Materials*. – 2021. – Vol. 6. – P. 48–68. DOI: [10.1038/s41578-020-00236-1](https://doi.org/10.1038/s41578-020-00236-1).

УДК 621.326

Ігор Грицай, д.т.н., проф; Богдан Столяр

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

КІНЕМАТИЧНА КОНЦЕПЦІЯ ФОРМОТВОРЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ЧЕРЕЗ КЕРОВАНИЙ РУХ ІНСТРУМЕНТУ

Анотація. Розглянуто питання здешевлення та підвищення ефективності виробництва зубчастих коліс за допомогою інноваційного радіально-колового методу (РКМ). Завдяки змінній кінематиці цей підхід дозволяє розірвати жорсткий зв'язок між обертанням інструменту та заготовки, що значно підвищує швидкість різання. Також забезпечується екологічність процесу за рахунок відмови від мастильно-охолоджувальних середовищ. Для нарізання найпоширеніших евольвентних профілів пропонується нова кінематична концепція формоутворення, де складна геометрія інструменту замінюється математичним алгоритмом керування радіальним рухом тонкої дискової фрези. Практичне застосування цієї технології дає змогу максимально спростити зубонарізне обладнання, використовуючи замість спеціалізованих верстатів токарні аналоги з сервоприводами. У поєднанні програмно керованих приводів із комп'ютерними моделями відкривається шлях до інтеграції нейромереж штучного інтелекту для адаптивного керування та оптимізації процесу різання.

Ключові слова: радіально-коловий метод (РКМ), зубчасті колеса, кінематика формоутворення, сервоприводи та програмно керовані приводи, штучний інтелект та адаптивне керування, екологічність виробництва.

Ihor Hrytsai, Bohdan Stoliar

A KINEMATIC CONCEPT FOR FORMING GEARS VIA CONTROLLED TOOL MOVEMENT

Abstract. The article focuses on increasing the efficiency and eco-friendliness of gear production using the innovative radial-circular method, which significantly increases cutting speed by breaking the rigid connection between the tool and the workpiece. Furthermore, the proposed kinematic concept replaces complex tool geometry with a mathematical control algorithm for a thin disc cutter, which simplifies the manufacturing equipment and enables the integration of artificial intelligence for process optimisation.

Keywords: radial-circular method (RCM), gears, forming kinematics, servo drives and software-controlled drives, artificial intelligence and adaptive control, environmentally friendly production.

Зубчасті передачі та трансмісії є і на перспективу будуть залишатися невід'ємними компонентами сучасних машин і механізмів, які в приводах, редукторах, скринях передач і швидкоостей забезпечують зміну швидкості, крутного моменту і напрямку виконавчих ланок. Зубчасті колеса використовуються у продукції практично усіх галузей машинобудування, проте, основним виробником шестерень є автомобілебудування, на яке припадає 80%. Враховуючи потреби у шестернях в літакобудуванні, суднобудуванні, верстатобудуванні, аерокосмічній галузі, робототехніці, в приводах будівельних, гірничодобувних, лісопереробних машин і механізмів та інших видах промислового обладнання, випуск зубчастих коліс в рік становить понад 1 млрд. одиниць, або 4 млн на день, при цьому річні витрати на їх виробництво перевищують 120 млрд. дол. США. В таких умовах гострою є проблема здешевлення оброблення, оскільки саме операції нарізання зубців є найбільш складними, працеємкими та витратними в усьому циклі виготовлення цих деталей.

Кардинально змінити стан у галузі технології зубчастих коліс та значно підвищити ефективність процесів нарізання коліс і шестерень може радіально-коловий метод (РКМ), дослідження якого тривалий час проводиться у Львівській політехніці. Можливість нарізання циліндричних і конічних коліс різного модуля і кількості зубців, прямо- і косозубих, а також з черв'ячних коліс і циліндричних коліс з гвинтовими зубцями на одному обкочувальному зубофрезерному верстаті одним простим інструментом – тонкою дисковою фрезою створює широкі перспективи для його практичного використання та покращення техніко-економічних параметрів виробництва.

Переваги, які відкриває РКМ полягають у відмінності його кінематики від традиційних методів – черв'ячного зубофрезерування, зуботочіння (power skiving) та зубодовбання. Усі ці методи базуються на принципі неперервного різання-формування, як і РКМ, проте в РКМ є можливість змінити формулу верстатного зачеплення і розірвати жорсткий зв'язок між обертанням інструменту і заготовки. Ця ідея реалізована у вигляді мультиплікатора між осями верстата і фрези, завдяки чому підвищено швидкість різання до 100-300 м/хв. Такий режим можна встановлювати залежно від можливостей різального інструменту – як цільного виконання з швидкорізальної сталі (при швидкості до 60 м/хв.), так і збірних дискових фрез, оснащених пластинами з твердих сплавів з механічним кріпленням, які при невеликій вартості дають значний ефект. Обробка ведеться без використання мастильно-охолоджувальних середовищ, що значно покращує екологічність виробництва. При однаковій з черв'ячною фрезою подачі на зуб інструменту можна в рази підвищити осьову подачу без збільшення сили різання і втрати точності завдяки тому, що фреза може мати від 20 до 60 зубців.

Разом з тим, обмеженням РКМ є рівномірний рух фрези внаслідок її ексцентриситету, в результаті чого нарізаються зубці, що мають синусоїдальний профіль. Хоча синусоїдальне зачеплення характеризується вищими експлуатаційними параметрами порівняно з традиційним евольвентним, для оброблення евольвентних коліс, які на сьогодні мають найширше використання в машинобудуванні і для широкого впровадження цього методу необхідна модернізація радіальних рухів формування. Ідея полягає в тому, що періодичне рівномірне зворотно-поступальне переміщення дискової фрези в циклі обробки однієї впадини необхідно замінити лінійним рухом зі змінною швидкістю відносно обертання зубчастого колеса. Для цього необхідно описати закон переміщення фрези, при якому накладання обертового руху заготовки зі столом верстата з рухом формування дасть евольвентний профіль.

На основі параметричного рівняння евольвенти, принцип побудови якої наведено на рис.1 отримано залежність, що характеризує закон формування евольвенти в РКМ, який у виді часової функції відображається рівняння:

$$r_0(t) = \frac{r_0 \cdot \varphi(t)}{\sqrt{1 + \varphi(t)^2}},$$

де r_0 — радіус основного кола евольвенти.

Для перевірки теоретичних досліджень та відпрацювання процесу розробляється діючий макет зуборізного верстата, який реалізує ідею трансформації від геометрично заданого інструменту до кінематично заданого профілю, що закладений в алгоритм керування приводами.

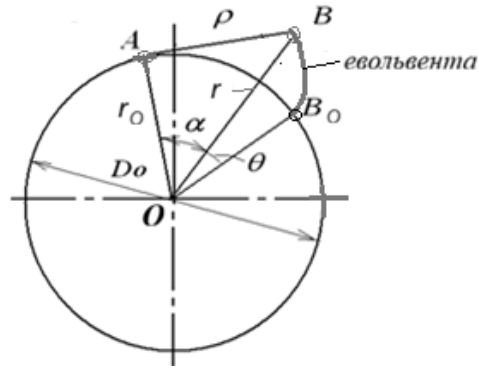


Рисунок 1 – Схема утворення евольвенти

Використання керованих сервоприводів забезпечить високий рівень синхронізації рівномірного обертового руху заготовки колеса, яке нарізають, з радіальним рухом дискового інструменту в прямому і зворотному напрямку, при нарізанні бокових профілів суміжних зубців. 3D модель такої установки наведена на рис. 2.

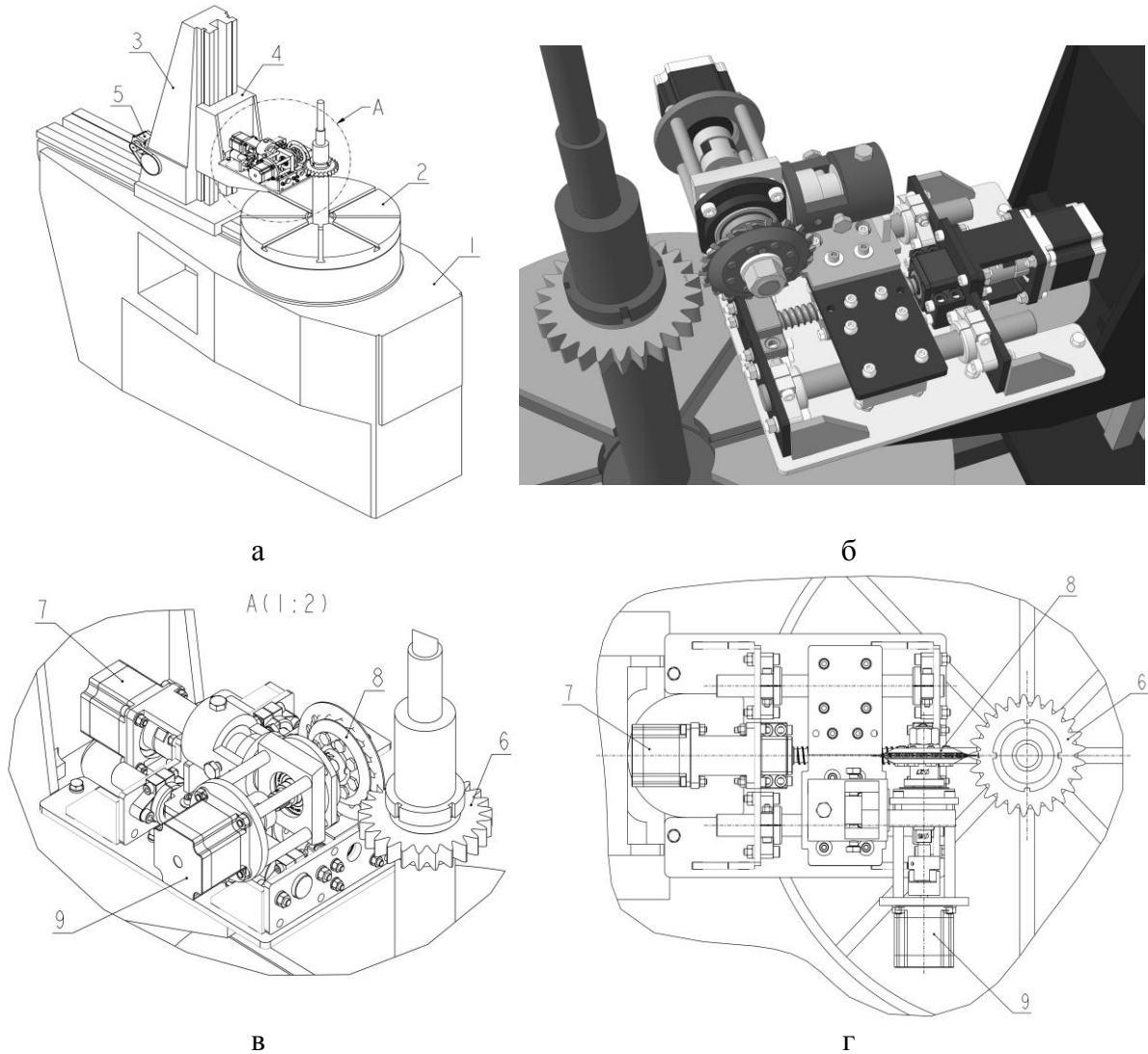


Рисунок 2 – Експериментальна установка, в якій реалізовано засади заданого закону формоутворення за радіально-коловим методом: а – загальний вид; б – 3D модель модуля приводів; в – загальний вид модуля; г – вид у плані

Установка (рис.2) складається зі станини 1, стола 2, який забезпечує обертання заготовки 6, консолі 3, на якій встановлено рухома каретка 4, що може переміщатися вертикально від двигуна приводу осьової подачі 5. На каретці міститься модуль рухів формоутворення: серводвигун зворотно-поступального руху 7 дискової фрези 8 двигуна швидкості різання 9. Лінійне переміщення каретки забезпечується мотором-редуктором 5 за допомогою гвинтової пари та двох напрямних з лінійними підшипниками.

Наведено результати розроблення засад нової теорії формоутворення, що базується на кінематичній концепції нарізання зубчастих коліс одним керованим законом руху інструменту, яким здійснюється кінематичне відтворення евольвенти. Узагальнений генераційний метод з заданим законом радіального переміщення тонкої дискової фрези створює можливість формоутворення на основі радіально-колового методу будь-яких зубчастих профілів, в тому числі – неевольвентних, наприклад, кругових або пітчевих.

Практичне використання цього методу, крім найширшої універсалізації, дозволяє максимально спростити технологію зубонарізання, оснащення та обладнання. Переведення форми профілю поверхні в алгоритм керування сервоприводом дискової фрези дозволяє використати як обладнання токарний верстат як аналог обкочувального верстата, але без складної кінематики, зі скороченими кінематичними ланцюгами. В сумарному підсумку, вказані переваги запропонованого методу дадуть змогу значно підвищити якість зубчастих коліс та ефективність їх виробництва.

Використання програмно керованих приводів в сукупності з математичним апаратом та комп'ютерними моделями, які описують різноманітні взаємозв'язані процеси і явища, що супроводять процес нарізання зубчастих коліс РКМ створює основу нейромережі штучного інтелекту для адаптивного керування та оптимізації цього процесу.

УДК 621.926.5:539.215:531.36

Катерина Дейнека¹, к.т.н.; Юрій Науменко², д.т.н., доц.

¹ Рівненський технічний фаховий коледж Національного університету водного господарства та природокористування, Україна

² Національний університет водного господарства та природокористування, Україна

ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ РОЗВ'ЯЗАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МІЖГАЛУЗЕВОЇ ПРИКЛАДНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ В БАРАБАННИХ МАШИНАХ НА ОСНОВІ ВСТАНОВЛЕНОГО ЕФЕКТУ САМОЗБУДЖЕННЯ АВТОКОЛИВАНЬ

Анотація. Представлено окремі результати, отримані при спробі розв'язання задачі зниження енергоємності обробки зернистих матеріалів в барабанних машинах. Застосування встановленого гідродинамічного ефекту автоколиваний зернистого заповнення камери обертового барабана при м'якому та жорсткому самозбудженні демонструють різку інтенсифікацію та зниження енергоємності процесів шляхом посилення дилатансії та активізації пасивної частини заповнення. Це відкриває шлях до створення нового покоління енергоефективних процесів машин барабанного типу.

Ключові слова: машини барабанного типу, зернистий матеріал, обертовий барабан, внутрішньокамерне заповнення, автоколювання, м'яке та жорстке самозбудження

Katerina Deineka, Yurii Naumenko

SOME RESULTS OF SOLVING A GENERALIZED CROSS-INDUSTRY APPLIED MECHANICAL PROBLEM OF INCREASING THE EFFICIENCY OF PROCESSING GRANULAR MATERIALS IN DRUM MACHINES BASED ON THE ESTABLISHED EFFECT OF AUTO-OSCILLATIONS SELF-EXCITATION

Abstract. Some results obtained in an attempt to solve the problem of reducing the energy consumption of processing granular materials in drum machines are presented. The use of the established hydrodynamic effect of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber with soft and hard self-excitation demonstrates a sharp intensification and reduction of the energy consumption of processes by increasing dilatancy and activating the passive part of the filling. This opens the way to the creation of a new generation of energy-efficient processes of drum-type machines.

Keywords: drum-type machines, granular material, rotating drum, internal chamber filling, auto-oscillation, soft and hard self-excitation

Drum-type machines remain the main equipment for high-volume processing of granular materials. The International Patent Classification distinguishes 9 classes corresponding to 9 main types of drum machines: B01J 2/12 – granulators, B01J 8/10 and B01J 19/28 – reactors, B01F 29/60 – mixers, B02C17/00 – mills, B03B 5/56 – washing machines, B07B 1/22 – screens, B24B 31/02 – tumbling machines, F26B 11/04 – dryers, F27B 7/00 – heat treatment machines.

The problem with drum machines is the high energy intensity of the working process. This is caused by the low intensity of the relative movement of the processed granular material in the chamber of the rotating drum. A significant portion of the granular filling of the chamber is passive, does not undergo shear deformation and does not participate in the working process.

The generalized cross-industry applied mechanical problem was solved on the basis of a new established physical phenomenon. The hydrodynamic effect of self-excitation of auto-oscillations of the granular filling of the rotating drum chamber was revealed. Auto-

oscillations are excited due to the loss of stability of the rotating drum vibration system on the verge of establishing a dynamic balance between the action of gravitational and centrifugal force fields on the granular filling. This is accompanied by a mutual transition of the flow regimes of the liquefied granular filling in the chamber – the circulation and wall layer.

The first direct video recording of the auto-oscillating mode of movement of the granular filling of a rotating drum [1] was made in 1966 in a technical video film of the IWF film studio (Göttingen, Germany) (Fig. 1).

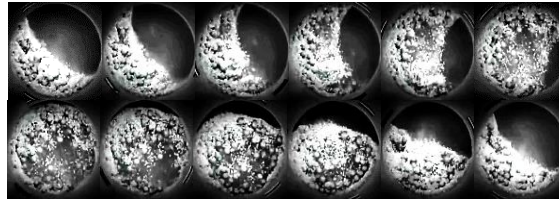


Fig. 1. Sequence of pictures of one period of auto-oscillations of granular filling of the chamber of a laboratory drum mill (according to [1])

Subsequently, the conditions for the stability of the motion of the drum machine unit were established [2], the mechanism for implementing the auto-oscillating mode of the filling flow was revealed [3], and a model of the conditions and factors for the oscillatory stability of the motion of a two-fraction granular filling was constructed [4]. The influence of the degree of filling of the chamber and the content of the crushed material in the filling on the technological and energy efficiency of the auto-oscillating grinding process in a drum mill was experimentally evaluated [5-8].

It turned out that self-excitation of auto-oscillations allows you to switch from a passive mode of implementation of the process of processing granular material to an active intermittent dynamic process based on self-regulation due to feedback without the need for external periodic action. This allows you to sharply intensify and accelerate the process. Auto-oscillations lead to periodic pulsating motion and activate the passive part of the filling and significantly increase the intensity of interaction of particles of the medium with the working body and the medium.

At the first stage of solving the problem, innovative processes for processing granular materials were created when the drum rotation speed reaches the bifurcation value [9-17]. The processes are implemented using a device that contains a drum and a drive with a rotation speed regulator, an elastic element and a recorder of the element's oscillation amplitude. To determine the bifurcation value of the speed, the initial arbitrary drum rotation speed is changed with simultaneous measurement of the amplitude of oscillations of the elastic element until the maximum value of the measurement results is reached.

Recent studies have revealed two qualitatively different modes of self-excitation of fill oscillations – soft (Fig. 2a) and hard (Fig. 2b), which significantly affect the implementation of technological processes.

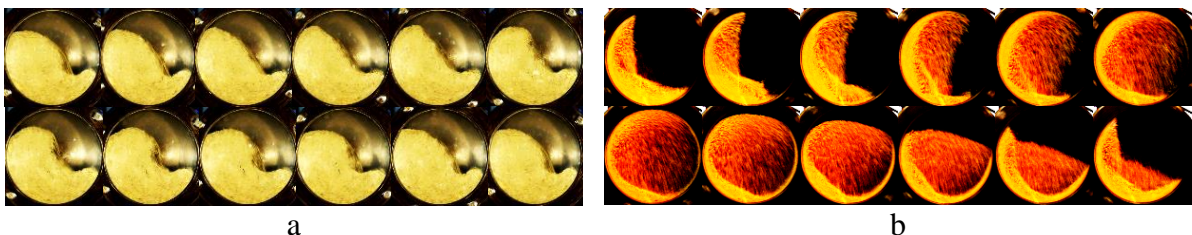


Fig. 2. The obtained pictures of one period of auto-oscillations:
a – with soft self-excitation, b – with hard self-excitation

In the soft mode, there is a smooth self-excitation of auto-oscillations of the filling of a quasi-harmonic form with a limited amplitude (Fig. 2a). This mode is characterized by monostability, reduced bifurcation values of the drum rotation speed and the dilatancy of the filling in the chamber, and an increased number of pulsations per one drum rotation.

In the rigid mode, there is a jump-like self-excitation of discontinuous relaxation auto-oscillations of filling anharmonic form with a significant amplitude (Fig. 2b). Such a regime is characterized by bistability, increased amplitude, reduced quality factor, and increased degree of relaxation of auto-oscillations.

At the second stage of solving the problem, innovative auto-oscillating processes of granulation, washing, classification and mixing were created in the soft self-excitation mode [17-21] and the processes of heat treatment, grinding, drying, reaction and tumbling in the hard self-excitation mode [22-25].

At the third stage of solving the problem, which is currently under implementation, innovative methods will be created to control the processes of processing granular materials when conducting self-excitation of auto-oscillations in soft and hard modes.

References

1. Both, H.-U. Mahlkörperbewegungen in der Kugelmühle [Motions of Grinding Elements in a Ball Mill]. 1966. IWF (Göttingen). [Video]. (06m:43s–07m:11s) YouTube. <https://doi.org/10.3203/IWF/C-921>.
2. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. (2018). The tumbling mill rotation stability. *Naukovyi Visnyk Nationalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1(163), 60–68. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/10>.
3. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2022). Revealing the mechanism of stability loss of a two-fraction granular flow in a rotating drum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 1(118), 34–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263097>.
4. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2025). Mathematical modeling of the rotating drum granular fill flow oscillatory stability. *Vibroengineering Procedia*, 59, 70–81. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25248>.
5. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2019). Revealing the effect of decreased energy intensity of grinding in a tumbling mill during self-excitation of auto-oscillating of the intrachamber fill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 1(97), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155461>.
6. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2019). Establishing the effect of decrease in power intensity of self-oscillation grinding in a tumbling mill with decrease of intrachamber fill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 7(102), 43–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183291>.
7. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2020). Establishing the effect of decreased power intensity of self-oscillatory grinding in a tumbling mill when the crushed material content in the intra-chamber fill is reduced. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 1(106), 39–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209050>.
8. Deineka, K., Naumenko, Yu. (2021). Establishing the effect of simultaneous reduction in the filling load inside a chamber and in the content of the crushed material on the energy intensity of self-oscillatory grinding in a tumbling mill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 1(109), 77–87. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224948>.
9. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 154570 U. Sposib hranuliuвання zernystoho materialu v barabani. *Bul. No. 47, 2023*. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772317/> [In Ukrainian].

10. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 154571 U. Sposib zmishuvannia zernystykh materialiv v barabani. Bul. No. 47, 2023. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772392/> [In Ukrainian].
11. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 154576 U. Sposib promyvannia zernystoho materialu v barabani. Bul. No. 47, 2023. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1772369/> [In Ukrainian].
12. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 155100 U. Sposib klasyfikatsii zernystoho materialu v barabani. Bul. No. 3, 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1780373/> [In Ukrainian].
13. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 155101 U. Sposib teplovoi obrobky zernystoho materialu v barabani. Bul. No. 3, 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1780416/> [In Ukrainian].
14. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V., Zhabchyk, S.V. Pat. No. UA 157163 U. Sposib haltuvannia detalei v barabani. Bul. No. 37, 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1817657/> [In Ukrainian].
15. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 157220 U. Sposib sushinnia zernystoho materialu v barabani. Bul. No. 38, 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1818458/> [In Ukrainian].
16. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 157608 U. Sposib provedennia heterohennoho protsesu z zernystym materialom v barabannomu reaktori. Bul. No. 45, 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826073/> [In Ukrainian].
17. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 157646 U. Sposib podribnennia v barabannomu mlyni iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 45, 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826100/> [In Ukrainian].
18. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 157868 U. Sposib hranuliuvannia zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 49, 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1831400/> [In Ukrainian].
19. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 158069 U. Sposib promyvannia zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 52, 2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1834666/> [In Ukrainian].
20. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 158585 U. Sposib klasyfikatsii zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 9, 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1843634/> [In Ukrainian].
21. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 158884 U. Sposib zmishuvannia zernystykh materialiv v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 14, 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1849725/> [In Ukrainian].
22. Deineka K.Yu., Naumenko Yu.V. Pat. No. UA 158810 U. Sposib teplovoi obrobky zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 12, 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1846648/> [In Ukrainian].
23. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 159078 U. Sposib podribnennia v barabannomu mlyni iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 17, 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1852548/> [In Ukrainian].
24. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 159087 U. Sposib sushinnia zernystoho materialu v barabani iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 17, 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1852588/> [In Ukrainian].
25. Deineka, K.Yu., Naumenko, Yu.V. Pat. No. UA 159719 U. Sposib provedennia heterohennoho protsesu z zernystym materialom v barabannomu reaktori iz avtokolyvnym vnutrishnokamernym zavantazhenniam. Bul. No. 26, 2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1862711/> [In Ukrainian].

УДК 631.363:633.8

Наталія Доценко, д.пед.н, проф.; Олена Баранова

Миколаївський національний аграрний університет, Україна

АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І СИЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ У МЕХАНІЗМАХ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ РОСЛИННОЇ ОЛІЇ

Анотація. Досліджено процес вилучення олії із насіння соняшнику за допомогою шнекового преса з попередньою вологотермічною обробкою м'ятки. Проведено аналіз кінематичних і силових параметрів установки та визначено її основні енергетичні характеристики. Встановлено, що попередня обробка сировини сприяє зниженню енергоспоживання і силових навантажень при ефективному пресуванні.

Ключові слова: кінематичний і силовий аналіз, механізми пресування, відокремлення олії.

Nataliia Dotsenko, Olena Baranova

ANALYSIS OF KINEMATIC PARAMETERS AND FORCE LOADS IN MECHANISMS FOR PRESSING VEGETABLE OIL

Abstract. The process of oil extraction from sunflower seeds using a screw press with preliminary hydrothermal treatment of the mash was investigated. The kinematic and force parameters of the unit were analyzed, and its main energy characteristics were determined. It was established that the preliminary treatment of raw materials contributes to reducing energy consumption and force loads while maintaining efficient pressing performance.

Keywords: kinematic and force analysis, pressing mechanisms, oil separation.

На сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу, в умовах підвищення вимог до енергоощадності та ефективності виробництва, особливого значення набуває раціональне використання виробничого потенціалу підприємств. Одним із перспективних напрямів розвитку аграрної галузі є впровадження сучасних технологій переробки сільськогосподарської сировини в господарствах різних форм власності. У зв'язку з цим важливим завданням є створення компактного, продуктивного та енергоефективного обладнання, придатного для роботи у складі технологічних ліній переробки продукції [1].

Серед основних олійних культур Миколаївської області провідне місце посідає соняшник, що обумовлено його високою рентабельністю та стабільним попитом на насіння і соняшникову олію. Для вилучення олії з насіння соняшнику у промисловості використовують два основні способи – пресування та екстракцію. Проте технологія пресування характеризується меншими виробничими витратами, простотою реалізації та нижчими енергетичними затратами порівняно з екстракційним методом [5]. Тому актуальним науково-технічним завданням є вдосконалення процесу пресування шляхом обґрунтування конструктивних і режимних параметрів шнекових пресів для підвищення ефективності вилучення олії [2].

З позицій теорії механізмів і машин процес пресування розглядається як сукупність механічних взаємодій між робочими органами преса та оброблюваним матеріалом під дією кінематичних і силових факторів [3]. Кінематичний аналіз шнекового преса передбачає визначення типу механізму, дослідження закону руху робочих органів, розрахунок передавального відношення приводу, а також визначення швидкості переміщення насіння вздовж зони пресування. Основними параметрами, що впливають на ефективність процесу, є кутова швидкість обертання шнека, геометричні характеристики його витків та крок гвинтової нарізки [4]. Саме ці параметри

забезпечують транспортування, ущільнення та подальше відокремлення олії з матеріалу.

Силове дослідження процесу включає визначення сил тиску матеріалу на робочі поверхні шнека і корпусу, розрахунок осьового зусилля та крутного моменту на валу, а також оцінку необхідної потужності приводу. Важливим чинником є врахування сил тертя між насінням і робочими поверхнями преса. У зоні пресування тиск утворюється внаслідок поступового зменшення міжвиткового простору шнека та опору виходу макухи, що безпосередньо впливає на інтенсивність виділення олії.

Для підвищення ефективності роботи шнекових пресів доцільним є використання попередньої вологотермічної обробки м'ятки. Зволоження та нагрівання матеріалу до температури 90–110 °С сприяють зниженню міцності клітинних стінок, зменшенню внутрішнього опору матеріалу та підвищенню виходу олії. Завдяки цьому процес пресування може здійснюватися при менших значеннях тиску, що дозволяє знизити енергетичні витрати та підвищити загальну ефективність обладнання.

У таблиці 1 наведено основні технічні характеристики енергоефективного шнекового преса, конструкція якого передбачає попередню вологотермічну обробку м'ятки перед процесом пресування.

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики енергоефективного шнекового преса, в якому здійснюється попередня обробка м'ятки

№	Параметр	Позначення	Кількість	Одиниця виміру
1	Діаметр шнека	D	0,10	м
2	Крок шнека	S	0,08	м
3	Частота обертання вала	n	100	об/хв
4	Коефіцієнт заповнення	φ	0,4	–
5	Насипна густина м'ятки	ρ	650	кг/м ³
6	Тиск пресування без обробки	p ₀	6	МПа
7	Коефіцієнт зниження опору після обробки	k	0,7	–
8	Попередня температура матеріалу	t	95	°С
9	Продуктивність преса	Q	450	кг/год

Здійснимо короткий розрахунок енергоефективного олієвідтискного преса. Розрахуємо робочий тиск з урахуванням обробки:

$$p = k \cdot p_0 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ МПа} \quad (1)$$

Визначимо площу поперечного перерізу шнека:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 0,00785 \text{ м}^2 \quad (2)$$

Розрахуємо осьове зусилля на шнек.

$$F = p \cdot A = 4,2 \cdot 10^6 \cdot 0,00785 \approx 32\,970 \text{ Н} \quad (3)$$

Крутний момент на валу рівний:

$$M = F \cdot \frac{D}{2} = 32\,970 \cdot 0,05 \approx 1\,648 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4)$$

Потужність приводу дорівнює:

$$N = \frac{2\pi n M}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 1\,648}{60} \approx 17,3 \text{ кВт} \quad (5)$$

Теоретична продуктивність преса визначається як:

$$Qt = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot n \cdot \varphi \cdot \rho = 0,00785 \cdot 0,08 \cdot 100 \cdot 0,4 \cdot 650 \approx 450 \text{ кг/год} \quad (6)$$

В таблиці 2 представлено порівняння розрахунку вдосконаленої конструкції преса в порівнянні з типовою конструкцією.

Таблиця 2 – Результати розрахунку та порівняння з типовою конструкцією

№	Параметр	Позначення	Розрахунок для енергоефективного преса	Прес FS-4015	Аналіз ефективності
1	Робочий тиск	p	4,2 МПа	6 МПа	Попередня вологотермічна обробка знижує тиск
2	Осьове зусилля	F	32 970 Н	47 100 Н	Зменшення на ~30%
3	Крутний момент	M	1 648 Н·м	2 355 Н·м	Зменшення на ~30%
4	Потужність приводу	N	17,3 кВт	24–25 кВт	Зниження енергоспоживання
5	Теоретична продуктивність	Q□	450 кг/год	400–450 кг/год	Завдяки попередній обробці продуктивність зростає
6	Окружна швидкість шнека	v	0,52 м/с	0,52 м/с	Частота обертання однакова
7	Коефіцієнт заповнення	φ	0,4	0,3–0,35	Попередня обробка дозволяє збільшити заповнення

Кінематичні характеристики шнекового механізму мають визначальний вплив на величину силових навантажень, енергоємність процесу та ефективність роботи пресового обладнання. Оптиміальне поєднання частоти обертання шнека, параметрів його геометрії та величини робочого зазору забезпечує підвищення продуктивності преса і ступеня вилучення олії при одночасному зменшенні енергетичних витрат. Важливу роль у цьому процесі відіграє швидкість переміщення матеріалу вздовж зони пресування, оскільки надмірне збільшення швидкості може призводити до недостатнього ущільнення сировини та зниження ефективності виділення олії. У свою чергу, надто мала швидкість транспортування спричиняє перевантаження робочих органів і підвищення енергоспоживання.

Геометричні параметри шнека, зокрема крок витків, висота гребеня та діаметр валу, визначають ступінь ущільнення матеріалу в процесі його переміщення. Зменшення міжвиткового простору створює необхідний тиск для руйнування клітинної структури насіння та виділення олії. При цьому раціональний вибір конструктивних параметрів дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу та рівномірність навантаження на приводний механізм.

Застосування попередньої вологотермічної обробки м'ятки сприяє покращенню фізико-механічних властивостей матеріалу, підвищуючи його пластичність та

знижуючи внутрішній опір під час пресування. У результаті робочий тиск у зоні пресування та крутний момент на валу зменшуються в середньому на 25–30 %, що дозволяє суттєво знизити необхідну потужність приводу. При цьому продуктивність обладнання не лише зберігається, а й може дещо підвищуватися завдяки більш рівномірному переміщенню та ущільненню матеріалу.

Попереднє нагрівання сировини до температури 90–110 °С забезпечує часткове руйнування клітинних оболонок та зменшує в'язкість олії, що полегшує її вихід із матеріалу. Додаткове зволоження м'ятки сприяє рівномірному розподілу температури по всьому об'єму сировини та покращує умови її деформації під дією пресувальних зусиль. Завдяки цьому зменшується навантаження на робочі органи преса та знижується інтенсивність тертя між матеріалом і поверхнями шнека та корпусу.

Зниження силових навантажень позитивно впливає на довговічність конструктивних елементів преса, дозволяє використовувати менш масивні деталі та зменшує інтенсивність їх зношування. Це сприяє економії матеріалів і підвищенню надійності роботи обладнання. Крім того, зменшення крутного моменту на валу дає можливість застосовувати електродвигуни меншої потужності, що забезпечує додаткове скорочення експлуатаційних витрат та підвищує енергоефективність установки в цілому.

На відміну від енергоефективних конструкцій, традиційні олієвідтискні преси функціонують при значно більших значеннях тиску та споживають більше енергії, що призводить до підвищеного зношування робочих органів і збільшення експлуатаційних витрат. Робота таких пресів супроводжується значними втратами енергії на подолання внутрішнього тертя та деформацію матеріалу. Це негативно впливає не лише на ресурс обладнання, а й на економічну ефективність технологічного процесу.

Таким чином, удосконалення конструкції шнекового преса та впровадження попередньої вологотермічної обробки сировини є перспективним напрямом підвищення ефективності процесу відокремлення рослинної олії. Рациональне поєднання кінематичних, конструктивних і технологічних параметрів дозволяє забезпечити стабільну роботу обладнання, знизити енергетичні витрати та підвищити якість готової продукції.

Перелік посилань

1. Babenko D., Gorbenko O., Dotsenko N., Kim N. Theoretical aspects of oil separation process by pressing // Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science. 2018. Vol. 22, № 3. P. 94–98. DOI: 10.31521/2313-092X/2018-3(99)-16.

2. Доценко Н.А., Горбенко О.А., Кім Н.І., Бацуровська І.В. Шнековий прес для відокремлення рослинної олії з пароутворюючим пристроєм для вологотермічної обробки м'ятки : пат. 147470 Україна, МПК В30В 9/00. № u202006789 ; заявл. 26.10.2020 ; опубл. 12.05.2021.

3. Бабенко Д.В., Доценко Н.А., Горбенко О.А. Механіка матеріалів і конструкцій. Частина 2: практикум для навчання на основі інтерактивного графічно-цифрового контенту : навч. посіб. Миколаїв : МНАУ, 2021. 176 с.

4. Оптимізація виробництва олійної сировини в Україні до 2025 року (методичні рекомендації) / Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН, Інститут олійних культур НААН, СГІ-НЦНС. Вид. 4-те, допов. Харків, 2020. 108 с.

5. Бойко В.С., Самойчук К.О., Тарасенко В.Г., Верхоланцева В.О., Паляничка Н.О., Михайлов Є.В., Червоткіна О.О. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси : підручник. Київ : ПрофКнига, 2021. 466 с.

УДК 621.9.04

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

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НАВИВНИХ СТРІЧКОВИХ ГВИНТОВИХ ЗАГОТОВОК

Анотація. Представлено конструкцію пристрою для виготовлення навивних стрічкових гвинтових заготовок метою якого є підвищення якості формування навивних стрічкових гвинтових заготовок за рахунок попередження втрати стійкості навитих витків. Виведено рівняння для знаходження сили навивання стрічки на оправу.

Ключові слова: пристрій, гвинтова заготовка, стрічка, силові параметри.

Andriy Diachun, V. Grasovnyk

INVESTIGATION OF THE FIXTURE PARAMETERS FOR THE WOUND STRIP SPIRAL BLANKS MANUFACTURING

Abstract. The design of the fixture for the wound strip spiral blanks manufacturing is presented, the purpose of which is to improve the quality of wound strip spiral blank formation by preventing the loss of stability of the wound flights. The equation for determining the strip winding force onto the mandrel is derived.

Keywords: device, helical blank, strip, force parameters.

Пристрій для виготовлення навивних стрічкових гвинтових заготовок (рис. 1) складається із оправы 1, на лівому торці якої жорстко приєднано оправку 2, що закріплюється у кулачках 3 патрона 4 токарного верстата. Друга сторона оправы 1 встановлюється отвором на конічній поверхні заднього центра 5 верстата. На зовнішній циліндричній поверхні оправки 2 встановлена Г-подібна державка 6 із пазом 7, кут нахилу якого дорівнює куту нахилу витків на зовнішньому діаметрі стрічкової гвинтової заготовки 8 та механізм затиску 9 передньої кінця стрічки 10 на оправі 1. У різцетримачі 11 токарного верстата встановлено під кутом нахилу витків стрічкової гвинтової заготовки 8 у вертикальній площині державку 12 із розміщеним в ній на осі 13 формувальним роликом 14, що має можливість вільного обертання відносно осі 13, а центр обертання формувального ролика 14 розташовано на одному рівні із центром обертання оправы 1. На прямокутному виступі 15 державки 12 з можливістю зворотного-поступального радіального переміщення в напрямку оправы 1 за допомогою пружини стиснення 16 розміщено напрямну 17, на вільній правій стороні якої виконано паз 18, через який подається стрічка 10 при навиванні на оправу 1 формувальним роликом 14 стрічкової гвинтової заготовки 8, що забезпечує збільшення площі бокових опор стрічки 10 в зоні деформації та підвищує стійкість до утворення гофр на внутрішньому діаметрі стрічкової гвинтової заготовки 8.

Пристрій для виготовлення навивних стрічкових гвинтових заготовок працює таким чином. Стрічку 10 прямокутного поперечного перерізу встановлюють у паз 7 та закріплюють механізмом затиску 9 при розташуванні стрічки 10 внизу оправы 1 та дотиканні її кромки до зовнішнього діаметра оправы 1. Після цього патрон 4 разом з оправою 1 та закріпленою стрічкою 10 повертають в сторону до формувального ролика 14, до встановлення стрічки 10 у вертикальному положенні, якщо дивитись зі сторони патрона. Зі сторони формувального ролика 14 кут нахилу стрічки 10 буде відповідати куту нахилу державки 12, формувального ролика 14 та напрямної 17. Після цього поперечною подачею верстата підводять формувальний ролик 14 до стрічки 10 із

заходом стрічки 10 у паз 18 напрямної 17 із її підтисканням формувальним роликом 14 до оправи 1 без деформації стрічки 10.

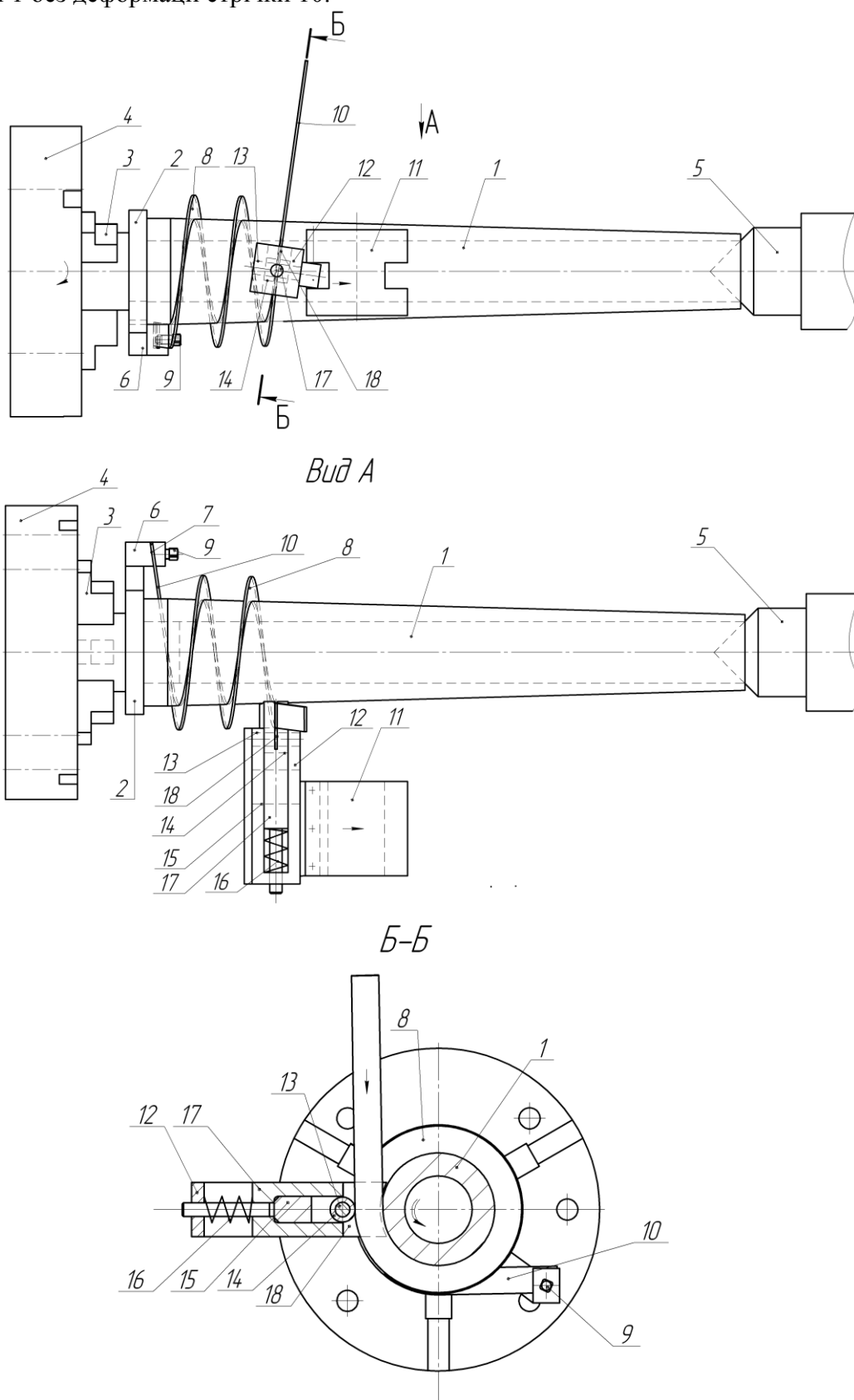


Рисунок 1 – Конструкція пристрою для виготовлення навивних стрічкових гвинтових заготовок

Після цього на верстаті вмикають подачу формувального ролика 14, що дорівнює необхідному кроку витків стрічкової гвинтової заготовки 8, та обертовий рух патрона 4 із оправою 1. Внаслідок цього виконується навивання стрічки 10 на оправу 1 у стрічкову гвинтову заготовку 8. При завершенні процесу навивання стрічкова гвинтова заготовка 8 виходить із паза 18 напрямної 17. Відводять задній центр 5 верстата, розкріплюють стрічку 10 за рахунок розкріплення механізмом затиску 9 та знімають стрічкову гвинтову заготовку 8. При виникненні випадкового контакту напрямної 17 із оправою 1 відбувається зміщення напрямної 17 від оправи 1 за рахунок надлишкової радіальної сили та стиснення пружини 16, що дозволяє запобігати випадковому руйнуванню пристрою.

До переваг пристрою відноситься підвищення якості формування навивних стрічкових гвинтових заготовок за рахунок попередження втрати стійкості навитих витків у нижній частині оправи та розширення технологічних можливостей пристрою за рахунок можливості забезпечення формування витків із кроком, що є більшим за товщину стрічки.

Сила навивання стрічки на оправу визначається залежністю:

$$P = \frac{\beta_{\sigma} \sigma_{TO}}{3L} \left[H \sqrt{\frac{\rho_o}{R_w}} \left(R_w^2 + 2R_0 \sqrt{R_0 \cdot R_w} - 3\rho_n^2 \right) \right] + \frac{\beta_{\sigma} \Pi}{9L} H \frac{\sqrt{\rho_o}}{R_w} \times$$

$$\times \left[3 \ln \left(\frac{R_w}{\rho_o} \right) \left(R_w^2 - 3\rho_n^2 \right) + 4\rho_n \sqrt{\rho_n R_w} \left(4 + 3 \ln \frac{\rho_n}{\rho_o} \right) - 2 \left[R_w^2 + 9\rho_n^2 \right] - 2R_0 \sqrt{R_w \cdot R_0} \left(3 \ln \frac{R_0}{\rho_o} - 2 \right) \right], \quad (1)$$

де L - зміщення центру формувального ролика вгору відносно оправи у вертикальній площині; R_w - зовнішній радіус навивної стрічкової гвинтової заготовки; R_0 - зовнішній радіус оправи; σ_{TO} - екстрапольована межа текучості матеріалу стрічкової гвинтової заготовки; Π - лінійний модуль зміщення матеріалу стрічкової гвинтової заготовки; β_{σ} - коефіцієнт, який залежить від співвідношення головних напружень; H - товщина стрічки; ρ_o - радіус нейтрального шару деформації; ρ_n - радіус нейтрального шару напружень. На основі рівняння (1) побудовано графіки рис. 2.

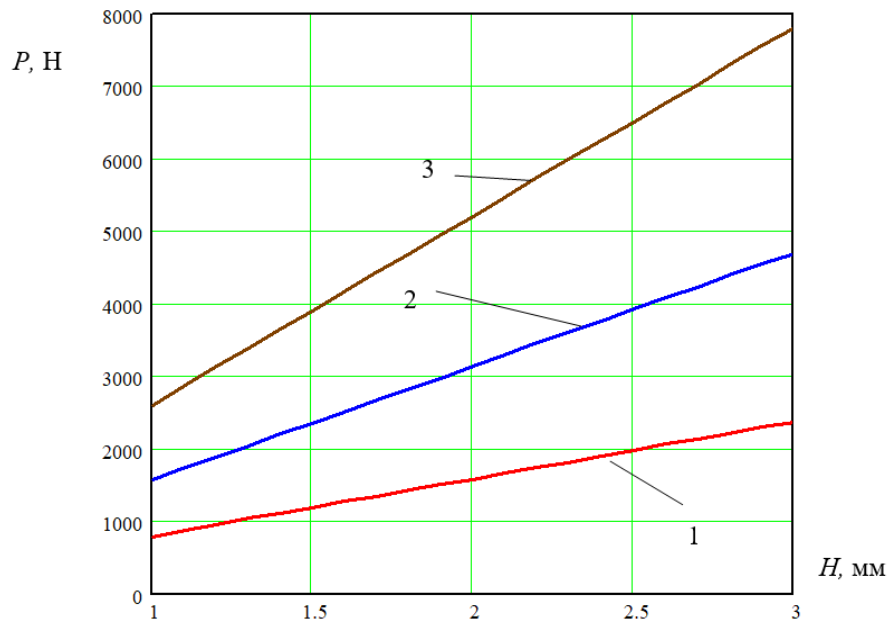


Рисунок 2 – Графіки залежності сили навивання стрічки на оправу від товщини стрічки:

1) $B=10$ мм; 2) $B=14$ мм; 3) $B=18$ мм

УДК 621.9.06:681.5

Віктор Ковальов, д.т.н., проф.; Галина Клименко, д.т.н., проф.; Яна Васильченко, д.т.н., проф.; Максим Шаповалов, к.т.н., доц.; Юрій Лобур
Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ТОЧНІСТЮ З ПОКРАЩЕНОЮ ДИНАМІКОЮ ДЛЯ ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ ЯК МЕХАТРОННА СИСТЕМА

Анотація. Розглянуто проблему підвищення точності обробки на важких токарних верстатах шляхом застосування адаптивної системи керування з покращеними динамічними характеристиками. Запропоновано мехатронний підхід до компенсації пружних деформацій технологічної системи на основі використання сенсорної підсистеми, цифрової обробки інформації, алгоритмів адаптивного керування та швидкодіючого комбінованого електромеханічного привода. Система забезпечує отримання поточної інформації про параметри процесу різання, формування цифрової моделі поверхні заготовки та корекцію положення інструмента в режимі реального часу. Особливу увагу приділено специфіці застосування системи у важких токарних верстатах, для яких характерні значні маси рухомих вузлів, висока інерційність приводів і підвищені вимоги до динамічної стійкості. Показано, що інтеграція механічної, електронної, сенсорної та керуючої підсистем дозволяє віднести запропоновану систему до класу мехатронних систем і забезпечити підвищення точності обробки великогабаритних деталей.

Ключові слова: мехатронна система, важкий токарний верстат, адаптивне керування, точність обробки, цифрове керування.

Viktor Kovalov, Galyna Klymenko, Yana Vasylychenko, Maksym Shapovalov, Yuriy Lobur

Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

ADAPTIVE ACCURACY CONTROL SYSTEM WITH IMPROVED DYNAMICS FOR HEAVY LATHES AS A MECHATRONIC SYSTEM

Abstract The paper considers the problem of improving machining accuracy in heavy lathes through the application of an adaptive control system with enhanced dynamic characteristics. A mechatronic approach to compensating elastic deformations of the technological system is proposed based on the use of a sensor subsystem, digital information processing, adaptive control algorithms, and a high-speed combined electromechanical drive. The system provides real-time acquisition of current information on cutting process parameters, formation of a digital model of the workpiece surface, and correction of tool position in real time. Particular attention is paid to the specific application of the system in heavy lathes, which are characterized by large masses of moving units, high drive inertia, and increased requirements for dynamic stability. It is shown that the integration of mechanical, electronic, sensor, and control subsystems makes it possible to classify the proposed system as a mechatronic system and ensures improved machining accuracy of large-sized parts.

Keywords: mechatronic system, heavy lathe, adaptive control, machining accuracy, digital control.

У сучасному важкому верстатобудуванні одним із ключових напрямів підвищення точності обробки є впровадження систем адаптивного керування, здатних у режимі реального часу компенсувати вплив пружних деформацій технологічної

системи, зовнішніх збурень та динамічних похибок. Особливо актуально це для важких токарних верстатів, які застосовуються для обробки великогабаритних тіл обертання - довгих нежорстких валів, тонкостінних деталей, дисків і порожнистих заготовок, де навіть незначні деформації призводять до суттєвого погіршення точності форми виробу. У таких умовах класичне підвищення жорсткості механічної системи не завжди забезпечує необхідний результат, що зумовлює необхідність застосування мехатронних адаптивних систем керування.

Під час обробки різанням погрішності форми заготовки спричиняють зміну припуску, що викликає коливання сили різання. У свою чергу це призводить до змінних пружних деформацій вузлів верстата, інструмента та самої заготовки. У результаті виникає ефект копіювання похибок форми заготовки на готовий виріб. Для важких токарних верстатів ця проблема має особливе значення через великі маси рухомих вузлів, значну інерційність приводів, а також складність забезпечення достатньої динамічної жорсткості технологічної системи. Додатковий вплив чинять вібрації, дисбаланс заготовки, теплові деформації та коливання сил різання, які є характерними для обробки великогабаритних деталей.

Одним із перспективних рішень є застосування системи адаптивного керування точністю, яка забезпечує автоматичне регулювання положення інструмента відносно заготовки на основі поточної інформації про параметри процесу обробки. Така система складається з вимірювальної, обчислювальної та виконавчої підсистем і функціонує за принципом замкненого зворотного зв'язку, що дозволяє віднести її до класу мехатронних систем. Її мехатронна сутність полягає в інтеграції механічної частини важкого верстата, електронних датчиків, цифрової системи обробки інформації та швидкодіючого електромеханічного привода корекції положення. Саме така інтеграція механіки, електроніки, сенсорики, обчислювальної техніки та автоматичного керування є визначальною ознакою сучасних мехатронних систем. Для реалізації адаптивного керування у важкому токарному верстаті запропоновано систему, у якій контроль точності здійснюється не за кінцевим розміром виробу, а за поточним значенням глибини різання, що дозволяє оперативно компенсувати збурення ще під час формування поверхні. У системі використовуються датчик кутового положення заготовки, датчик поздовжнього положення інструмента, датчик глибини різання та керуюча ЕОМ, яка виконує функцію пам'яті та формує керуючі сигнали для виправляючого привода. Таким чином, створюється цифрова модель поверхні заготовки, яка надалі використовується для корекції процесу обробки в реальному часі.

Модель поверхні заготовки у пам'яті ЕОМ описується у вигляді матриці радіальних координат:

$$A = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1\varphi} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2\varphi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{s1} & r_{s2} & \dots & r_{s\varphi} \end{pmatrix} \quad (1)$$

де r – радіус-вектор (відстань від точки поверхні до осі обертання заготовки);

s – поздовжня координата;

φ – кутова координата.

Після вимірювання поверхні заготовки формується матриця значень глибини різання:

$$T=A-B \quad (2)$$

або

$$\begin{vmatrix} t'_{11} & t'_{12} & \dots & t'_{1\varphi} \\ t'_{21} & t'_{22} & \dots & t'_{2\varphi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t'_{s1} & t'_{s2} & \dots & t'_{s\varphi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1\varphi} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2\varphi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{s1} & r_{s2} & \dots & r_{s\varphi} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} r'_{11} & r'_{12} & \dots & r'_{1\varphi} \\ r'_{21} & r'_{22} & \dots & r'_{2\varphi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r'_{s1} & r'_{s2} & \dots & r'_{s\varphi} \end{vmatrix} \quad (3)$$

де T – матриця значень глибини різання;

A – матриця вимірних радіусів заготовки;

B – матриця радіусів готового виробу, сформована за даними креслення.

У процесі обробки система порівнює поточне значення глибини різання з розрахунковим і формує сигнал корекції, забезпечуючи стабілізацію взаємного положення інструмента і заготовки. Статична передатна функція системи має вигляд:

$$\Delta y = t_{sp} - t'_{sp} \quad (4)$$

або

$$y = y_{уст} + t_{sp} - t'_{sp} \quad (5)$$

де Δy – приріст координати виправлюючого приводу;

y – координата виправлюючого приводу;

$y_{уст}$ – стале значення координати виправлюючого приводу, до збурювання;

t_{sp} – поточне обмірюване значення глибини різання;

t'_{sp} – розрахункове значення глибини різання, що відповідає поточному положенню заготовки.

Ефективність роботи адаптивної системи визначається швидкодією виконавчого приводу. Для важких токарних верстатів ця проблема є особливо складною через значну масу рухомих вузлів та велику інерційність приводів подач. Класичні гвинтові або гідравлічні приводи не забезпечують необхідного часу реакції, який для важких верстатів може становити одиниці або десятки мілісекунд. Тому запропоновано комбінований мехатронний привід, що поєднує основний електромеханічний привід великого ходу з короткоходовим швидкодіючим лінійним електродвигуном (рис. 1). Така структура дозволяє одночасно забезпечити значне переміщення супорта і високу швидкість компенсації похибок.

Привід містить у собі основний двигун постійного струму 1, вал якого через редуктор 2 зв'язаний з ходовим гвинтом 3. На гайці гвинтової передачі 4 встановлений статор лінійного електродвигуна постійного струму 5, а його повзун 6 зв'язаний з виконавчим органом 7. Положення виконавчого органу відстежується лінійним вимірювальним перетворювачем 8, а зсув повзуна лінійного двигуна відносно гайки гвинтової передачі – перетворювачем 9.

Привод фактично являє собою два слідкуючих приводи, включених послідовно з зовнішньою і внутрішньою петлею зворотного зв'язку. Внутрішня петля утворена перетворювачем 9, підсилювачем постійного струму 10 і основним двигуном 1. Сигналом неузгодженості для цієї петлі служить відносний зсув статора і повзуна лінійного двигуна, тобто ця частина приводу прагне утримати повзун 6 у середньому положенні відносно статора 5. Зовнішня петля зворотного зв'язку утворена вимірювальним перетворювачем 8, порівнюючим пристроєм 11, задаючим пристроєм

12, підсилювачем постійного струму 13 і лінійним двигуном, і забезпечує відповідність дійсного положення робочого органа величині, що задана пристроєм 12.

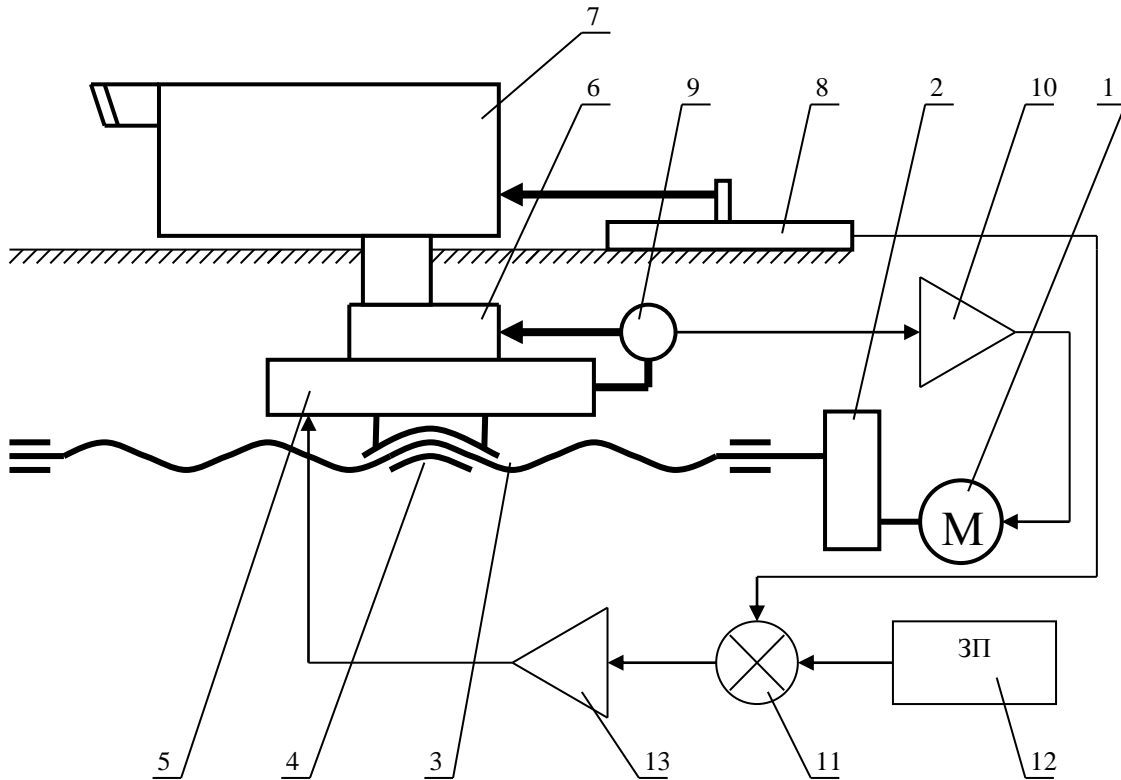


Рисунок 1 – Структурна схема комбінованого стежачого привода

Запропонована система є типовим прикладом мехатронної системи для важких токарних верстатів, у якій механічна підсистема, сенсорні пристрої, цифрова обробка сигналів, адаптивний алгоритм керування та швидкодіючий електромеханічний привід працюють як єдиний інтегрований комплекс. Її застосування дозволяє компенсувати пружні деформації, підвищити точність обробки великогабаритних деталей, знизити вплив вібрацій та зовнішніх збурень, а також суттєво покращити динамічні характеристики важких верстатів.

УДК 622.647:620.9

Олексій Куроп'ятник, к. т. н., доц.

Український державний університет науки і технологій, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ШАХТНИХ КОНВЕЄРІВ

Анотація. У роботі виконано аналіз сучасних напрацювань у сфері підвищення енергоефективності шахтних конвеєрів, а також визначено спільні та окремі фактори впливу на енергоефективність цих транспортних засобів на основі аналізу питомих енерговитрат.

Ключові слова: енергоефективність; питомі енерговитрати; стрічковий конвеєр; пластинчастий конвеєр; скребковий конвеєр; порівняльний аналіз

Oleksii Kuropiatnyk

DETERMINATION OF FACTORS INFLUENCE ON THE ENERGY EFFICIENCY OF MINE CONVEYORS

Abstract. The paper analyzes modern developments in the field of increasing the energy efficiency of mine conveyors, and also identifies common and individual factors influencing the energy efficiency of these vehicles based on an analysis of specific energy consumption.

Keywords: energy efficiency; specific energy consumption; belt conveyor; plate conveyor; scraper conveyor; comparative analysis

Одними з основних транспортних засобів шахт є конвеєри різних типів. Вони використовуються для перевезення вугілля, руди, породи та гірничої маси від забоїв до ділянок переробки, перевантаження або тимчасового складування, а також – як пасажирський транспорт. Серед них особливо поширеними є стрічкові, пластинчасті та скребкові конвеєри, які здійснюють переміщення вантажів за прямолінійними або викривленими в плані трасами з кутами підйому до $\pm 35^\circ$.

Аналіз літературних джерел показав, що питання енергоефективності шахтних конвеєрів було та залишається актуальним як для окремих підприємств, так і для галузі в цілому. Автори роботи [1] виділяють два способи зниження енергоспоживання на шахтному магістральному конвеєрному транспорті: встановлення додаткових рухомих або стаціонарних бункерів та використання засобів для забезпечення змінності швидкості руху конвеєрної стрічки пропорційно вхідному вантажопотоку. Відмічається, що підвищення коефіцієнта корисної дії приводу, заміна муфт на більш сучасні, покращення пускових режимів шляхом упровадження пристроїв плавного пуску, а також застосування нових типів стрічок збільшують термін служби рухомих елементів конвеєра, але знижують споживання електроенергії незначною мірою. Більш сучасні дослідження, ґрунтовний огляд яких наведено в роботі [2], показують, що ключовими рішеннями у підвищенні енергоефективності є використання стрічок з низьким тертям, частотно-регульованих приводів, систем моніторингу та автоматизації. Автор зауважив, що вибір правильних параметрів конструкції, проведення профілактичного обслуговування та використання спеціальних матеріалів мають вирішальне значення для зниження споживання енергії. Питанням підвищення енергоефективності стрічкових конвеєрів присвячено роботи [3, 4, 5]. Методики досліджень, які використали автори, є схожими, однак робота [5] спрямована на оцінювання впливу окремих параметрів конвеєра на його енергоефективність, тоді як у роботі [3] проведено окремі дослідження та встановлено оптимальні значення параметрів конвеєра, що відповідають мінімальним питомим енерговитратам процесу

транспортування різних будівельних матеріалів. У дослідженні [4] представлено результати теоретичного та емпіричного аналізу використання енергії в конвеєрах для розкривних порід та вугілля з акцентом на балансуванні взаємозв'язку між швидкістю стрічки та навантаженням. Також проводилися дослідження характеру розподілу втрат енергії під час завантаження [6]. Встановлено, що використання регулятора напруги дозволяє зменшити втрати енергії, які виникають через зміни технологічних параметрів стрічкового конвеєра. У роботі [7] проведено експериментальні дослідження по визначенню питомих енерговитрат стрічкових конвеєрів за різних значень їхніх характеристик. Їх результати отримано шляхом виконання статистичного аналізу даних про конвеєри, що використовуються на різних цементних заводах. У межах дослідження [8] побудовано моделі динамічного потоку вугілля та енергоефективності скребкового конвеєра для аналізу впливу різних змінних на споживання енергії та швидкість видобутку кускового вугілля. А в роботі [9] було складено модель споживання енергії на основі робочих характеристик та розроблено новий тип конвеєра з використанням скребоків із додатковими котками. Для підвищення енергоефективності запропоновано конструкцію скребкового конвеєра з рухомим дном, яка дозволяє суттєво зменшити споживану потужність двигуна приводу конвеєра. Питання підвищення енергоефективності конвеєрів є актуальним не лише для переміщення вантажів, але й для переміщення людей, про що свідчать відповідні дослідження.

Найвні дослідження вказують на досить глибоке опрацювання питань енергоефективності шахтних конвеєрів, але в них недостатньо уваги приділено виявленню спільних та окремих факторів впливу на енергоефективність цих транспортних засобів.

Метою цієї роботи є виявлення спільних та окремих факторів впливу на енергоефективність шахтних конвеєрів на основі аналізу питомих енерговитрат.

Питомі енерговитратами e відображають витрати енергії E на транспортування вантажу масою m на відстань s : $e = E/(ms)$. При цьому витрати енергії $E = Fs/\eta$, де F – окружне зусилля приводу; η – коефіцієнт корисної дії приводу конвеєра. Після виконання математичних перетворень отримуємо

$$e = \frac{F}{m\eta}. \quad (1)$$

Окружне зусилля приводу конвеєра з гнучким тяговим органом (стрічкового, пластинчастого, скребкового) визначається з використанням методу обходу за контуром, відповідно до якого

$$S_{i+1} = S_i + W_{i,i+1}, \quad (2)$$

де S_i, S_{i+1} – натяги тягового органу в точках i та $i+1$ тягового контуру;
 $W_{i,i+1}$ – опір руху тягового органу на ділянці контуру між точками i та $i+1$.

Розташування цих точок відповідає схемі (рис. 1), складеній для стрічкового конвеєра; для інших типів конвеєрів вона буде схожою, відмінності – у видах несучих елементів та тягових органів.

Вибір точки мінімального натягу здійснюється в залежності від типу конвеєра, величини коефіцієнта опору руху рухомих елементів та кута нахилу конвеєра. Однак дослідження, виконані в межах даної роботи, показали, що така особливість розрахунку не має суттєвого впливу ані на величину, ані на характер залежності питомих енерговитрат від характеристик конвеєрів різних типів, тому в подальшому окружне зусилля приводу будемо визначати за формулами:

– для стрічкових конвеєрів [3]

$$F = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} (kW_{12} + W_{34}); \quad (3)$$

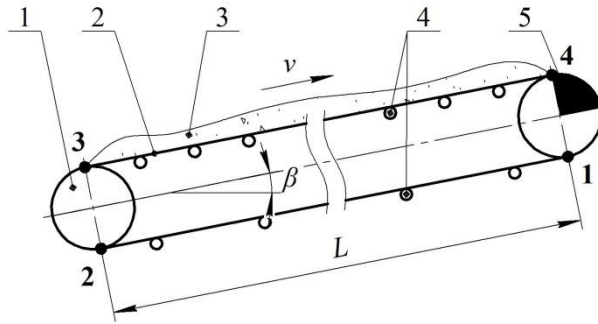


Рисунок 1 – Схема конвеєра [3]:

1 – натяжний барабан; 2 – стрічка; 3 – транспортований вантаж; 4 – роликоопори;
5 – приводний барабан

– для ланцюгових конвеєрів (пластинчастих, скребкових)

$$F = (k - 1)S_{\min} + kW_{12} + W_{34}, \quad (4)$$

де S_{\min} – мінімальний натяг тягового органу конвеєра (стрічки або ланцюга).

У цих формулах опори руху тягового органу:

– для стрічкових конвеєрів

$$W_{12} = q_0gL(\omega \cos \beta - \sin \beta) + q''_p gL\omega \cos \beta; \quad (5)$$

$$W_{34} = (q + q_0)gL(\omega \cos \beta + \sin \beta) + q'_p gL\omega \cos \beta; \quad (6)$$

– для пластинчастих та скребкових конвеєрів

$$W_{12} = q_0gL(\omega \cos \beta - \sin \beta); \quad (7)$$

– для пластинчастих конвеєрів

$$W_{34} = (q + q_0)gL(\omega \cos \beta + \sin \beta); \quad (8)$$

– для скребкових конвеєрів

$$W_{34} = (q\omega_b + q_0\omega)gL \cos \beta + (q + q_0)gL \sin \beta. \quad (9)$$

У виразах (5)–(9) прийнято такі позначення:

q – погонна маса транспортованого вантажу;

q_0 – погонна маса тягового елемента (стрічки або ланцюгів);

q'_p, q''_p – погонна маса роликоопор стрічкового конвеєра (робочої та холостої віток стрічки відповідно);

L, β – довжина та кут нахилу конвеєра (див. рис. 1);

ω – коефіцієнт опору руху рухомих елементів конвеєра;

ω_b – коефіцієнт опору руху вантажу в жолобі (для скребкових конвеєрів).

Після виконання математичних перетворень з урахуванням $m = qL$ отримуємо:

– для стрічкових конвеєрів

$$e_{\text{стр}} = \frac{g}{\eta} \cdot \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \cdot [(1 + k_m + kk_m + k_p)\omega \cos \beta + (1 + k_m - kk_m)\sin \beta]; \quad (10)$$

– для пластинчастих конвеєрів

$$e_{\text{пл}} = \frac{g}{\eta} \cdot \left[(k - 1) \frac{S_{\min}}{qgL} + (1 + k_m + kk_m)\omega \cos \beta + (1 + k_m - kk_m)\sin \beta \right]; \quad (11)$$

– для скребкових конвеєрів

$$e_{\text{скр}} = \frac{g}{\eta} \cdot \left[(k - 1) \frac{S_{\min}}{qgL} + (k_m + kk_m)\omega \cos \beta + \omega_b \cos \beta + (1 + k_m - kk_m)\sin \beta \right]. \quad (12)$$

Залежності (10)–(12) містять нові позначення:

$k_m = q_0/q$ – коефіцієнт маси рухомих елементів конвеєра; для пластинчастих та скребкових конвеєрів такими елементами є ланцюги з пластинами або скребками (в залежності від типу конвеєра), для стрічкових – стрічка;

$k_p = (q'_p + kq''_p)/q$ – приведений коефіцієнт маси роликкоопор (для стрічкових конвеєрів).

Аналізуючи отримані залежності, визначаємо фактори впливу на енергоефективність конвеєрів. Здебільшого, вони є спільними для конвеєрів різних типів, відмінності – у значеннях певних величин:

- коефіцієнт корисної дії приводу (η);
- коефіцієнт опору при огинанні тяговим органом барабана або зірочки (k);
- коефіцієнт маси рухомих елементів конвеєра (k_m);
- приведений коефіцієнт маси роликкоопор (k_p) – для стрічкових конвеєрів;
- коефіцієнт зчеплення стрічки з приводним барабаном (f) – для стрічкових конвеєрів;
- кут огинання стрічкою приводного барабана (α) – для стрічкових конвеєрів;
- коефіцієнт опору руху рухомих елементів конвеєра (ω);
- коефіцієнт опору руху вантажу в жолобі (ω_v) – для скребкових конвеєрів;
- кут нахилу конвеєра (β);
- мінімальний натяг ланцюгів (S_{min}) – для пластинчастих та скребкових конвеєрів;
- погонна маса вантажу (q) – для пластинчастих та скребкових конвеєрів;
- довжина конвеєра (L) – для пластинчастих та скребкових конвеєрів.

Перелік посилань

1. Разумний Ю. Т., Прокуда В. М. Енергоефективність магістрального конвеєрного транспорту вугільних шахт : монографія. Дніпро : НГУ, 2018. 120 с.
2. Konieczna-Fuławka M. Energy-saving solutions applied in belt conveyors: a literature review. *Energies*. 2025. Vol. 18. 3019. doi: 10.3390/en18123019.
3. Куроп'ятник О. С. Параметрична оптимізація стрічкових конвеєрів за критерієм енергоефективності. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2021. № 3 (93). С. 50–58. doi: 10.15802/stp2021/242036.
4. Jurdziaik L., Bajda M. Balancing load and speed: a new approach to reducing energy use in coal conveyor systems. *Energies*. 2025. Vol. 18. 4716. doi: 10.3390/en18174716.
5. Kulinowski P. Directions for reducing the energy consumption of mining belt conveyors. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*. 2022. № 3 (551). P. 21–34. doi: 10.7494/miag.2022.3.551.21.
6. Печеник М. В., Бур'ян С. О., Казьміна Л. М. Дослідження характеру розподілу втрат під час завантаження конвеєра. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 2. С. 63–67. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2215/2160>.
7. Jena M. Ch., Mishra S. K., Moharana H. S. Experimental investigation on maximizing conveying efficiency of belt conveyors used in series application and estimation of power consumption through statistical analysis. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2022. Vol. 42 (3). 14031. doi: 10.1002/ep.14031.
8. Lu Q., Chen Y., Cao X., Xie T., Mao Q., Leng J. Dynamic coal flow-based energy consumption optimization of scraper conveyor. *Appl. Sci*. 2025. Vol. 15. 7366. doi: 10.3390/app15137366.
9. Chen L., Song G., Wang D., Zhang X., Hao J. Energy consumption optimization of scraper conveyors adopting rolling friction: A technological revolution in China's coal mining equipment. *Journal of Industrial Safety*. 2025. Vol. 2, Issue 4. P. 213-220. doi: 10.1016/j.jinse.2025.04.002.

УДК 621.9.02:546.26:620.22

Олександр Лисенко, к.т.н, доц.; Іван Валявський, к.т.н, доц.; Михайло Короленко
Центральноукраїнський національний технічний університет, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО АЛМАЗУ (ЛОНСДЕЙЛІТУ) В ІНСТРУМЕНТАЛЬНОМУ ВИРОБНИТВІ

Анотація. Розглянуто перспективи використання гексагонального алмазу (лонсдейліту) у якості потенційного надтвердого матеріалу для інструментального виробництва. Проаналізовано його структурні особливості, фізико-механічні переваги порівняно з традиційним кубічним алмазом та можливі напрями застосування у створенні зносостійкого різального, абразивного й мікроінструменту.

Ключові слова: лонсдейліт, гексагональний алмаз, інструментальне виробництво, надтверді матеріали.

Oleksandr Lysenko, Ivan Valiavskiy, Mykhailo Korolenko
**PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF HEXAGONAL DIAMOND
(LONSDALEITE) IN TOOL MANUFACTURING**

Abstract. The prospects for the use of hexagonal diamond (lonsdaleite) as a potential superhard material for tool manufacturing are considered. Its structural features, physical and mechanical advantages compared with conventional cubic diamond, and possible areas of application in the development of wear-resistant cutting, abrasive, and micro-tools are analyzed.

Keywords: lonsdaleite, hexagonal diamond, tool manufacturing, superhard materials

Сучасне інструментальне виробництво орієнтоване на створення матеріалів, здатних працювати в умовах підвищених контактних навантажень, високих температур, інтенсивного тертя та абразивного зношування [1]. Особливо актуальним це є для виготовлення різального, абразивного, шліфувального, правлячого та мікроінструменту, який застосовується під час обробки важкооброблюваних матеріалів, композиційних структур, кераміки, надтвердих сплавів і матеріалів аерокосмічного призначення [2]. У цьому контексті значний науковий інтерес викликає гексагональний алмаз – лонсдейліт, який є поліморфною модифікацією вуглецю з sp^3 -зв'язками, але, на відміну від звичайного кубічного алмазу, має гексагональну кристалічну структуру [3].

Лонсдейліт тривалий час розглядався переважно як мінерал метеоритного походження, що формується за умов надвисокого тиску й температури під час ударних процесів. Тривалий час навіть тривала дискусія щодо того, чи є лонсдейліт самостійною фазою, чи його експериментальні прояви можуть пояснюватися дефектним або двійникованим кубічним алмазом. Проте останні дослідження суттєво активізували інтерес до нього як до потенційного інструментального матеріалу. Зокрема, у 2026 році китайськими дослідниками повідомлено про синтез міліметрових зразків фазово чистого гексагонального алмазу з високоорієнтованого піролітичного графіту за умов високого тиску та температури; автори зазначають, що такий матеріал демонструє вищу твердість порівняно з кубічним алмазом і високу термічну стабільність [4]. Водночас необхідно зазначити, що практичне використання лонсдейліту все ще перебуває на початковій стадії через складність синтезу, обмежені розміри отриманих зразків і потребу в додатковому вивченні його механізмів деформації та руйнування [5].

Актуальним завданням є аналіз перспективи використання гексагонального алмазу (лонсдейліту) в інструментальному виробництві та визначити основні напрями

його потенційного застосування у створенні надтвердих, зносостійких і термостабільних інструментальних матеріалів.

Лонсдейліт належить до надтвердих вуглецевих матеріалів, у яких атоми вуглецю поєднані міцними ковалентними sp^3 -зв'язками. Його принципова відмінність від традиційного алмазу полягає у типі просторового укладання атомних шарів (рис. 1). Кубічний алмаз має кубічну ґратку, тоді як лонсдейліт характеризується гексагональним типом кристалічної структури. Саме ця особливість зумовлює інтерес до нього як до матеріалу з потенційно підвищеною твердістю, жорсткістю і термічною стабільністю.

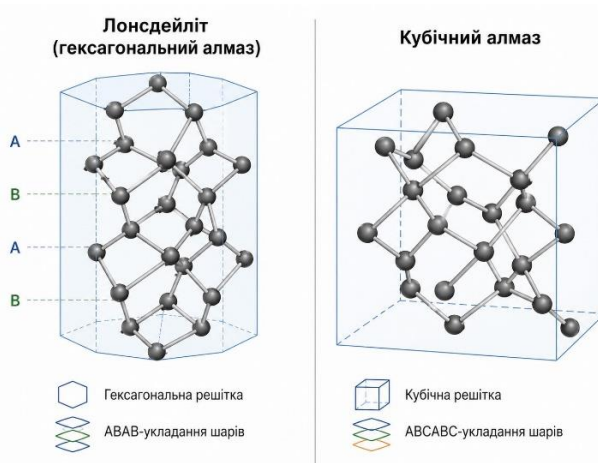


Рисунок 1 – Порівняння кристалічної будови лонсдейліту та кубічного алмазу

Як видно з рис. 1, відмінність між лонсдейлітом і традиційним алмазом полягає не в типі хімічного зв'язку, оскільки в обох випадках атоми вуглецю утворюють міцну sp^3 -гібридизовану тетраедричну сітку, а саме в характері просторового укладання атомних шарів. Для лонсдейліту характерне гексагональне АВАВ-укладання, тоді як для кубічного алмазу – кубічне АВСАВС-укладання. Саме ця структурна відмінність може впливати на анізотропію механічних властивостей, твердість і поведінку матеріалу під дією контактних навантажень.

Для інструментального виробництва особливе значення мають такі властивості лонсдейліту, як висока твердість, стійкість до пластичної деформації, здатність протидіяти абразивному зношуванню та потенційно підвищена теплостійкість. За даними проведених досліджень, об'ємний гексагональний алмаз може демонструвати твердість за Віккерсом до 155 ГПа за осьового навантаження 9,8 Н, що перевищує значення для кубічного алмазу біля 110 ГПа в окремому кристалографічному напрямі [5]. Це відкриває перспективи використання лонсдейліту у виготовленні інструментів для високоточної, мікро- та нанорозмірної обробки, де вирішальними є стабільність геометрії різальної кромки, мінімізація зношування та здатність зберігати працездатність за екстремальних умов тертя.

Одним із перспективних напрямів є застосування лонсдейліту в алмазних різальних пластинах, мікрорізцях, інструментах для надточного точіння, свердлах малого діаметра, правлячих роликах і абразивних зернах для шліфувальних кругів. Завдяки високій твердості та очікуваній зносостійкості такий матеріал може бути корисним під час обробки кераміки, скла, кремнію, сапфіру, карбідів, композиційних матеріалів і твердих неметалевих структур. Особливо перспективним є його використання в тих випадках, де звичайний алмазний інструмент зазнає інтенсивного мікросколювання або втрати гостроти різальної кромки.

Важливим напрямом може стати створення композиційних інструментальних матеріалів, у яких лонсдейліт використовуватиметься не як монолітний матеріал, а як зміцнювальна фаза або надтвердий компонент у матриці. Такий підхід є більш реалістичним на початковому етапі впровадження, оскільки отримання великих монокристалічних або полікристалічних заготовок лонсдейліту залишається складним технологічним завданням. Перспективними можуть бути композити типу «лонсдейліт – кубічний алмаз», «лонсдейліт – кубічний нітрид бору», а також наноструктуровані алмазні матеріали з контрольованим співвідношенням кубічної та гексагональної фаз.

На зараз промислове застосування лонсдейліту стримується низкою чинників. Насамперед це складність його стабільного синтезу, необхідність використання високого тиску й температури, обмеженість розмірів отриманих зразків, а також проблема достовірної ідентифікації гексагональної фази.

Для інструментального виробництва важливим завданням є не лише отримання лонсдейліту, а й оцінювання його технологічної придатності: здатності до спікання, формування стабільної різальної кромки, сумісності з металевими або керамічними зв'язками, поведінки під час ударних і термоциклічних навантажень, а також стійкості до хімічної взаємодії з оброблюваними матеріалами. Наприклад, як і традиційний алмаз, лонсдейліт потенційно може мати обмеження під час обробки залізвмісних сплавів через хімічну спорідненість вуглецю до заліза за підвищених температур. Тому найбільш реалістичними сферами його застосування на першому етапі можна вважати обробку неметалевих, керамічних, напівпровідникових і композиційних матеріалів.

Гексагональний алмаз (лонсдейліт) є одним із найперспективніших надтвердих матеріалів для майбутнього розвитку інструментального виробництва. Його потенційні переваги пов'язані з високою твердістю, жорсткістю, термічною стабільністю та здатністю працювати в умовах інтенсивного абразивного зношування. Найбільш доцільними напрямками використання лонсдейліту є виготовлення абразивних зерен, мікроінструменту, інструментів для надточної обробки, правлячих елементів і композиційних надтвердих матеріалів. Водночас його широке промислове впровадження потребує подальшого розвитку технологій синтезу, збільшення розмірів якісних зразків, дослідження механізмів зношування та перевірки працездатності в реальних умовах різання, шліфування і мікрообробки.

Перелік посилань

1. Ігнат'єв, Е. С. Основні тенденції розвитку сучасного ріжучого інструменту / Е. С. Ігнат'єв, О. В. Лисенко // Наукові записки : зб. наук. пр. - Кіровоград : КНТУ, 2011. - Вип. 11, ч. 1. - С. 221-225. – Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/4836>.

2. Лисенко, О. Забезпечення високих різальних властивостей інструментального оснащення високошвидкісних обробних центрів / О. Лисенко // Збірник тез доповідей викладачів, аспірантів та співробітників LVI науково-технічної конференції «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2025» 24-25 квітня 2025 року. Кропивницький: ЦНТУ, 2025. - С. 75-76.

3. Лонсделейт (Лонсдейліт) / В. С. Білецький, В. І. Павлишин // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2016. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-56395>.

4. Lai S., Yang X., Shi J., Liu S., Guo Y., Yan L., Zang J., Zhang Z., Jia Q., Sun J., Cheng S., Shan C. Bulk hexagonal diamond // Nature. - 2026. - Vol. 651. - P. 621-625. - DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10212-4>.

5. Tao Y., Bu Y., Wang H. Mechanical properties of hexagonal diamond: A first-principles study // Extreme Mechanics Letters. - 2026. - Vol. 83. - Article 102454. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eml.2026.102454>.

УДК 621.87

Ярослав Литвиненко, д.т.н., проф.; Володимир Дзюра д.т.н., проф.;

Катерина Марущак

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕГУЛЯРНОГО І ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПЛОЩИННОЇ ОДНОРІДНОСТІ

Анотація. Проаналізовано проблему забезпечення однорідності створюваних на робочих поверхнях пар тертя регулярних та частково регулярних мікрорельєфів для покращення їх експлуатаційних властивостей. Розроблено алгоритм для реалізації методу оптимізації розміщення регулярного і частково регулярного мікрорельєфу для забезпечення максимальної площинної однорідності. Розроблений алгоритм здійснює пошук оптимального взаємного розміщення канавок мікрорельєфу, враховуючи їх геометричні параметри (амплітуду, крок, ширину канавки).

Ключові слова: регулярні мікрорельєфи, комп'ютерне моделювання, алгоритм, геометричні параметри, площинна неоднорідність, канавки, площа.

Iaroslav Lytvynenko, Volodymyr Dzyura, Kateryna Marushchak

COMPUTER MODELING AND OPTIMIZATION OF REGULAR AND PARTIALLY REGULAR MICRORELIEF TO ENSURE MAXIMUM PLANE UNIFORMITY

Abstract. The problem of ensuring the uniformity of friction pairs created on the working surfaces of regular and partially regular microreliefs to improve their operational properties has been analyzed. An algorithm has been developed to optimize the placement of regular and partially regular microreliefs to achieve maximum planar uniformity. The developed algorithm searches for the optimal mutual placement of microrelief grooves, accounting for their geometric parameters (amplitude, pitch, groove width).

Keywords: regular microreliefs, computer modeling, algorithm, geometric parameters, planar heterogeneity, grooves, area.

Регуляризація профілю поверхні – процес створення частково чи повністю регулярного мікрорельєфу на робочих поверхнях деталей машин. Формування регулярного мікрорельєфу на робочих поверхнях деталей машин відчутно підвищує ресурс їх роботи за рахунок зниження ймовірності захоплення деталей за умов рідинного та сухого тертя, більшої мастилоємності поверхонь тертя, меншого періоду припрацювання або його відсутність; меншого коефіцієнту тертя між спряженими деталями, а також вищої зносостійкості [1]. Забезпечити ці переваги можна лише, створивши на поверхні мікрорельєф із такими параметрами, які б забезпечували однакові властивості.

У попередніх дослідженнях було розроблено метод визначення площинної неоднорідності профілю канавок регулярного та частково регулярного мікрорельєфу [2]. Тому для оцінювання поверхонь з регулярними мікрорельєфами доцільно використовувати метод визначення площинної неоднорідності розподілу площі канавок та числові параметри, що відображають вплив форми канавок, їх геометричних параметрів та взаємного розміщення на площині. Цей метод дозволяє встановити нерівномірність розподілу площі канавки мікрорельєфу вздовж будь-якої з осей,

відносно яких вони формуються. Однак реалізація методу є досить трудомісткою та вимагає великих затрат часу та ретельного підходу до опрацювання результатів.

Запропоновано комп'ютерний алгоритм для оптимального розміщення канавок мікрорельєфу.

Вхідними даними для розроблення алгоритму пошуку оптимального розміщення канавок за обраними критеріями оптимізації були дані трьох рівнів:

- дані, що описують геометричні параметри канавок (закон зміни осьової лінії мікронерівності, амплітуда канавки, осьовий крок канавки, ширина канавки);
- умови, що визначають взаємне розміщення канавок (канавки не дотикаються, канавки дотикаються, канавки перетинаються);
- параметри оптимізації (значення коефіцієнта площинної неоднорідності k_g , максимальне значення висоти перерізу канавки R_{max} , середнє значення висот перерізу канавки R_{aver}).

Структурна схема роботи алгоритму подана на рис. 1. При цьому вхідними даними для проведення комп'ютерного моделювання мікрорельєфу є параметри синусоподібних канавок. Принцип роботи алгоритму полягає у наступному: спочатку задають геометричні параметри осьової лінії канавки у формі синусоїди: осьовий крок канавки T_g , амплітуда A_g (блок 1). Після цього вводять параметр b_g , який моделює ширину канавки та забезпечує побудову верхньої і нижньої еквідистант на відстані $b_g/2$ від осьової лінії канавки у формі синусоїди (блок 2). Далі задають параметр S_o , який відповідає за міжосьову відстань між осьовими лініями канавок та побудову співвісної канавки з параметрами, введеними у блоці 1 (блок 3). На цьому етапі задання вхідних даних геометричних параметрів канавок та параметрів їх розміщення завершено. На наступному етапі слід визначити напрям побудови графіків площинної неоднорідності канавок мікрорельєфу та обрати область її визначення. Область визначення площинної неоднорідності обрано таким чином, щоб охопити елементи суміжних канавок, які періодично повторюються з кроком T_g в осьовому напрямку і кроком S_o в міжосьовому напрямку.

Залежно від обраного напрямку аналізу площинної неоднорідності та подальшої оптимізації розміщення канавок, алгоритм запропонує вертикальний чи горизонтальний аналіз. При цьому задають відстані (крок) між січними лініями горизонтального та вертикального перерізу (блок 4.1, 4.2) або (блок 5.1, 5.2). Для побудови графіків площинної неоднорідності слід додати відрізки січних ліній, що перетинають тіло канавки у горизонтальному чи вертикальному напрямі. Залежно від обраного напрямку визначення площинної неоднорідності алгоритм буде додавати відрізки вертикальних (блок 6.1), або горизонтальних січних ліній (блок 6.2) .

Результатом додавання відрізків є графік площинної неоднорідності, який є сумою відрізків січних вертикальних (блок 7.1) або горизонтальних ліній (блок 7.2). Процес оптимізації розміщення канавок мікрорельєфу ґрунтується на послідовному визначенні зазначених параметрів для кожного можливого розміщення канавок і є досить складним. Його автоматизація забезпечує виявлення оптимальних параметрів розташування канавок та неоднорідності розподілу їх площі у режимі реального часу.

Розроблено алгоритм для оптимізації розташування канавок частково регулярного мікрорельєфу із канавками синусоподібної форми і забезпечення максимальної площинної однорідності мікрорельєфу.

Пропонований алгоритм забезпечує оптимальне взаємне розташування канавок мікрорельєфу, враховуючи їх геометричні параметри (амплітуду, крок, ширину канавки). Критеріями оптимізації були: мінімальна неоднорідність вздовж однієї з осей x або y , мінімальні значення параметрів, що характеризують площинну неоднорідність – коефіцієнт площинної неоднорідності k_g , мінімальне значення максимальної висоти

відрізка паралельного осі x чи y $R_{(x)y}max$, середнє арифметичне значення усіх висот відрізків паралельних до осі x чи y $R_{y(x)aver}$.

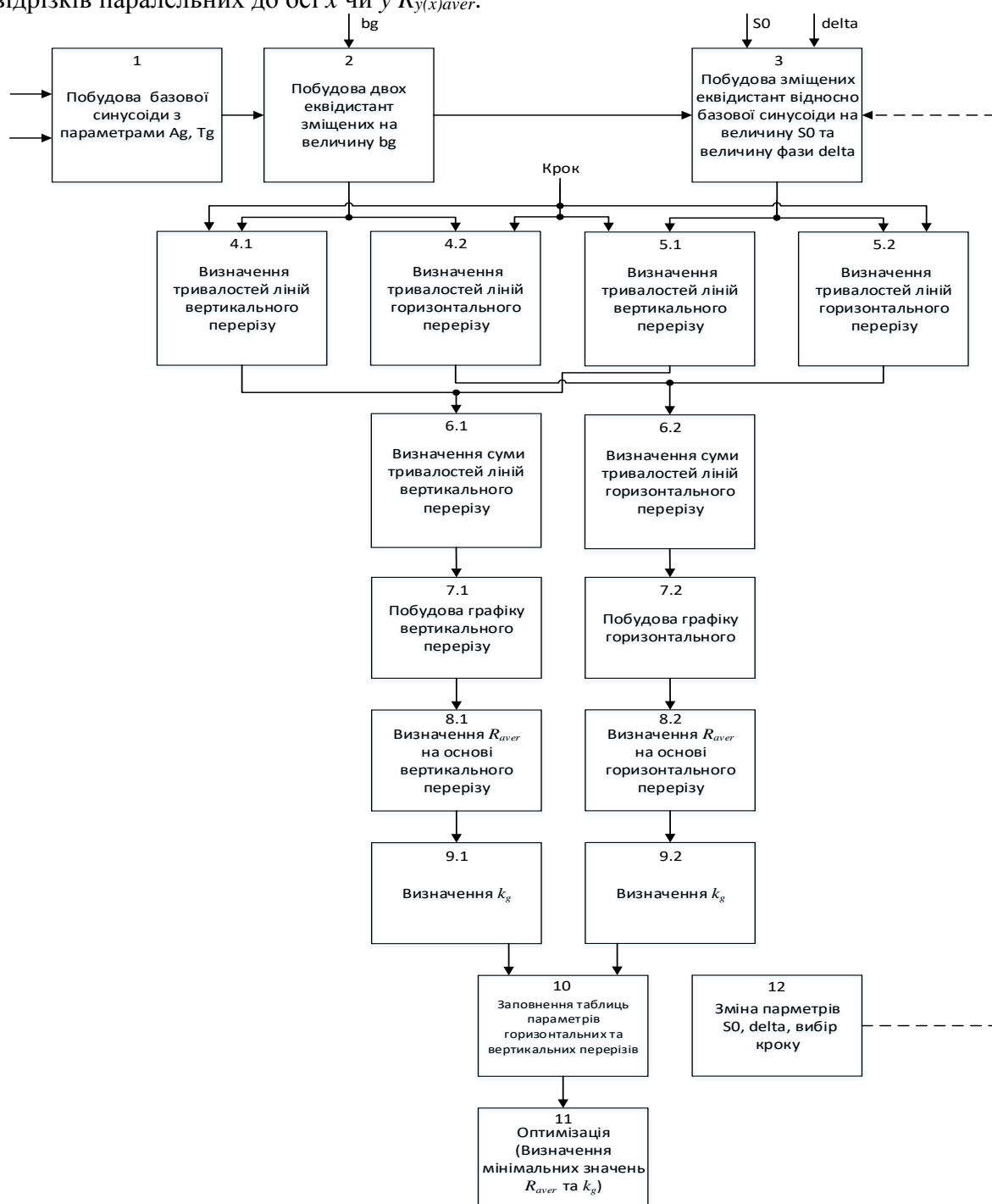


Рисунок 1 – Структурна схема нового алгоритму комп'ютерного моделювання впорядкованого мікрорельєфу з заданими параметрами

Перелік посилань

1. Pawlus P. A study on the functional properties of honed cylinders surface during running-in, *Wear* 1994, 176 (2), 247–254. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90153-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90153-8). Aug.
2. Dzyura V., Maruschak P., Bytsa R., Zinchenko I. Planar non uniformity of regular and partially regular microreliefs and method for its evaluation. *Eng* 2025, 6, 314. <https://doi.org/10.3390/eng6110314>.

УДК 621.941-229

Ігор Луців¹, д.т.н., проф.; Віталій Волошин², к.т.н., доц.; Валерій Буховець², к.т.н.

¹Державний університет «Житомирська політехніка», Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЗАТИСКНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ З ІНТЕГРОВАНИМИ ПРУЖИННИМИ ПРИВОДАМИ ЗАТИСКУ

Анотація. Наведено розроблені малогабаритні конструкції швидкодіючих затискних пристроїв з інтегрованими пружинними приводами затиску та стаціонарними гідравлічними приводами розтиску, що дозволяють підвищити ефективність процесу токарної обробки на верстатах з ЧПК. На основі теоретичних досліджень встановлено вплив їх конструктивних та експлуатаційних параметрів на силові характеристики, а також на значення питомих тисків в зонах контакту сегментної затискної цанги.

Ключові слова. Затискний пристрій, токарна обробка, привод затиску, ефективність, силова характеристика

Ihor Lutsiv, Vitalij Voloshyn, Valeriy Buhovets

CLAMPING DEVICES FOR TURNING WITH INTEGRATED SPRING CLAMPING DRIVES

Abstract. Small-sized high-speed clamping devices with integrated spring clamping drives and stationary hydraulic clamping drives are presented, which increase the efficiency of the turning process on CNC machines. Based on theoretical studies, the influence of their design and operational parameters on the power characteristics and the specific pressures in the contact zones of the segmented clamping collet has been established.

Keywords. Clamping device, turning, clamping drive, efficiency, force characteristic

Сучасні технологічні системи для токарної обробки повинні забезпечувати високу продуктивність за умови відповідної точності та якості оброблюваних поверхонь [1]. У зв'язку із цим забезпечення скорочення часу обробки стає одним із важливих завдань. Продуктивність токарної обробки на сучасних токарних верстатах з ЧПК визначається їхніми структурними характеристиками та різальним інструментом, а також ступенем інтеграції між верстатом, заготовкою та інструментом. Тому важливу роль відіграє швидкодія затискного пристрою, встановленого на шпинделі токарного верстата з ЧПК, який також має забезпечувати точний і стабільний затиск заготовки [1, 2]. У зв'язку з цим розроблення швидкодіючих затискних пристроїв з автоматизованими функціями та інтегрованими приводами затиску для надійного затиску заготовок, які зможуть підвищити ефективність процесу токарної обробки шляхом максимального скорочення часу налагодження та затиску заготовок (в тому числі і без зупинки шпинделя), є актуальною науково-практичною задачею.

Проведений аналіз конструкцій затискних пристроїв для токарної обробки показав, що вони можуть мати інтегровані в корпус пневматичні та гідравлічні приводи затиску, що живляться робочим середовищем від розподільних кілець під час зупинки шпинделя [1, 3]. Також на ринку затискного оснащення пропонуються затискні пристрої з інтегрованими в їх корпус пружинними приводами затиску і пневматичними або гідравлічними циліндрами для розтиску [4]. Суттєвим недоліком затискних пристроїв із такими приводами є наявність пристроїв для підводу робочого середовища, які в процесі обертання затискного пристрою із ним контактують.

Цього недоліку немає у розроблених затискних пристроях з інтегрованими пружинними приводами затиску та стаціонарними гідравлічними приводами розтиску,

які призначені для забезпечення зовнішнього затиску заготовок. Їх перевагами є малі радіальні габарити, простота конструкції, можливість працювати на високих частотах обертання та можливість деяких із них здійснювати затиск (розтиск) в процесі обертання шпинделя.

На рис. 1,а приведений цанговий затискний пристрій з інтегрованим пружинним приводом затиску та вмонтованим у шпиндельну бабку гідравлічним приводом розтиску. Затиск прутка відбувається від пружинного приводу, що складається з пакетів тарілчастих пружин 6, які через штоки 5, втулку 2 із гайкою 3 переміщують в осьовому напрямку затискну цангу 4, що встановлена у конічному отворі корпусу 1. Розтиск здійснюється від гідравлічного циліндра 7, змонтованого на передньому торці шпиндельної бабки, шляхом переміщення плунжерів 8, які переміщують рухому втулку 2 із гайкою 3, стискаючи пакет тарілчастих пружин 6.

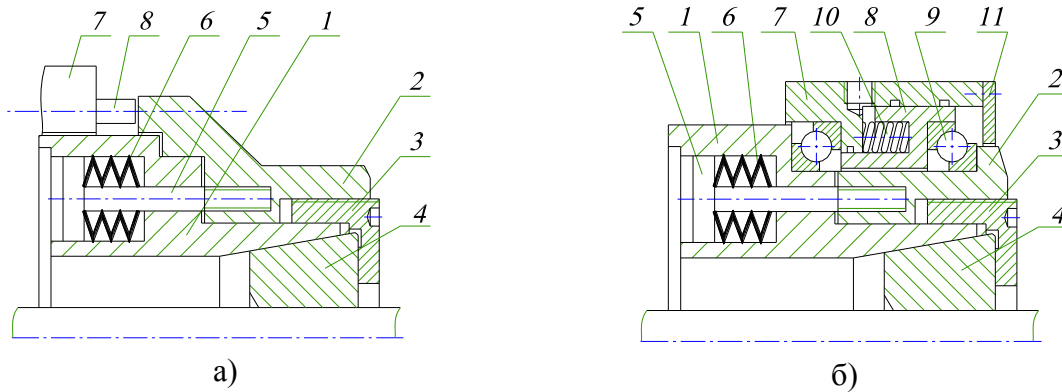


Рисунок 1 – Затискні пристрої цангового типу для токарної обробки з інтегрованими пружинними приводами затиску та гідравлічними приводами розтиску

На відміну від затискних пристроїв, які вимагають зупинки шпинделя під час затиску-розтиску, розроблений цанговий затискний пристрій, приведений на рис. 1,б, можна використовувати під час обертання шпинделя, що скорочує допоміжний час. Затиск прутка відбувається від пружинного приводу так само, як у затискному пристрої зображеному на рис.1,а. Розтиск здійснюється від жорстко приєднаного до шпиндельної бабки необертового гідравлічного циліндра, який складається з корпусу 7 та поршня 8, встановлених на упорно-радіальних підшипниках 9.

Шляхом теоретичних досліджень встановлено силові характеристики розроблених затискних пристроїв залежно від конструктивних та експлуатаційних параметрів.

На основі розробленої розрахункової схеми передачі сил при затиску розроблено математичну модель для визначення сили затиску в статиці та процесі усталеного обертання. В результаті теоретичних досліджень встановлено вплив на сумарну статичну радіальну силу затиску заготовки коефіцієнтів тертя в стиках затискного пристрою, кута конуса сегментної цанги та осьової сили пружинного приводу затиску. Збільшення коефіцієнта тертя між конусною поверхнею корпусу цангового патрона та сегментами затискної цанги від 0,1 до 0,15 призводить до зменшення сумарної радіальної сили затиску у 1,51 раз при куті конуса сегментної цанги 15°. При збільшенні кута нахилу сегментної цанги від 10° до 15° сумарна максимальна статична радіальна сила затиску зменшується у 1,36 раза.

Результати моделювання сумарної динамічної радіальної сили затиску заготовки від частоти обертання затискного пристрою при різних осьових силах пружинного приводу затиску наведені на рис. 2. За його результатами встановлено, що збільшення частоти обертання від 0 до 4000 об/хв призводить до зменшення сумарної динамічної радіальної сили затиску у 1,26 раз при $S_{\Sigma max} = 9$ кН та у 2,5 рази при $S_{\Sigma min} = 3$ кН.

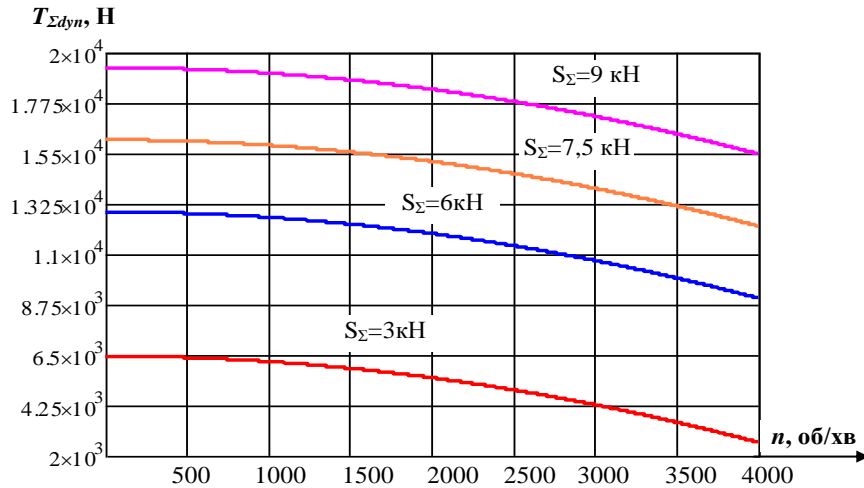


Рисунок 2 – Графічні залежності сумарної динамічної радіальної сили затиску $T_{\Sigma dyn}$ від частоти обертання затискного пристрою n при різних осьових силах пружинного приводу затиску S_{Σ}

На основі розроблених розрахункових схем розроблено математичні моделі для визначення питомих тисків в зоні контакту заготовки та конусної поверхні корпусу із сегментами затискної цанги в статиці. Отримані результати моделювання показують, що із збільшенням діаметра затиску від 20 до 52 мм питомий тиск на зовнішній поверхні заготовки зменшується у 2,6 рази. Максимальний питомий тиск на зовнішню поверхню заготовки одного сегменту затискної цанги становить 9,66 МПа при мінімальному діаметрі затиску 20 мм та максимальній радіальній силі затиску, що припадає на один сегмент, яка становить 7 кН.

За проведеними теоретичними дослідженнями розподілу питомого тиску по конічній поверхні сегменту затискної цанги від осьової сили приводу затиску встановлено, що максимальний питомий тиск буде виникати на ділянці конічної поверхні із мінімальним радіусом, а мінімальний – на ділянці конічної поверхні із максимальним радіусом. Для розробленої конструкції цангового затискного пристрою з інтегрованим пружинним приводом затиску (рис. 1,б) максимальний питомий тиск становить 1,42 МПа, який у 1,43 рази більший за мінімальний.

Перелік посилань

1. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: Монографія/ Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, О.В. Шевченко, В.Н. Волошин. – К.: – Тернопіль: Терно-граф, 2011. – 692 с.
2. Lutsiv I. Computer simulation of clamping jaws with elastic compensating links for thin-walled parts clamping/ I. Lutsiv, V. Voloshyn, I. Los. // Professional studies: Theory and Practice. – 2021 – №9(24) – pp. 70-74.
3. Pneumatic/hydraulic front-end chucks. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.smwautoblok.com/us/en/catalogs/turning/pneumatic-hydraulic-front-end-chucks-control-units/>.
4. FB6-20 Full bore mechanical grip, air released chuck [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.lexairinc.com/machine-tool/chucks/fb6-20>.

УДК 621.313:621.314

Володимир Нерубацький, к.т.н., доц.

Український державний університет залізничного транспорту, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТЕПЛОВОЗА НА РЕЖИМИ ЙОГО РОБОТИ ЗАСОБАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. У роботі досліджено вплив параметрів системи керування тяговим асинхронним електроприводом тепловоза на режими його роботи із застосуванням математичного моделювання. Встановлено закономірності зміни тягових та енергетичних характеристик при варіюванні параметрів керування та обґрунтовано підходи до їх раціонального вибору.

Ключові слова: тяговий електропривод, тепловоз, система керування, математичне моделювання, режими роботи, енергоефективність.

Volodymyr Nerubatskyi

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CONTROL SYSTEM PARAMETERS OF A LOCOMOTIVE TRACTION INDUCTION DRIVE ON ITS OPERATING MODES USING MATHEMATICAL MODELING

Abstract. The paper investigates the influence of control system parameters of a locomotive traction induction drive on its operating modes using mathematical modeling. Regularities in the variation of traction and energy characteristics under changes in control parameters are established, and approaches to their rational selection are substantiated.

Keywords: traction electric drive, locomotive, control system, mathematical modeling, operating modes, energy efficiency.

Сучасні тенденції розвитку тягового рухомого складу залізничного транспорту пов'язані з широким впровадженням асинхронних тягових електроприводів, які забезпечують підвищену енергоефективність, надійність та гнучкість керування порівняно з традиційними системами [1–3]. Водночас ефективність функціонування таких приводів значною мірою визначається параметрами системи керування, зокрема налаштуваннями регуляторів, алгоритмами формування керуючих сигналів та характеристиками силових перетворювачів [4, 5]. У цьому контексті актуальним є дослідження впливу варіювання параметрів системи керування на режими роботи тепловоза з метою підвищення його техніко-економічних показників. Додатково слід зазначити, що зростання вимог до енергоефективності та екологічності рухомого складу обумовлює необхідність більш точного налаштування систем керування, що безпосередньо впливає на витрати палива та ресурс основних вузлів тепловоза.

У роботі розглянуто математичну модель тепловоза з асинхронним тяговим електроприводом, яка включає підсистеми тягового асинхронного двигуна, автономного інвертора напруги, системи керування з регуляторами струму та швидкості, а також механічної частини поїзда. Модель побудована на основі рівнянь електромагнітних процесів в асинхронному двигуні в обертовій системі координат та доповнена описом алгоритмів векторного керування. Такий підхід дозволяє адекватно відтворювати як усталені, так і перехідні режими роботи тягового електроприводу. Крім того, модель враховує вплив зовнішніх збурень, зокрема змін навантаження та параметрів колійного профілю, що дозволяє підвищити достовірність отриманих результатів моделювання. Особливу увагу приділено аналізу впливу параметрів системи керування, зокрема коефіцієнтів підсилення та інтегрування регуляторів,

частоти широтно-імпульсної модуляції інвертора, а також параметрів фільтрації сигналів зворотного зв'язку. Варіювання зазначених параметрів у процесі моделювання дозволило встановити закономірності зміни тягових та енергетичних характеристик тепловоза. Зокрема, показано, що збільшення коефіцієнтів підсилення регуляторів струму сприяє покращенню швидкодії системи, однак може призводити до виникнення коливальних процесів та підвищення втрат енергії. Водночас оптимізація параметрів регулятора швидкості забезпечує зменшення перерегулювання та підвищення плавності розгону поїзда. Окремо встановлено, що вибір частоти широтно-імпульсної модуляції суттєво впливає на рівень гармонічних спотворень струмів та додаткові втрати в електричних машинах. Також показано, що параметри фільтрації сигналів зворотного зв'язку визначають компроміс між швидкістю системи та її стійкістю до вимірювальних завад. Результати моделювання свідчать, що раціональний вибір параметрів системи керування дозволяє досягти суттєвого покращення експлуатаційних показників тепловоза, зокрема зниження питомих витрат енергії, зменшення динамічних навантажень у тяговому приводі та підвищення стабільності роботи в умовах змінного профілю колії та навантаження. Встановлено, що узгоджене налаштування параметрів регуляторів та алгоритмів керування є ключовим фактором забезпечення ефективної роботи асинхронного тягового електроприводу.

Таким чином, застосування засобів математичного моделювання дозволяє комплексно дослідити вплив параметрів системи керування на режими роботи тепловоза та обґрунтувати рекомендації щодо їх оптимізації. Отримані результати можуть бути використані при розробці та вдосконаленні систем керування сучасних тепловозів з асинхронним тяговим електроприводом з метою підвищення їх енергоефективності та надійності в експлуатації. Перспективним напрямом подальших досліджень є розширення моделі з урахуванням адаптивних та інтелектуальних алгоритмів керування, що дозволить підвищити ефективність роботи тепловоза в умовах невизначеності та змінних експлуатаційних факторів.

Перелік посилань

1. Nerubatskyi V. P. Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2025. Том 30, № 4. С. 3–21. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i4.351425>.

2. Нерубацький В. П. Аналіз експлуатаційної надійності безколекторних тягових двигунів локомотивів. Тези 3-ї міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології засобів транспорту» (Харків, УкрДУЗТ, 03–04 грудня 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 11–13.

3. Нерубацький В. П. Моніторинг технічного стану безколекторних тягових двигунів завдяки залученню цифрових технологій сьогодення. Тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, УкрДУЗТ, 24–26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 81–83.

4. Panchenko S. V., Babaiev M. M., Nerubatskyi V. P. Analysis of the efficiency of operation of modern control systems for brushless traction motors. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2025. Вип. 214. С. 181–200. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352044>.

5. Нерубацький В. П. Огляд технологічних рішень підвищення енергоефективності роботи безколекторних тягових двигунів локомотивів. Збірник матеріалів XI міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'2025» (Київ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 18–20 листопада 2025 р.). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025. С. 118–119.

УДК 624.072.014.2

Микола Підгурський¹, д.т.н., проф.; Наталія Макаренко², д.т.н., проф.; Микола Сташків¹, к.т.н., доц.; Іван Підгурський¹, к.т.н., доц.; Денис Биків¹, Віталій Сенчишин¹

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

²Донбаська державна машинобудівна академія, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ НАВКОЛО ПІДСИЛЕНИХ ОТВОРІВ В ПРИОПОРНІЙ ЗОНІ ПЕРФОРОВАНИХ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК

Анотація. Моделюванням за допомогою МСЕ визначені місця з максимальними еквівалентними напруженнями у перфорованих сталевих двотаврових балках. Наведені методи підсилення приопорних ділянок та визначено які з них ефективніше зменшують напруження навколо отворів.

Ключові слова: перфоровані балки, підсилення отворів, еквівалентні напруження

Mykola Pidgurskyi, Nataliia Makarenko, Mykola Stashkiv, Ivan Pidgurskyi, Denys Bykiv, Vitalii Senchyshyn

INVESTIGATION OF STRESSES AROUND REINFORCED OPENINGS IN THE SUPPORT ZONE OF PERFORATED I-BEAMS

Abstract. Using the finite element method (FEM), the regions of maximum equivalent stresses in perforated steel I-beams were identified. Methods for strengthening the support zones were presented, and their effectiveness in reducing stresses around the openings was evaluated.

Keywords: perforated beams, opening reinforcement, equivalent stresses

Перфоровані двотаврові балки широко застосовуються у багатьох сферах інжинірингу (машинобудуванні, суднобудуванні, будівництві, приладобудуванні, тощо). Завдяки різним методам їх виготовлення вони можуть мати меншу вагу і бути ефективнішими за суцільні балки такого ж перерізу [1, 2].

Для деяких сфер найголовнішим показником є зменшення ваги конструкції, тому при виготовленні отворів безпосередньо в стінці балки їх загальна ефективність збільшується (відношення міцності/жорсткості до ваги), при цьому значення напружень і прогинів зростають у порівнянні з суцільною балкою.

В інших сферах перфоровані балки застосовують для збільшення характеристик міцності та жорсткості конструкцій, що досягається збільшенням висоти самого перерізу балки. У цьому випадку прогини та напруження в полицях двотавра зменшуються (в порівнянні із первісною балкою), проте напруження навколо отворів можуть суттєво зрости в декілька разів в порівнянні із напруженнями в полицях. Тому саме навколо отворів виникають пластичні деформації та тріщини.

Так, у роботі (Романюка В. та ін., 2024) [3] досліджені напруження, що виникають навколо отворів перфорованих аркових балок із поперечною затяжкою. Встановлено, що напруження навколо отворів безпосередньо біля кріплення затяжки є максимальними, а встановлення ребер жорсткості чи заварювання даних отворів покращують експлуатаційні властивості конструкції.

У роботі (Zeutinci V. M. та ін. 2021) [4] виконано дослідження напружено-деформівного стану в нелінійній постановці для перфорованих сталевих балок із підсиленими круглими отворами. Визначено зсувну та нормальну міцність балок для трьох типів перфорації із підсиленням.

У роботі (Підгурського М. та ін., 2026) [5] розглянуто розподіл еквівалентних напружень навколо отворів у сталевих перфорованих двотаврових балках. Виявлено,

що застосування «вут» зменшують напруження навколо крайніх отворів. Проте для інших отворів напруження залишаються такими ж, як і для випадку без «вут», а подекуди і більшими.

У даній роботі проведено чисельне моделювання перфорованих балок в програмному комплексі ANSYS методом скінченних елементів із дослідженням еквівалентних напружень у балках та навколо отворів. Середній розмір скінченного елемента становив 20 мм.

Досліджено три варіанти балок: горизонтальні, двосхилі з ухилом 5° та аркові (з відповідним підйомом як у двосхилих) за граничних умов – жорстке защемлення обох країв балок із розпором. Перфоровані балки отримано методом зигзагоподібного розрізання двотавра вздовж стінки та послідовного зварювання виступів двох частин. За початкову балку прийнято двотавр ІРЕ 400, отвори перфорації круглі з діаметром 518 мм та кроком 570 мм. Загальна висота перфорованої балки становила 657,6 мм. Моделювались балки довжиною 24 м при рівномірно розподіленому навантаженні 6,6 кН/м.

Оскільки найбільших напружень зазнають три перші отвори перфорації, то в роботі досліджено підсилення саме крайніх отворів. Розглядалось підсилення одиничного отвору та комбінацій отворів. Для підсилення використано два методи: 1-й – повне заварювання отвору пластиною відповідного діаметру товщиною 8,6 мм, що відповідає товщині стінки двотавра та 2-й – обварювання отвору трубчастою обоймою відповідного діаметра, шириною 58 мм, що утворює виступи по обидва боки стінки на 25 мм. Товщина трубчастої обойми – 5 мм (мінімальна товщина труби для діаметру відповідного сортаменту).

На рисунку 1 представлені поля напружень навколо крайніх отворів перфорації горизонтальних, двосхилих та аркових балок без підсилення та з підсиленням заварюванням чи круглою обоймою.

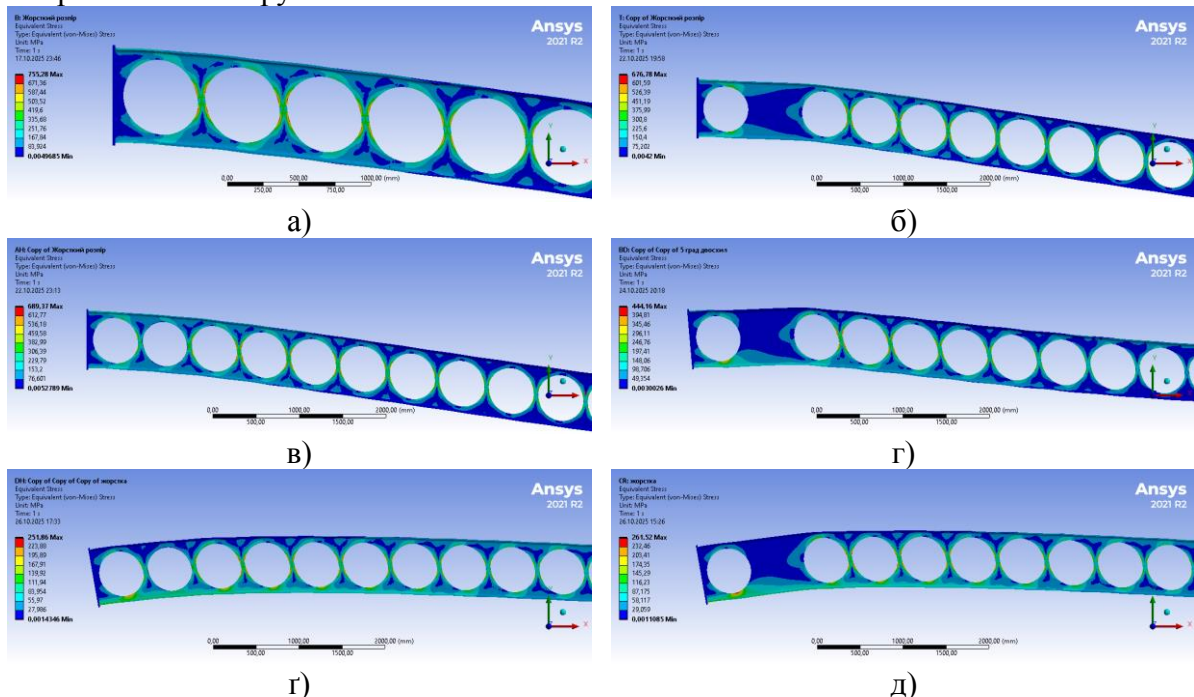


Рисунок 1 – Поля напружень в перфорованих балках навколо крайніх отворів:
 а) – горизонтальна без підсилення; б) – горизонтальна із заварюванням 2-го отвору; в) – горизонтальна із обоймою навколо 2-го отвору; г) – двосхила із заварюванням 2-го отвору; ґ) – аркова із обоймою навколо 2-го отвору; д) – аркова із заварюванням 2-го отвору

На рисунку 2 представлено діаграми зміни максимальних напружень навколо отворів вздовж балок (на рис. 2 (а) представлені результати напружень до середини балки, на рис. 2 (б-д) представлені результати до 8-го отвору включно, оскільки інші зазнають мінімальних змін). Варто зазначити, що у процесі чисельного моделювання в зонах навколо перфорацій отримано еквівалентні напруження, що перевищують границю текучості сталі, що зумовлено значною концентрацією напружень та особливостями скінчено-елементного аналізу. Отримані результати мають порівняльно-аналітичний характер і використовувались насамперед для оцінки ефективності різних способів підсилення перфорованих балок.

Для всіх видів балок заварювання одного отвору збільшувало вагу балки на 1,9%, двох – на 3,7%, трьох – на 5,5%, тоді як обрамлення одного отвору обіймою збільшувало вагу на 0,5%, двох – на 1,0% , трьох – на 1,5%.

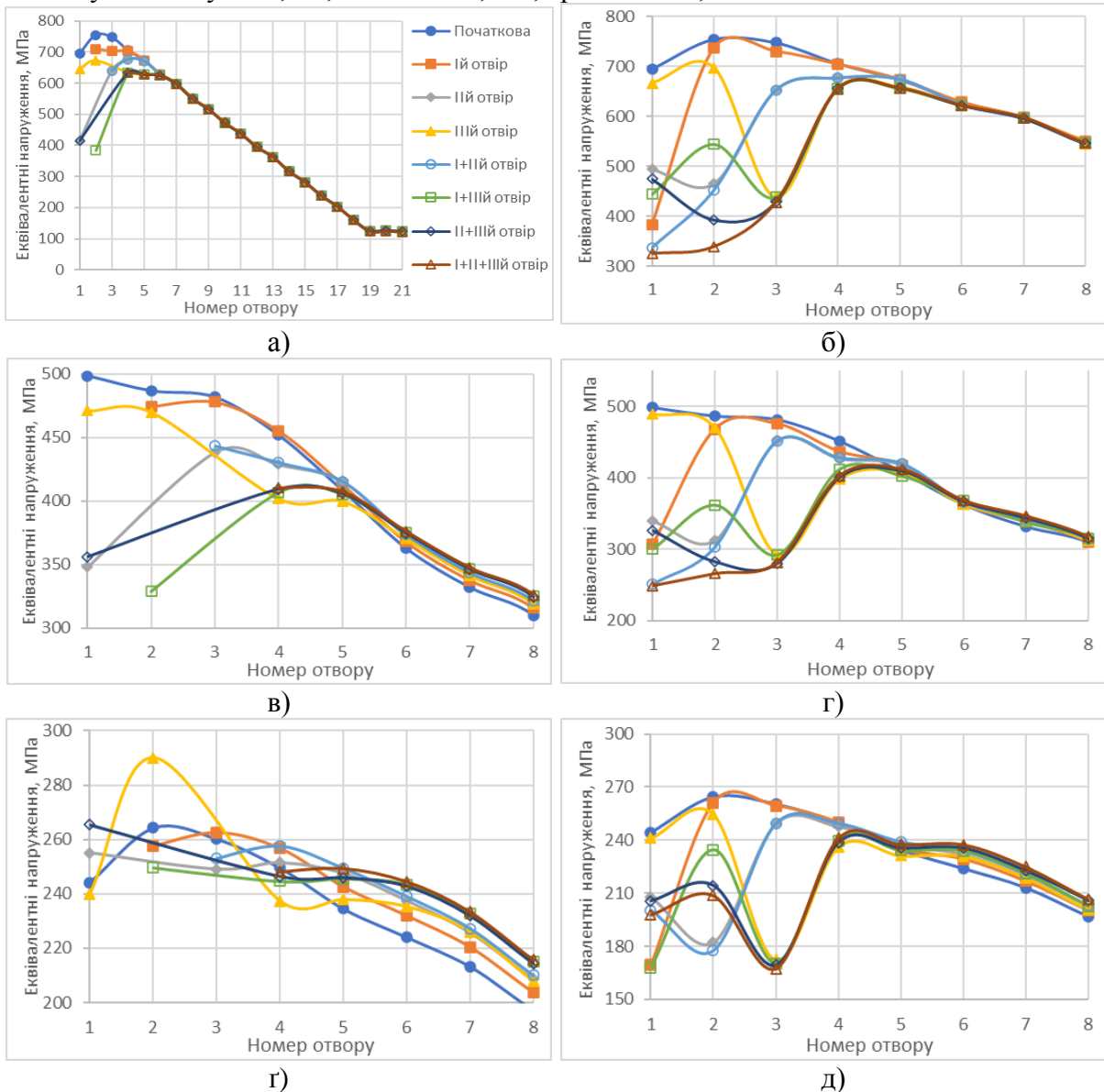


Рисунок 2 – Зміна максимальних значень еквівалентних напружень навколо отворів перфорації при їх підсиленні:

- а) – горизонтальна балка із заварюванням; б) – горизонтальна із обіймою; в) – двосхила балка із заварюванням; г) – двосхила із обіймою; д) – аркова балка із заварюванням; е) – аркова із обіймою

Для горизонтальних балок встановлено, що найбільш ефективним способом підсилення при заварюванні (див. рис. 2(а)) є одночасне заварювання I та III отворів або II та III отворів, що забезпечує зменшення максимальних еквівалентних напружень до 16,0% при збільшенні маси балки на 3,7%. При цьому заварювання лише III-го отвору дозволяє знизити напруження на 11,1% при мінімальному збільшенні ваги на 1,9%. Обрамлення отворів круглою обоймою (див. рис. 2(б)) виявилось більш раціональним з точки зору матеріалоемності, оскільки підсилення двох отворів (а саме I і II) забезпечує зниження напружень до 13,1% при збільшенні ваги лише на 1,0%.

Для двосхилих балок отримано найбільшу ефективність при комбінованому підсиленні двох отворів. Заварювання I та III отворів (див. рис. 2(в)) забезпечує зменшення максимальних напружень на 18,4%, тоді як обрамлення II та III отворів (див. рис. 2(г)) круглою обоймою знижує напруження на 17,8% при збільшенні ваги балки лише на 1,0%. Встановлено, що підсилення трьох отворів не забезпечує суттєвого додаткового ефекту у порівнянні з підсиленням двох, однак супроводжується помітним збільшенням матеріаломісткості.

Для аркових балок ефективність заварювання отворів (див. рис. 2(г)) виявилась значно нижчою. Максимальне зниження напружень при заварюванні трьох отворів становить лише 5,6% при збільшенні ваги балки на 5,5%. Крім того, заварювання окремих отворів у деяких випадках призводить до зростання напружень, зокрема заварювання III-го отвору викликало збільшення напружень на 9,7%. Натомість підсилення круглими обоймами (див. рис. 2(д)) показало кращу ефективність: обрамлення II та III отворів забезпечило зниження максимальних напружень на 9,7% при збільшенні ваги балки лише на 1,0%.

Встановлено, що обрамлення отворів круглими обоймами є більш ефективним способом локального підсилення перфорованих балок порівняно із заварюванням, оскільки забезпечує близький або співставний рівень зниження напружень при значно меншому збільшенні маси конструкції. Найбільш раціональним є підсилення двох приопорних отворів, тоді як підсилення трьох отворів у більшості випадків не покращує НДС конструкції при збільшенні матеріаломісткості. Важливо зазначити, що безконтрольне заварювання отворів в деяких випадках може погіршити характеристики міцності конструкції.

Перелік посилань

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. Методи виготовлення сталевих перфорованих двотаврових балок з регулярно та нерегулярною структурою отворів / Денис Биків, Андрій Кос, Олег Підлужний, Іван Підгурський, Микола Підгурський // Матеріали I МНТК „Прикладна механіка“, 6-7 червня 2024 р. — Т. : ТНТУ, 2024. — С. 76–79.
3. Romaniuk V., Bezniuk L., Supruniuk V., Kononchuk O., Meshcheryakova O., Sorochak A. (2024) Features of the work of continuous perforated beams near intermediate supports. *Procedia Structural Integrity* 59, 471–478.
4. Zeytinci B., Sahin M., Güler M., Tsavdaridis K. (2021) A practical design formulation for perforated beams with openings strengthened with ring-type stiffeners subject to Vierendeel actions. *Journal of Building Engineering* 43, 102915.
5. Pidgurskyi M., Bykiv D., Pidgurskyi I., Stashkiv M., Senchyshyn V., Pidlyzhnyi O., Kos A. (2026) Assessment of the Stress-Strain State around Circular Openings in Double-Pitched and Arched Perforated Beams. *Procedia Structural Integrity* 81, 439-446.

УДК 621.9.04

Роман Рогатинський, д.т.н., проф.; Андрій Дячун, к.т.н., доц.; Тарас Пелешок, к.т.н.; Павло Леськів; Владислав Пеншонько

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ХОЛОДНОГО НАВИВАННЯ СПІРАЛЕЙ ШНЕКІВ НА РЕБРО

Анотація. Розглядається процес навивання спіралей шнеків на оправу на ребро у щільний пакет із подальшим розтягуванням витків на крок та калібруванням на валу. Визначено технологічні похибки розмірів, а саме кроку, зовнішнього та внутрішнього діаметрів витків, з урахуванням виробничих допусків заготовки, оправки та вала. Виведено математичну залежність для оцінки похибки кроку за умови пропорційного розподілу похибок розтягу та калібрування та полів допусків оправки та вала.

Ключові слова. Гвинтові конвеєри, навивання спіралей на ребро, похибки кроку, оправка, калібрування витків.

Roman Rogatynskyi, Andrii Diachun, Taras Peleshok, Pavlo Leskiy, Vladyslav Penionschko

ENSURING THE ACCURACY OF EDGEWISE COLD COILING OF SCREW CONVEYOR FLIGHTS

Abstract. The paper considers the technological process of edgewise winding of flights onto a mandrel into a tight pack, followed by stretching the turns to the required pitch and calibrating them during assembly directly on the shaft. Technological dimensional errors, including pitch, as well as the outer and inner diameters of the turns, are determined for each operation, taking into account manufacturing tolerances of the blank, mandrel, and shaft.

Keywords: screw conveyor flights, edgewise winding, pitch error, mandrel, turns calibration.

Шнекові робочі органи широко використовуються у сільськогосподарському машинобудуванні, переробній та буровій галузях. Функціональна придатність та ефективність їх роботи безпосередньо залежать від геометричної точності спіралей шнеків. Традиційні методи виготовлення часто призводять до значних похибок кроку та діаметрів через пружну післядію матеріалу при виготовленні. Найбільш точним та малоенергоємним є метод холодного навивання спіралей на ребро на оправу в щільний пакет з подальшим його розтягуванням на крок та калібруванням при встановленні на вал. А тому, дослідження формування та розподілу похибок формоутворення з урахуванням допусків оправки та вала, а також обґрунтування математичних залежностей для їх оцінки, є актуальним науково-прикладним завданням для забезпечення заданої точності гвинтових робочих органів.

Метою дослідження є розробка моделі технологічного забезпечення точності виготовлення гвинтових робочих органів, зокрема спіралі шнека при її навиванні на вал, подальшому розтягу на крок та встановленні на вал.

Типовий технологічний процес виготовлення спіралей шнеків методом перервного холодного навивання на оправці передбачає такі операції: розрізування штаб (смуг) на мірні заготовки та формування кінця для її закріплення на оправці; навивання суцільного пакету витків на оправку діаметром d_{on} , розтягування витків на крок T_0 , калібрування витків на валу діаметром d_0 з кроком T і внутрішнім діаметром $d \rightarrow d_0$. При цьому на всіх операціях нагромаджуються похибки

виготовлення та позиціонування, а тому досягнення необхідного рівня точності заданих параметрів є однією із вирішальних умов технологічної надійності процесу.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що внутрішній діаметр d_1 щільного пакету витків зв'язаний із параметрами спіралі $D \times d \times T$ при його розтягуванні залежністю:

$$d_1 = 2B(1 - 0,022T/d)/(\psi - 1) , \quad (1)$$

де ψ - коефіцієнт нерівномірності витягування, $\psi = \sqrt{(\pi^2 D^2 + T^2)/(\pi^2 d^2 + T^2)}$; T, D , та d - відповідно, крок, зовнішній та внутрішній діаметри гвинтової спіралі; B - ширина штаби, $B = (D - d)/2$.

При навиванні щільних пакетів витків на оправку великого діаметру проходить пружне розкручування витків і збільшення їх внутрішнього діаметру після навивання та розкріплення. Теоретично величина пружного розкручування визначається на основі теореми про розвантаження. Якщо навивання проводиться тільки крутним моментом (чи силою із значним плечем прикладення згинальної сили) [1], то зміна кривини K_p нейтрального радіуса, який приймаємо рівним середньому радіусу витків, в результаті їх розкручування визначається як:

$$K_p = \frac{2}{d_{on} + B} - \frac{2}{d_1 + B} = \frac{M}{EI} , \quad (2)$$

де M - момент навивання; E - модуль пружності; I - момент інерції площі поперечного перерізу витка.

Дійсне значення внутрішнього діаметру витків після розкручування

$$d_1 = \frac{2(d_{on} + B)}{K_p(d_{on} + B) - 2} . \quad (3)$$

У випадку одночасного згину смуги моментом та осьювою силою розтягу для оцінки зміни кривини витків можна використовувати приведені значення моменту навивання. В результаті впливу різних технологічних факторів відбувається розсіювання значень кривини витків K_p , яке позначимо ΔK . Похибка оцінки внутрішнього діаметра Δd_1 щільного пакету витків після розвантаження з врахуванням похибки розсіювання кривини ΔK буде

$$\Delta d_1 = \Delta d_{on} + \Delta K(d_{on} + B)^2, \quad (4)$$

де Δd_{on} - похибка навитого витка від впливу оправки.

При щільному навиванні пакету витків похибку Δd_{on} можна прийняти рівною допуску виготовлення оправки $\Delta d_{on} = \delta d_{on}$. Похибка кривини залежить від схеми навивання і, в першому наближенні, визначається як $\Delta K = \Delta M / EI$. При розрахунку похибки виготовлення пакету основною складовою є похибка від пружного розкручування, а похибкою від виготовлення оправки можна нехтувати, оскільки вона на порядок менше.

Похибка $\Delta \psi$ визначення коефіцієнта нерівномірності витягування буде

$$\Delta \psi = \frac{2B}{d_1} \left(\frac{\Delta d_1}{d_1} + \frac{\delta B}{B} \right) , \quad (5)$$

де δB - допуск на ширину штаби, який, при виготовлення штаби відрізанням з листового металу, може бути суттєвим.

Похибки $\Delta \psi$ коефіцієнту нерівномірності витягування трансформуються, відповідно, у похибки діаметру спіралі Δd та похибки кроку ΔT . Похибка по

зовнішньому діаметру $\Delta D = \Delta d + \delta B$. Для каліброваних штаб, із малим допуском на ширину, $\Delta d \gg \delta B$ і можна прийняти, що $\Delta D = \Delta d$. В технічних вимогах на виготовлення гвинтових робочих органів назначають допуски на крок T спіралі та зовнішній діаметр витків D . Технологічно, при виготовленні витків із сформованим параметром ψ , розміри зв'язані функціональною залежністю

$$\pi^2 D^2 + T^2 = \psi^2 [\pi^2 (D - 2B)^2 + T^2]. \quad (6)$$

В процесі розтягування, зміна похибки одного із біжучих параметрів T чи D при автоматично призводить до зміни іншого у співвідношенні

$$\lambda_\Delta = \Delta T / \Delta D = \pi^2 [D - \psi^2 (D - 2B)] / [T(\psi^2 - 1)]. \quad (7)$$

Тому, при оцінці точності технологічного процесу виготовлення гвинтових робочих органів, можна визначити можливі похибки тільки по одному (незалежному) параметру спіралі, наприклад кроку, що отримується останнім і є завершальною ланкою просторового розмірного ланцюга. Нехтуючи факторами, вплив яких несуттєвий, із врахуванням (7) виведена залежність оцінки впливу похибок обробки на поле розсіювання величини кроку ΔT :

$$\Delta T = \frac{T}{\sin^2 \alpha} \left\{ \left[\frac{\Delta d_1 (\psi - 1)}{2B} + \frac{\delta B}{B} \right] \frac{\psi}{\psi + 1} + \frac{\Delta d \cos^2 \alpha}{d} \left[1 + \frac{2B}{d (\psi^2 - 1)} \right] \right\}, \quad (8)$$

де α_d - кут підйому витка по внутрішньому діаметру, $\text{tg} \alpha_d = T / (\pi d)$.

Дана залежність включає як похибки на внутрішній діаметр щільно навитого пакету при його виготовленні так і похибки внутрішнього діаметру витягнутих і прикріплених до валу витків, а також допуск на ширину штаби, навитої на ребро.

Проведені дослідження показали, що при навиванні на типовому обладнанні надійність холодного процесу навивання рифів недостатньо висока. Так, для спіралей параметрами $T=180$ мм, $D=228$ мм, $d=168$ мм, виготовленої із штаби шириною 30 мм, залежність впливу технологічних факторів на похибку кроку прийме вигляд:

$$\Delta T = 6,4 \Delta d_1 + 32,9 \delta B + 13 \Delta d. \quad (9)$$

Тобто, для того, щоб досягти значення технологічного допуску $T = 180 \pm 4$ мм при пропорціональному розподілу поля допуску між складовими необхідно забезпечити: $\Delta d_1 = 0,56$ мм; $\delta B = 0,08$ мм, $\Delta d = 0,2$ мм, що, для випадку виготовлення великогабаритних шнеків досить складно. Із залежності (9) випливає, що найбільший вплив на похибку кроку мають значення допуску заготовки, менший - похибки позиціонування витої заготовки на валу і найменший - похибки, що виникають при навиванні суцільного пакету витків..

У роботі проведено комплексний аналіз технологічного процесу виготовлення спіралей шнеків методом холодного навивання на ребро та його розмірний аналіз. Встановлено закономірності формування похибок кроку, внутрішнього та зовнішнього діаметрів на кожній стадії виготовлення - від навивання щільного пакета на оправку до калібрування на валу. Запропонована математична залежність, яка дозволяє прогнозувати похибку кроку з урахуванням взаємного впливу полів допусків заготовки та похибок формоутворення, що забезпечує підвищення точності виготовлення та складання шнеків і підвищення їх якості.

Перелік посилань

1 Рогатинський Р. М. Особливості формування гвинтових та трубчатих профілів навиванням на циліндричній оправці / Р.М. Рогатинський, М.І. Пилипець, І.Г. Ткаченко, М.Д. П'єнтак, Т.М. Пелешок, П.О. Леськів. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 12(2). С. 196-203.

УДК 621.86

Володимир Савків к.т.н., доц., Петро Федорів, Ігор Федорів, Андрій Ландяк
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ПНЕВМО-СТРУМЕНЕВІ ПРИСТРОЇ ПОДАЧІ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ

Анотація. У роботі проведено аналіз процесу відділення та подачі листового матеріалу за допомогою пневмо-струменевих пристроїв подачі листового матеріалу, в основу роботи яких покладено принцип виникнення аеродинамічного ефекту притягання при витіканні із сопла струменя стиснутого повітря.

Ключові слова: пневмо-струменевий пристрій, аеродинамічний ефект притягання, листовий матеріал, транспортування, живильник.

Volodymyr Savkiv, Petro Fedoriv, Ihor Fedoriv, Andriy Landiak

PNEUMATIC-JET SHEET MATERIAL FEEDING DEVICES

Abstract. This paper analyzes the process of separating and feeding sheet material using pneumatic jet feeders, which operate on the principle of the aerodynamic suction effect generated when a jet of compressed air flows out of a nozzle.

Keywords: pneumatic jet device, aerodynamic suction effect, sheet material, transport, feeder.

Для поштучного відділення листової заготовки від стопи широко використовуються вакуумні захоплювальні органи з періодичними рухами і переключенням повітряних каналів [1, 2]. Вирівнювання листа в такому випадку виконується примусово в процесі подальшого транспортування за допомогою спеціальних механізмів, що значною мірою знижують продуктивність робочих машин. Ефективним способом поштучного відділення листового матеріалу та його транспортування є пневмо-струменеві пристрої, які відрізняються простотою конструкції та хорошими динамічними характеристиками [3].

В основу розроблених конструкцій струменевих пристроїв подачі листового матеріалу покладений ефект виникнення присмоктуючої дії, що виражається у взаємодії струменя стиснутого повітря, витікаючого з отвору малого діаметра, з поверхнею листа. У результаті подачі до сопла (рис. 1) стиснутого повітря постійного тиску сформований отвором-соплом радіусом r_c і спрямований перпендикулярно площині листа струмінь повітря протікає в щілину h між торцями струменевого елемента і заготовки зі швидкістю приблизно рівною місцевій швидкості звуку. Переломлюючись об поверхню листа повітря в щілині перетворюється в плоский радіальний потік. Швидкість плинину потоку на деякому радіусі r дещо менша швидкості витікання, а в міру наближення до периферії силового елемента поступово зменшується до швидкості, а надалі на радіусі r_2 відбувається повне розчинення в атмосфері. Енергія рухомого суцільного кільцевого газового потоку, обумовлена повним напором, що складається із суми п'єзометричного і динамічного напорів, викликає на торці струменевого елемента зниження тиску до величини нижче атмосферного - виникає аеродинамічний ефект притягання [2]:

$$P_a \geq \Delta P + \frac{\rho V_1^2}{2}, \quad (1)$$

Під його дією лист з відстані y_0 піднімається нагору і притискається до торця соплового елемента. Лист не знаходиться в безпосередньому дотику з торцем силового механізму, а вільно плаває на повітряній подушці автоматично підтримуючи зазор $h=0,08...0,12$ мм. Зусилля присмоктування залежить від схеми розподілу швидкостей і

тиску радіального суцільного потоку газу, обумовлених характером плинину до периферії сопла, де тиск дорівнює атмосферному.

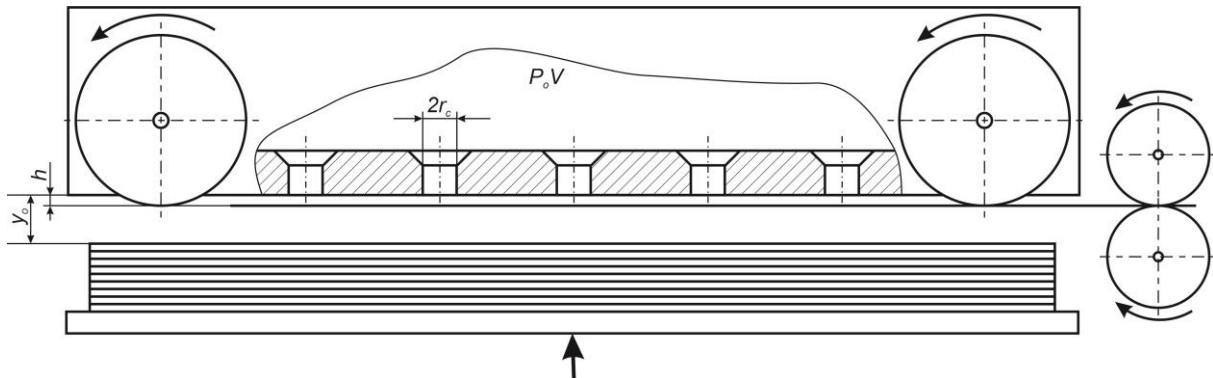


Рисунок 1 – Пневмо-струменевий пристрій подачі листового матеріалу

Основними елементами струменево-фрикційних живильників є самі струменеві елементи в поєднанні з постійно обертовими фрикційними дисками, які виступають нижче торців присосів на величину Δ максимальних виступів плоских заготовок, рівну 0,1...0,3 мм. У даному випадку регулювання продуктивності виконується фрикційними дисками і роликami, а орієнтація заготовки проходить на спеціальному струменевому столі вирівнювання.

За рахунок того, що процес притягання листа до торця струменевого присосу починає проявлятися при відстані y_0 , знижуються вимоги до точності синхронізації роботи машини та швидкості підйому стапельного стола. Нерухомі присоси та постійно обертові диски забезпечують високу продуктивність подачі листових заготовок до приймальних роликів робочої машини.

Час циклу струменево-фрикційних живильників неперервної подачі заготовок визначається сумою часу t_1 руху верхньої заготовки від стопи до периферії фрикційних дисків під дією присмоктуючої сили струменя, часу t_2 транспортування заготовки фрикційними дисками до приймальних роликів і часу t_3 транспортування роликami.

Дослідження підтвердили, що струменево-фрикційний живильник володіє хорошими динамічними характеристиками, простотою конструкції, високою швидкістю і відповідно більшою продуктивністю. Вагомою перевагою живильників даного типу є відсутність потреби в додаткових привідних механізмах для подачі листів до транспортуючих роликів, в даному випадку це здійснюється фрикційними дисками.

Перелік посилань

1. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя – 2008. 232 с.

2. Проць Я.І., Савків В.Б., Федорів П.С. Струменеві захоплюючі пристрої промислових роботів. Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя, Т-3 число 1, м. Тернопіль, 1998 р. с.44-48.

3. Дослідження конструкцій струменевих живильників листового матеріалу. Проць Я.І., Федорів П.С., Цяпута Ю.О., Сковчиляс В.В.// Технологія і техніка друкарства, КПІ, Київ – 2012 – № 1(35), с.123—129.

УДК 621.923.77:621.85

Андрій Сенік¹, к.т.н., доц.; Володимир Кобельник¹, к.т.н., доц.; Роман Лещук¹, к.т.н., доц.; Оксана Кобельник², к.т.н.

¹ Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

² Відокремлений структурний підрозділ «Тернопільський фаховий коледж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя», Україна

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ПРИВОДНИХ РОЛИКОВИХ ЛАНЦЮГІВ ШЛЯХОМ ФОРМУВАННЯ РЕГУЛЯРНИХ МІКРОРЕЛЬЄФІВ НА ЗГОРТНИХ ВТУЛКАХ МЕТОДОМ ВІБРООБКЮВАННЯ

Анотація. У роботі досліджено вплив мікрорельєфу поверхонь згортних втулок приводних ланцюгів на їх трибологічні характеристики та довговічність. Проаналізовано сучасні методи формування регулярних мікроструктур і обґрунтовано доцільність їх застосування. Встановлено, що регуляризація мікрорельєфу дозволяє підвищити зносостійкість та ефективність роботи шарнірних з'єднань.

Ключові слова: мікрорельєф, згортна втулка, приводний роликівий ланцюг, віброобкочування, регуляризація, трибологія.

Andrii Senyk, Volodymyr Kobelnyk, Roman Leshchuk, Oksana Kobelnyk
ENHANCING THE DURABILITY OF STANDARD ROLLER CHAINS BY FORMING REGULAR MICRORELIEFS ON JOINT BUSHINGS USING VIBRO-ROLLING METHOD

Abstract. The paper investigates the influence of the microrelief of the surfaces of the rolling bushings of drive chains on their tribological characteristics and durability. Modern methods of forming regular microstructures are analyzed and the feasibility of their application is substantiated. It is established that the regularization of the microrelief allows to increase the wear resistance and efficiency of the articulated joints.

Keywords: microrelief, rolled bushing, roller chain, vibration burnishing, tribology, wear resistance.

Привідні роликівий ланцюги широко застосовуються у транспортних, сільськогосподарських, металургійних, підйомно-транспортних та технологічних машинах завдяки високій надійності, компактності та здатності передавати значні навантаження. Одним із найбільш навантажених елементів ланцюгової передачі є шарнірне з'єднання типу «валик–втулка», у якому реалізуються процеси тертя ковзання, циклічного навантаження та зношування. Саме технічний стан згортної втулки значною мірою визначає ресурс роботи всього привідного ланцюга.

Відомо, що під час експлуатації у зоні контакту валика і втулки виникають високі питомі навантаження, які призводять до розвитку абразивного, адгезійного та втомного зношування. Особливо інтенсивно процеси руйнування проходять у випадку недостатнього змащування або при нерівномірному розподілі контактних напружень по поверхні контакту. Однією з основних причин такого явища є неоднорідність мікрорельєфу поверхонь, сформованого традиційними методами механічної обробки.

Традиційні технології обробки внутрішніх поверхонь згортних втулок, такі як розгортання, шліфування чи хонінгування, забезпечують досягнення заданої шорсткості, однак формують випадковий характер мікронерівностей. У результаті контакт між поверхнями відбувається переважно по окремих мікроступах, що викликає концентрацію контактних напружень та локальні перегріву. Це, у свою чергу, спричиняє порушення умов мащення, появу задирів і прискорене зношування шарнірів.

У працях П.Д. Кривого, С.А. Дубиняка та інших представників наукової школи ТНТУ показано, що одним із найбільш ефективних шляхів підвищення довговічності шарнірів приводних ланцюгів є створення регулярного мікрорельєфу поверхонь згортних втулок. Регулярний мікрорельєф дозволяє керовано формувати геометрію мікронерівностей, створювати сприятливі умови для утримання мастильного матеріалу та забезпечувати більш рівномірний розподіл навантаження по контактній поверхні.

Особливе значення мають дослідження, присвячені формуванню регулярних мікрорельєфів методом віброобкочування. У працях П.Д. Кривого та співавторів доведено, що віброобкочування дозволяє не лише формувати регулярні мікроструктури, а й зміцнювати поверхневий шар за рахунок пластичного деформування. Отриманий при цьому мікрорельєф характеризується високою маслomisткістю, підвищеною мікротвердістю та стабільністю трибологічних параметрів.

Важливий внесок у розвиток технологій керованого формування поверхневих структур здійснено В.О. Дзюрою, у працях якого досліджено закономірності зміцнення поверхневого шару деталей машин та встановлено вплив параметрів мікрогеометрії на експлуатаційні властивості поверхонь тертя.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності подальшого розвитку технологічних методів формування регулярних мікрорельєфів саме на згортних втулках приводних роликів ланцюгів із урахуванням особливостей їх роботи, характеру навантаження та умов змащування.

Метою роботи є підвищення довговічності приводних роликів ланцюгів шляхом формування регулярних мікрорельєфів на згортних втулках методом віброобкочування, що забезпечує покращення умов змащення, зниження контактних напружень та підвищення зносостійкості шарнірного з'єднання «валик–втулка».

Мікрорельєф поверхні визначає умови контакту, режим тертя та здатність поверхні утримувати мастильний матеріал. На відміну від випадкової шорсткості, регуляризований мікрорельєф характеризується впорядкованою геометрією мікронерівностей, що дозволяє керувати процесами тертя та зношування [2]. Згідно з дослідженнями [4], оптимізація мікрогеометрії сприяє більш рівномірному розподілу навантаження та зменшенню пікових контактних напружень.

Мікровпадини виконують функцію резервуарів мастила, забезпечуючи перехід від граничного до змішаного режиму тертя, що дозволяє знизити коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування [1]. Встановлено, що регулярний мікрорельєф може підвищити ресурс шарнірного з'єднання на 20–40 % [2].

Значний внесок у розвиток технологій формування регулярних мікрорельєфів зробили праці наукової школи ТНТУ під керівництвом П.Д. Кривого. У праці [3] досліджено закономірності утворення регулярних структур методом віброобкочування та встановлено вплив параметрів режиму обробки на відносну площу перекриття мікрорельєфу.

У роботі показано, що одним із найважливіших параметрів регулярного мікрорельєфу є ступінь перекриття, який визначається відношенням віброобкоченої площі до загальної площі поверхні. Встановлено, що підвищення ступеня перекриття забезпечує покращення маслomisткості поверхні, рівномірність розподілу навантаження та зростання зносостійкості контактних поверхонь.

Особливий інтерес для згортних втулок приводних ланцюгів становлять результати, пов'язані з формуванням зигзагоподібного регулярного мікрорельєфу. У статті наведено умови, за яких формується різна геометрія мікрорельєфу залежно від співвідношення кроку канавки tk до її ширини ρ . Встановлено три характерні режими формування структури: при $tk/\rho < 0,5$; $tk/\rho = 0,5$ та $0,5 < tk/\rho \leq 1$.

Саме другий режим забезпечує найбільш рівномірне перекриття поверхні та формування стабільної структури мікронерівностей.

У роботі також запропоновано конструкцію пристрою для формування регулярного мікрорельєфу методом віброобкочування, яка забезпечує стабільність зусилля деформування за рахунок використання гідравлічної системи та пружного навантаження. Принцип дії пристрою базується на поєднанні осциляційного руху віброобкатників і поздовжньої подачі заготовки, що дозволяє отримувати регулярні мікроканавки із заданими параметрами.

Аналіз побудованих авторами графіків показує, що зі збільшенням амплітуди коливань віброобкатника зростає площа поверхні, яка покривається регулярним мікрорельєфом. Іншими словами, чим більшими є коливання деформуючого елемента, тим щільніше мікроканавки перекривають поверхню деталі. При певних режимах обробки ступінь перекриття може наблизитися майже до 100%, тобто практично вся поверхня втулки покривається впорядкованим мікрорельєфом.

Для згортних втулок привідних роликів і втулкових ланцюгів це має особливо важливе значення, оскільки сформовані мікроканавки виконують роль мікрорезервуарів для мастильного матеріалу. Завдяки цьому мастило краще утримується у зоні контакту «валик–втулка», зменшується сухе тертя та забезпечується більш рівномірний розподіл навантаження по контактній поверхні. У результаті знижуються контактні напруження, сповільнюється процес зношування та підвищується довговічність шарнірного з'єднання.

Запропоновані у статті математичні моделі дозволяють визначати площу віброобкоченої поверхні залежно від ширини канавки, частоти осциляцій, подачі та амплітуди деформування. Отримані залежності можуть бути адаптовані для оцінки параметрів мікрорельєфу згортних втулок приводних ланцюгів.

Враховуючи специфіку роботи вузла «валик–втулка», застосування регулярного мікрорельєфу із підвищеним ступенем перекриття дозволяє знизити локальні контактні напруження, забезпечити більш стабільний режим мащення та підвищити ресурс роботи шарнірного з'єднання. Крім того, регулярні мікроканавки можуть виконувати функцію мікрорезервуарів для накопичення мастильного матеріалу, що особливо важливо в умовах граничного тертя.

У праці [5] додатково обґрунтовано, що ефективність регулярного мікрорельєфу значною мірою залежить від орієнтації мікроструктури відносно напрямку ковзання.

Орієнтований мікрорельєф забезпечує зниження зсувних напружень та покращує умови формування мастильного клина.

Сучасний розвиток технологій інженерії поверхні дозволяє формувати регулярні мікрорельєфи різними методами, які відрізняються фізичною природою впливу на матеріал, точністю формування структури та технологічною ефективністю.

Найбільш поширеними залишаються методи механічної обробки, зокрема шліфування, хонінгування та полірування. Вони забезпечують необхідний рівень шорсткості та геометричної точності поверхонь, однак не дозволяють формувати впорядковані мікроструктури. Отриманий мікрорельєф має випадковий характер, а напрямок мікронерівностей часто не відповідає напрямку ковзання у зоні контакту.

Більш перспективними є методи поверхневого пластичного деформування. До них належать роликоне накатування, алмазне вигладжування, віброобкочування та ультразвукове пластичне деформування. У процесі такої обробки поверхневий шар матеріалу зазнає локальної пластичної деформації без видалення матеріалу. Це дозволяє одночасно формувати регулярний мікрорельєф і зміцнювати поверхневий шар.

Особливий інтерес для згортних втулок приводних ланцюгів становить метод віброобкочування, який забезпечує формування регулярних мікроканалок із заданим кроком, глибиною та ступенем перекриття. Як показано у роботах П.Д. Кривого, віброобкочування дозволяє формувати мікрорельєфи з високою відносною площею перекриття, що позитивно впливає на утримання мастильного матеріалу та зменшення контактних напружень.

Лазерне текстурування є одним із найбільш високоточних способів формування регулярних мікрорельєфів. За допомогою лазерного променя на поверхні можуть формуватися мікроямки, канавки або комбіновані структури з високою точністю розташування. Основною перевагою методу є можливість керування геометрією мікроструктури, однак висока вартість обладнання обмежує його застосування у серійному виробництві приводних ланцюгів.

Електрохімічні методи базуються на локальному розчиненні матеріалу в електроліті. Вони забезпечують високу чистоту поверхні та відсутність механічних пошкоджень, проте мають обмежені можливості керування формою та орієнтацією мікрорельєфу.

Абразивно-струменеві методи дозволяють створювати розвинену мікрошорсткість за рахунок ударної дії абразивних частинок. Такі поверхні характеризуються високою масломісткістю, однак отриманий мікрорельєф має випадковий характер.

Аналіз існуючих технологій свідчить, що найбільш перспективними для згортних втулок приводних роликів ланцюгів є методи поверхневого пластичного деформування, зокрема віброобкочування, які забезпечують оптимальне поєднання зміцнення поверхні та формування регулярного мікрорельєфу.

Вибір методу визначається матеріалом, умовами навантаження та режимами змащування. Для згортних втулок зі сталі 40ХН найбільш доцільним є застосування методів пластичного деформування, які забезпечують оптимальне поєднання геометричної регулярності та зміцнення поверхні [4].

Раціональним є формування мікрорельєфу з орієнтацією елементів структури відповідно до напрямку ковзання, що дозволяє мінімізувати зсувні напруження та покращити утримання мастильного матеріалу [2].

Для оцінки умов тертя та ефективності утримання мастильного матеріалу використовується безрозмірний параметр змащування:

$$\lambda = h_{\min} / \sqrt{(R_{a1}^2 + R_{a2}^2)}.$$

де h_{\min} – мінімальна товщина мастильного шару між контактуючими поверхнями;
 R_{a1} та R_{a2} – середні арифметичні відхилення профілю поверхонь валика та втулки.

Даний параметр характеризує режим тертя у шарнірному з'єднанні приводного ланцюга. При $\lambda < 1$ реалізується режим граничного тертя, коли контакт між поверхнями відбувається переважно по вершинах мікронерівностей. У межах $1 < \lambda < 3$ формується змішаний режим тертя, а при $\lambda > 3$ створюються умови гідродинамічного мащення.

Формування регулярного мікрорельєфу сприяє накопиченню мастильного матеріалу у мікроканалках та мікробудинах, що забезпечує збільшення товщини мастильного шару h_{\min} і покращення умов мащення у зоні контакту.

Для оцінки напруженого стану у зоні контакту «валик–втулка» використовується залежність Герца для максимальних контактних напружень:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{(3 \cdot F \cdot E_{eg}) / (2 \cdot \pi \cdot b \cdot L)}.$$

де F – навантаження, прикладене до шарнірного з'єднання;
 E_{eg} – приведений модуль пружності контактуючих матеріалів;
 b – ширина контактної площадки;

L – довжина контакту між валиком і втулкою.

Із наведеного співвідношення видно, що величина контактних напружень суттєво залежить від площі фактичного контакту.

Формування регулярного мікрорельєфу забезпечує збільшення ефективної площі взаємодії поверхонь, що сприяє більш рівномірному розподілу навантаження та зменшенню локальних пікових напружень. У результаті знижується інтенсивність втомного руйнування поверхневого шару та підвищується довговічність шарнірного з'єднання приводного ланцюга.

Оптимальні параметри мікрорельєфу для втулок повинні становити $R_a = 0,4-1,2$ мкм [2]. Крок елементів структури доцільно вибирати в межах 10–50 мкм, а глибина мікропадин повинна забезпечувати накопичення мастила без зниження несучої здатності поверхні [5].

Для серійного виробництва доцільно застосовувати віброобробкування або роликкове накатування як найбільш економічно ефективні методи [4].

Формування регулярного мікрорельєфу є ефективним способом підвищення довговічності згортних втулок. Регуляризована структура забезпечує рівномірний розподіл навантаження, стабілізацію тертя та покращення умов змащування. Найбільш перспективними є методи пластичного деформування та комбіновані технології, обґрунтовані у працях Кривого П.Д. та Дзюри В.О.

Перелік посилань

1. Bhushan B. Introduction to Tribology. Wiley, 2013.
2. Kryvyi P.D., Kryvinskyi P., Vodnar V., Senyk A. Theoretical and experimental substantiation of angular orientation of rolling bushings. MSEC, 2007.
3. Кривий П.Д., Кашуба Н.П., Сенік А.А., Кривінський П.П. Формування на плоских поверхнях віброобробкуванням регулярного мікрорельєфа з підвищеним ступенем перекриття // Збірник наукових праць «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем». – Краматорськ: ДДМА, 2011. – Вип. 29. – С. 138–145.
4. Кривий П.Д., Сенік А.А. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищеної якості згортних втулок. Тернопіль: ТНТУ, 2018. 232 с.
5. Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль / В.О. Дзюра, П.О. Марущак. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. – 170 с.

УДК 621.9

Вадим Ступницький, д.т.н., проф.; Тарас Оленюк

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАМІНИ ОПЕРАЦІЇ КООРДИНАТНОГО ШЛІФУВАННЯ НА ОПЕРАЦІЮ ЧИСТОВОГО РОЗТОЧУВАННЯ ПІДЧАС ОБРОБЛЕННЯ ГАРТОВАНОЇ ЗАГОТОВКИ

Анотація. У тексті обґрунтовано заміну координатного шліфування чистовим розточуванням під час обробки точних отворів у загартованих деталях. Показано, що сучасні верстати з ЧПК та надтверді інструментальні матеріали можуть забезпечити необхідну точність і якість поверхні. Такий підхід є особливо доцільним для одиничного й дрібносерійного виробництва, оскільки зменшує витрати, кількість установок і залежність від спеціалізованого обладнання та висококваліфікованого персоналу.

Ключові слова. Лезова обробка, шліфування, точність, чистове розточування.

Vadym Stupnytskyy, Taras Oleniuk

JUSTIFICATION FOR REPLACING COORDINATE GRINDING WITH FINISH BORING DURING THE MACHINING OF HARDENED WORKPIECES

Abstract. The text justifies replacing coordinate grinding with finish boring during the machining of precision holes in hardened parts. It is shown that modern CNC machines and superhard tool materials can ensure the required accuracy and surface quality. This approach is particularly suitable for single-unit and small-batch production, as it reduces costs, the number of setups, and dependence on specialized equipment and highly skilled grinders.

Keywords. Edge machining, grinding, accuracy, finish boring.

У сучасному машинобудуванні обробка точних отворів належить до найбільш відповідальних технологічних операцій, оскільки саме отвори часто виконують роль базових, напрямних або спряжуваних поверхонь у деталях машин, пресформах, штампах, корпусних елементах, плитах, матрицях та інших високоточних виробках. Особливо складною є обробка отворів у загартованих заготовках, коли після термічної обробки необхідно забезпечити не лише заданий діаметр, а й високу точність форми, співвісність, перпендикулярність, циліндричність, шорсткість поверхні та точні міжцентрові відстані. Традиційно такі завдання розв'язуються із застосуванням координатного шліфування, яке тривалий час вважалося одним із основних методів фінішної обробки високоточних отворів у загартованих деталях [1], [2].

Координатне шліфування забезпечує високу точність обробки завдяки поєднанню абразивного різання, прецизійної кінематики верстата та можливості точної прив'язки інструмента до системи координат деталі. Цей метод особливо ефективний у випадках, коли необхідно отримати отвори з дуже малими допусками, складним просторовим розташуванням або високими вимогами до геометричної точності. Сучасні системи координатного шліфування здатні забезпечувати мікронний рівень точності позиціонування та високі показники шорсткості, що підтверджує їхню доцільність у високоточному інструментальному виробництві. Водночас цей метод має суттєві організаційні, економічні та технологічні обмеження, які особливо відчутні в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва.

Запропонована заміна операції координатного шліфування операцією чистового розточування ґрунтується на сучасному розвитку лезової обробки загартованих сталей. Якщо раніше обробка матеріалів після термічного зміцнення майже автоматично

асоціювалася з абразивними методами, то сьогодні завдяки появі надтвердих інструментальних матеріалів, зокрема кераміки, CBN та PCBN, значна частина фінішних операцій може виконуватися лезовим інструментом. У літературі цей напрям часто розглядається як *hard machining* або *hard turning* – обробка загартованих матеріалів різанням, яка в багатьох випадках дає змогу замінити або скоротити обсяг шліфувальних операцій [3], [4]. Зокрема, сучасні PCBN-інструменти широко застосовуються для сухої обробки загартованих сталей твердістю приблизно 50–60 HRC і вище, а тверде точіння розглядається як економічно ефективна альтернатива шліфуванню для фінішної та напівфінішної обробки.

У межах одиничного та малосерійного виробництва, особливо під час виготовлення пресформ, штампів, технологічного оснащення, ремонтних деталей і спеціальних елементів машин, економічна доцільність використання координатного шліфування не завжди є очевидною. Основна проблема полягає в тому, що координатно-шліфувальні верстати є вузькоспеціалізованим і дорогим обладнанням. Їх ефективне використання можливе лише за умови стабільного завантаження високоточними роботами. У реальних виробничих умовах України така умова виконується не завжди. Значна частина наявного парку координатно-шліфувальних верстатів є морально та фізично застарілою, часто походить ще з радянського періоду, має обмежені можливості автоматизації, зношені напрямні, шпindelні вузли та системи відліку. Сучасні імпорtnі координатно-шліфувальні верстати мають дуже високу вартість, а їх придбання для підприємств із нерегулярним потоком таких замовлень є економічно ризикованим.

Окремо слід відзначити кадровий чинник. Координатне шліфування вимагає високої кваліфікації оператора, значного практичного досвіду, розуміння особливостей абразивного інструменту, режимів шліфування, припусків, теплових деформацій, правки круга та точного базування деталі. Помилки на цій операції можуть призвести до браку вже практично готової деталі, яка пройшла термічну обробку та попередні етапи виготовлення. У сучасних умовах дефіциту кваліфікованих робітників така залежність від вузькопрофільного спеціаліста є суттєвим недоліком класичного технологічного маршруту.

Альтернативою є виконання фінішної обробки отворів після термічної обробки методом чистового розточування на сучасному фрезерному або багатоцільовому оброблювальному центрі з ЧПК. Суть такого підходу полягає в тому, що після термообробки деталей встановлюється на оброблювальному центрі, де за одну установку можуть бути виконані фінішне розточування точних отворів, чистова обробка базових поверхонь, фрезерування площин, зняття мінімальних припусків, а також контрольні або коригувальні переходи. Це дає змогу значно скоротити кількість установок, зменшити похибки базування та підвищити загальну технологічну стабільність процесу.

Важливою перевагою чистового розточування є те, що точність взаємного розташування отворів у цьому випадку забезпечується не ручною прив'язкою на координатно-шліфувальному верстаті, а системою координат верстата з ЧПК. Сучасні оброблювальні центри, оснащені кульково-гвинтовими передачами з попереднім натягом, жорсткими напрямними, термокомпенсацією та оптичними або лінійними системами відліку, здатні забезпечувати дуже високу точність позиціонування. Застосування лінійних енкодерів зменшує вплив теплового розширення кульково-гвинтової передачі на положення робочого органу, що є важливим чинником для точного позиціонування в координатній обробці.

Сучасні розточувальні різці зі змінними пластинами з PCBN, кераміки або високоякісних твердих сплавів дають змогу виконувати обробку загартованих сталей

твердістю до 60–62 HRC. При цьому чистове розточування може забезпечувати стабільну геометрію отвору, достатньо низьку шорсткість поверхні та високу повторюваність розміру. У порівнянні зі шліфуванням, лезова обробка має вищу продуктивність, простішу автоматизацію та краще інтегрується у загальний цикл обробки на верстаті з ЧПК. У працях, присвячених обробці загартованих сталей, зазначається, що тверде точіння та споріднені методи лезової обробки можуть замінювати шліфування в тих випадках, коли вимоги до шорсткості, точності форми та стану поверхневого шару не перевищують технологічних можливостей процесу [3]–[6].

Особливо переконливою така заміна є тоді, коли отвір не потребує наднизької шорсткості рівня дзеркального шліфування, а основними вимогами є точний діаметр, правильна форма та точне координатне розташування. У цьому випадку чистове розточування дозволяє отримати необхідний результат без залучення окремого координатно-шліфувального верстата. Крім того, на оброблювальному центрі можна виконати попередню пробну обробку, вимірювання, корекцію радіуса інструмента або траєкторії та повторний фінішний прохід. Такий підхід добре відповідає логіці сучасного гнучкого виробництва, де важливо не лише досягти точності, а й забезпечити швидку переналаджувальність, скорочення допоміжного часу та зменшення кількості міжопераційних переміщень деталі.

Суттєвою технологічною перевагою є також відсутність додаткової похибки повторного базування. У класичному маршруті деталь після попередньої механічної обробки та термічного зміцнення повинна бути встановлена на координатно-шліфувальний верстат, точно вивірена, зорієнтована та прив'язана до системи координат. Кожна така операція створює ризик появи похибки базування або похибки прив'язки. Якщо ж фінішна обробка отворів і прилеглих поверхонь виконується на одному оброблювальному центрі в межах однієї установки, то похибки взаємного розташування поверхонь істотно зменшуються.

Ще одним аргументом на користь чистового розточування є зменшення проблем, пов'язаних із засалюванням абразивного інструменту. Після термічної обробки на внутрішніх поверхнях отворів можуть залишатися окалина, нагар або інші продукти термічного впливу. Під час шліфування такі забруднення можуть спричинити інтенсивне засалювання абразивного круга, погіршення різальної здатності, підвищення температури в зоні різання та нестабільність якості поверхні. У ряді випадків це вимагає попереднього очищення або піскоструминної обробки внутрішніх поверхонь. При використанні розточування ця проблема зменшується, оскільки лезовий інструмент працює за іншим механізмом зняття припуску, а невеликі залишки поверхневого забруднення можуть бути видалені під час попереднього або напівчистового проходу.

З економічного погляду переваги чистового розточування є ще більш очевидними. Оброблювальні центри з ЧПК сьогодні значно поширеніші, ніж координатно-шліфувальні верстати. Вони є універсальним обладнанням і можуть використовуватися для широкого спектра операцій: фрезерування, свердління, розточування, різьбонарізання, координатної обробки, виготовлення складних контурів та обробки деталей різної номенклатури. Тому навіть у разі відсутності постійного потоку високоточних отворів таке обладнання не простоює, а може бути завантажено іншими виробничими завданнями. Координатно-шліфувальний верстат, навпаки, має значно вузьку сферу застосування, що ускладнює його економічне обґрунтування для малого або середнього підприємства.

Водночас слід зазначити, що заміна координатного шліфування чистовим розточуванням не є універсальною для всіх випадків. Якщо до отвору висуваються надзвичайно високі вимоги щодо шорсткості, круглості, циліндричності або якщо

необхідно отримати поверхню з мінімальним рівнем мікронерівностей, координатне шліфування може залишатися доцільним або навіть незамінним. Також слід враховувати жорсткість системи «верстат — пристрій — інструмент — деталь», довжину вильоту розточувальної оправки, діаметр отвору, стабільність припуску, твердість матеріалу після термообробки та можливість виникнення вібрацій. Для глибоких або малодіаметральних отворів із великим відношенням довжини до діаметра розточування може бути ускладненим через недостатню жорсткість інструмента. Тому рішення про заміну операції повинно прийматися на основі аналізу конкретної деталі, допусків, матеріалу, твердості, вимог до поверхні та наявного обладнання.

У практичному технологічному процесі доцільно передбачати таку схему: після термічної обробки залишати мінімальний, але стабільний припуск на фінішне розточування; застосовувати жорстку розточувальну оправку мінімально можливої довжини; використовувати пластини з PCBN або іншим матеріалом, придатним для обробки загартованої сталі; виконувати попередній контроль твердості; забезпечувати стабільне базування деталі; проводити контроль першої деталі та, за необхідності, вводити корекцію інструмента.

Загалом сучасні напрями розвитку українського машинобудування, особливо в умовах повномасштабної війни, дефіциту кваліфікованих кадрів, обмеженості інвестиційних ресурсів і потреби у швидкому виготовленні технологічного оснащення, диктують необхідність ширшого застосування гнучких, продуктивних і менш капіталомістких методів обробки. У таких умовах технологічні рішення повинні оцінюватися не лише за максимально можливою точністю, а й за критеріями доступності обладнання, собівартості, часу виконання, універсальності, кадрового забезпечення та ремонтпридатності виробничої системи.

Отже, для одиничного та дрібносерійного виробництва, зокрема під час виготовлення пресформ, штампів і високоточних деталей технологічного оснащення, заміна операції координатного шліфування операцією чистового розточування є технічно та економічно обґрунтованою. Такий підхід дозволяє використовувати поширені оброблювальні центри з ЧПК, скорочувати кількість установок, зменшувати похибки базування, підвищувати продуктивність і знижувати залежність від унікального обладнання та вузькопрофільних спеціалістів. При правильному виборі інструменту, режимів різання та умов базування чистове розточування загартованих отворів може бути ефективною альтернативою координатному шліфуванню в тих випадках, коли вимоги до точності та якості поверхні відповідають технологічним можливостям лезової фінішної обробки.

Перелік посилань

1. S. Malkin and C. Guo, Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008.
2. I. D. Marinescu, W. B. Rowe, B. Dimitrov, and I. Inasaki, Tribology of Abrasive Machining Processes, 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew, 2012.
3. J. P. Davim, Ed., Machining of Hard Materials. London: Springer, 2011.
4. J. P. Davim, Ed., Modern Machining Technology: A Practical Guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.
5. W. Grzesik, Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2017.
6. G. Byrne, D. Dornfeld, and B. Denkena, "Advancing cutting technology," CIRP Annals, vol. 52, no. 2, pp. 483–507, 2003.

Секція: НОВІ МЕТОДИ ЗВАРЮВАННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ, НАПИЛЕННЯ

УДК 621.326

**Viktor Shapovalov, Kostiantyn Zlyhoriev, Vitalii Porokhonko, Farit Biktagirov,
Volodymyr Barabash, Oleksandr Hnatushenko, Anatolii Ihnatov**
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Ukraine

**EFFECT OF METAL BATH STIRRING INTENSITY ON STEEL INGOTS
CONTAMINATION WITH SLAG INCLUSIONS**

Abstract. For the conditions of producing steel ingots using a combined external influence in the form of electros slag heating and stirring of the metal (ESHS), it has been determined that, in order to prevent contamination of the metal with slag inclusions, the specific stirring power should not exceed $50 \cdot 10^{-3}$ W/kg.

Keywords: steel ingot, heating and stirring of metal, stirring power, slag inclusions.

In many industries, such as nuclear power engineering, heavy machinery manufacturing, shipbuilding, and the chemical industry, large forgings are required for the production of critical large-scale components and mechanisms. These forgings are produced from ingots weighing tens to hundreds of tons, and their quality determines the reliability and service life of the final products. With the exception of specialized production methods, ingots are manufactured by pouring molten steel into molds. The prolonged solidification of large volumes of liquid metal is accompanied by the formation of various defects and inhomogeneities within the ingot body. To mitigate the causes of their formation, it is necessary to apply technologies that enable active control over the processes occurring during the transition of metal from the liquid to the solid state.

Such approaches may include methods of external influence [1,2], in particular the method developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute, which involves electros slag heating and stirring of the metal (ESHS) during ingot formation [3]. According to this method, the schematic diagram of which is shown in Fig. 1, heating is achieved by Joule heat released during the passage of electric current through the slag layer, while stirring is performed by argon purging of the molten metal bath using a lance immersed into the liquid core of the ingot.

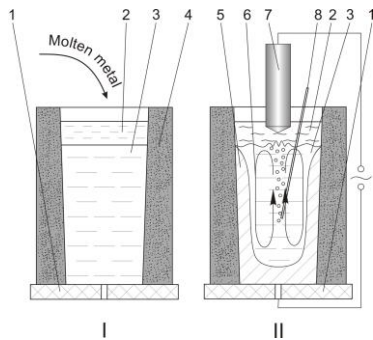


Fig. 1. Schematic diagram of ingot production by the ESHS method.

I - pouring of liquid metal into the casting mold;

II - heating and stirring of the metal:

1 - bottom plate; 2 - molten slag;

3 - molten metal; 4 - sand-clay mold;

5 - solid metal; 6 - direction of metal stirring;

7 - non-consumable electrode; 8 - lance.

The conducted studies using physical and mathematical modeling, as well as experiments on real steel ingots, have shown that this method makes it possible to significantly improve the homogeneity of cast billets [4].

One of the main technological parameters determining the efficiency of ingot production by the electros slag heating and stirring (ESHS) method is the intensity of metal stirring, which primarily depends on the gas flow rate used for purging. The effect of gas purging on the stirring intensity of the molten metal bath is commonly evaluated by such a

parameter as the specific stirring power, i.e., the ratio of the stirring power to the mass of the treated metal [5]. The stirring power can be calculated using the formula presented in [6].

$$N = n'RT \ln \left[\frac{\rho_2 + \rho'gH}{\rho_2} \right],$$

where N - stirring power, W; n' - gas molar flow rate, kmol/s; $n' = \frac{V}{60} \cdot 22,4$; R - universal gas constant, J/(kmol·K); T - temperature, K; P_2 - atmospheric pressure, Pa; ρ' - density of the molten metal, kg/m³; g - acceleration due to gravity, m/s²; H - immersion depth of the lance in the metal, m; V - gas flow rate for purging, m³/min.

Experiments aimed at evaluating the stirring power during electroslag heating and stirring (ESHS) were carried out during the casting of two ingots of CT80 steel into sand-clay molds. The ingots had a diameter of 180-220 mm, a height of 450-500 mm, and a mass of 120-130 kg. The temperature of the slag bath (analogue of Wacker ESR2063 slag) with a thickness of 50-60 mm was maintained at 1550-1600 °C. The purging device (lance) was immersed to a depth of two-thirds of the calculated depth of the molten metal bath.

The maximum possible stirring intensity was selected based on the condition that gas purging should not cause excessive agitation of the slag bath in the gas exit zone or exposure of the metal surface, in order to prevent interaction of the steel with air. Preliminary experiments showed that, under the given experimental conditions, such requirements were satisfied 5 minutes after filling the mold with molten metal at an argon flow rate of less than 10 L/min. Therefore, during the production of the first ingot, in the first purging cycle, as shown in the data presented in the table, the argon flow rate was intentionally kept below this permissible value. The table also presents data on purging parameters and the specific stirring power, which was determined as the ratio of the stirring power (calculated using the above-mentioned formula) to the mass of the molten metal bath at the start of purging. The volume of the bath was estimated with a sufficiently high degree of accuracy by calculation, taking into account the results of macrostructural analysis and a Baumann sulfur print of a longitudinal axial template of the ingot (Fig. 2), where the position of the molten metal bath - along the boundary between its liquid and solid regions - is clearly distinguished in the form of light lines.

Table

Stirring regimes of molten metal during casting of experimental CT80 steel ingots

Ingot №	Stirring cycle	Start time, min	Argon flow rate, L/min	Purging duration, s	Immersion depth, cm	Specific stirring power, 10 ⁻³ W/kg
1	1	10	8,5	30	35	67,1
	2	15	6,5	30	27	68,4
	3	21	5,5	40	20	49,8
	4	27	4,5	40	15	44,4
	5	33	4,0	30	15	39,9
2	1	8	6,5	30	34	39,9
	2	17	5,5	40	25	37,2
	3	25	4,5	40	15	46,3
	4	32	4,0	30	14	39,1

In the investigated ingot, due to the application of heating and stirring, no pronounced defects of the internal structure were observed. In particular, no shrinkage cavity was present, and neither axial looseness nor porosity was revealed after etching. However, despite the absence of shrinkage defects, slag inclusions were detected in the upper part of the first experimental CT80 steel ingot. They are especially clearly visible on the polished surface of

the template prior to etching for macrostructural examination (Fig. 3a). Highlighting their locations on the Baumann print (Fig. 2b) clearly shows that they are mainly located on or near the boundary of the molten metal bath that existed during the first and second stirring cycles.

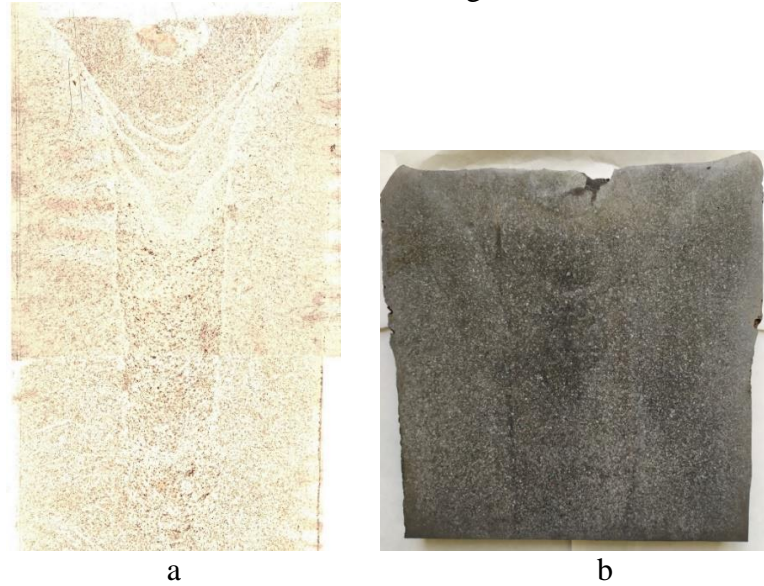


Fig. 2. Baumann sulfur print (a) and macrostructure (b) of the upper part of the longitudinal axial template of CT80 steel ingot No. 1.

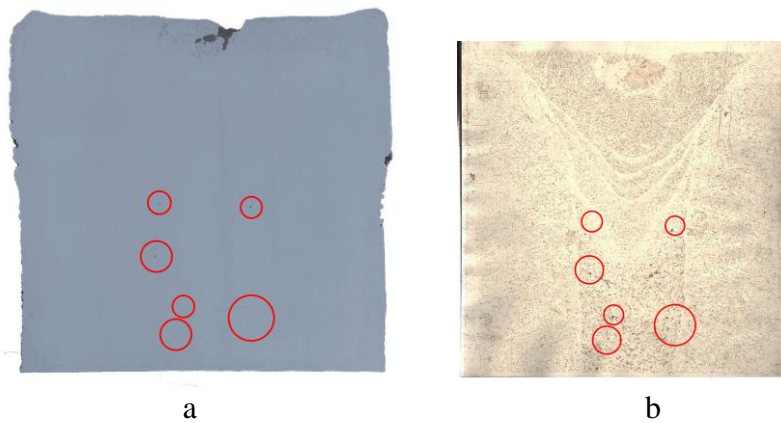


Fig. 3. Appearance and distribution of slag inclusions on the polished surface of the upper part of the first experimental CT80 steel ingot template (a), and their locations on the sulfur print (b).

In our opinion, the primary cause of slag inclusions entering the ingot is associated with two factors. The first is the high argon flow rate during the first two stirring cycles, which leads to the formation of intense metal flows at the slag-metal interface. This increases the tendency for slag particle detachment from the slag bath and their entrainment into the ingot. The second factor is the presence of a relatively small-diameter molten metal bath, which, as clearly seen from the sulfur print, approximately corresponds to the boundary between the solid and liquid phases. This is due not only by the heat removal conditions but also by the fact that CT80 steel has a wider solidification interval and a more extended two-phase (mushy) zone. As a result, during the production of the first experimental CT80 steel ingot, a relatively high argon flow rate was applied to a comparatively small volume of the liquid portion of the ingot. This led to the entrainment of some liquid slag particles by downward metal flows into the two-phase zone, where they became trapped in the more viscous semi-solid metallic melt.

Based on the above, to prevent contamination by exogenous slag inclusions during the production of the second CT80 steel ingot, the argon flow rate in the first stirring cycle was reduced to 6.5 L/min, and purging was initiated 8 minutes after pouring instead of 10 minutes (see Table).

As the study of the second CT80 steel ingot showed, no exogenous slag inclusions were detected in it (Fig. 4).

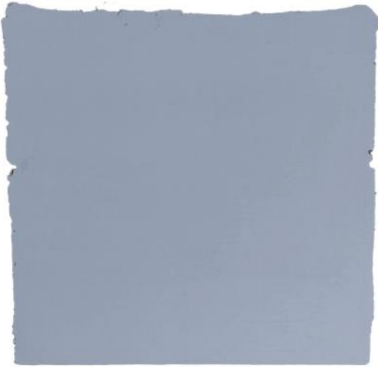


Fig. 4. Polished surface of the specimen taken from the upper part of the second experimental CT80 steel ingot.

Based on the analysis of the above data, it can be concluded that, under the conditions of producing CT80 steel ingots with electroslag heating (AN-295 slag at a temperature of 1550-1600 °C) and metal stirring by gas purging, the specific stirring power should not exceed $50 \cdot 10^{-3}$ W/kg in order to prevent contamination of the metal by exogenous slag inclusions.

It should be noted that, according to the data reported in [5], during steel treatment at an ASEA-SKF unit in a 50-ton ladle, where metal stirring is performed by argon purging, the specific stirring power ranges from 50 to

$500 \cdot 10^{-3}$ W/kg. Under such processing conditions, there is no risk of slag entrainment into the metal with subsequent contamination by non-metallic inclusions. Moreover, such entrainment is even desirable for increasing the efficiency of slag refining of the metal. Most likely, it is at a specific stirring power of about $50 \cdot 10^{-3}$ W/kg that the covering slag begins to be entrained into the molten metal bath, thereby facilitating the removal of impurities. Therefore, it may be assumed that the upper limit of stirring power determined in this study for gas purging of the liquid core of an ingot is applicable not only to relatively small ingots but also to multi-ton ingots.

References

1. Efimov, V. A. (1998). The influence of external factors on liquid and crystallizing metal. *Steel*, (4), 21–27 [in Russian].
2. Barabash, V. V., & Biktagirov, F. K. (2024). Application of external influence in the production of steel ingots. Review. *Electrometallurgy Today*, (1). <https://doi.org/10.37434/sem2024.01.05> [in Ukrainian].
3. Shapovalov, V. O., Biktagirov, F. K., Barabash, V. V., Hnatushenko, O. V., Gnizdylo, O. M., & Protokovilov, I. V. (2025). New method for improving physical homogeneity of steel ingots. In *Welding and Related Technologies* (pp. 21-24). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003518518-4>. [in Ukrainian]
4. Biktagirov, F. K., & Barabash, V. V. (2025). Influence of electroslag heating and metal stirring on the physical homogeneity of experimental steel 40Kh ingots. *Foundry Processes*, 2(160), 10–19. <https://doi.org/10.15407/plit2025.02.010> [in Ukrainian]
5. Mazumdar D. The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems / D. Mazumdar, R. Guthrie January (1995). *ISIJ International* 35(1):1-20. Режим доступу: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1>
6. Sabirzyanov, I. T., & Sabirzyanov, T. G. (2010). Stirring power of metal during inert gas purging in a ladle. *Design, Production and Operation of Agricultural Machinery*, 40(II), 158–171. [in Russian].

УДК 667.64:678.026

Роман Біщак¹, к.т.н., доц.; Павло Марущак², д.т.н., проф.; Андрій Блавіцький²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОСОБЛИВОСТІ РЕМОНТУ КОРОЗІЙНИХ ДЕФЕКТІВ ГАЗОПРОВІДІВ НАПЛАВЛЕННЯМ

На основі аналізу відомих технологій ремонтного наплавлення ділянок з корозійними дефектами, виявленими на поверхні магістральних газопроводів, запропоновано та апробовано схему шахової або перехресної послідовності виконання коротких зварних швів. При ремонті великого корозійного дефекту трубопроводу запропонована схема забезпечує раціональне керування тепловими та напруженими станами металу, знижує ймовірність перегріву, залишкових термічних напружень і підвищує надійність відремонтованих ділянок.

Ключові слова: корозійний дефект, наплавлення, ремонт, магістральний газопровід

Roman Bishchak, PhD, Assoc. prof.; Pavlo Maruschak, DSc, Prof.; Andrii Blavitskyi SPECIFICATIONS FOR REPAIR OF CORROSION DEFECTS IN GAS PIPELINES IN FLASH LAYERS

Based on the analysis of known technologies for the repair surfacing of areas with corrosion defects on the surface of main gas pipelines, a scheme for a staggered or cross-sequence of short welds has been proposed and tested. When surfacing a large corrosion defect in a pipeline, the proposed scheme provides rational control of the metal's thermal and stress states, reduces the likelihood of overheating and residual thermal stresses, and increases the reliability of the repaired areas.

Keywords: corrosion defect, surfacing, repair, gas main pipeline

Магістральні газопроводи є складними технологічними об'єктами, вихід з ладу яких зумовлює значні матеріальні та екологічні збитки. Аварійні ситуації на газопроводах призводять до забруднення навколишнього середовища, створюють підвищені техногенні ризики для персоналу та населення. Заварювання дефектів на діючих газопроводах без зупинки перекачування газу (під тиском) - це спеціалізована технологія, що вимагає суворого дотримання техніки безпеки. Вибір методу ремонту визначається глибиною і протяжністю дефекту, залишковою товщиною стінки, рівнем робочого тиску, властивостями матеріалу та можливістю доступу до пошкодженої ділянки. Науково ці підходи базуються на принципах механіки руйнування, матеріалознавства та зварювальної інженерії. Відомо кілька технологічних рішень [1, 2], які дозволяють реалізовувати цю технологію за допомогою роботизованих або ручних методів. Обидва ці методи передбачають локалізацію місця газопроводу з дефектом, механічне видалення (зішліфовування) корозійної ямки та подальше ремонтне наплавлення. Проте враховуючи складність цієї технології, вдосконалення існуючих та створення нових методів ремонту залишаються актуальними питаннями. Визначальним аспектом при розробленні технології ремонту є схема виконання зварних швів. Відомі схеми забезпечують зменшення напружень зварювання та передбачають два варіанти виконання швів [2]:

- починають з краю, з метою формування колоподібного, рис. 1а, або прямокутного, рис. 1б швів (за виглядом зверху). Пошарове виконання швів із зміщенням до центру забезпечує суцільне заплавлення ямки дефекту;

- з dna круглої ямки, з обох боків вгору, рис. 1а, а за умови, якщо ямка прямокутної форми, наплавлення розпочинають у протилежних кутах, з подальшим переміщенням за схемою 1б.

Авторами запропоновано та апробовано принципово нову схему ремонту локальних дефектів, яка є універсальною з точки зору масштабування кількості накладання зварних швів: кількість рядів може збільшуватися залежно від розміру дефекту, але принципи залишаються незмінними – зміщення, чергування та дискретність, рис. 1в.

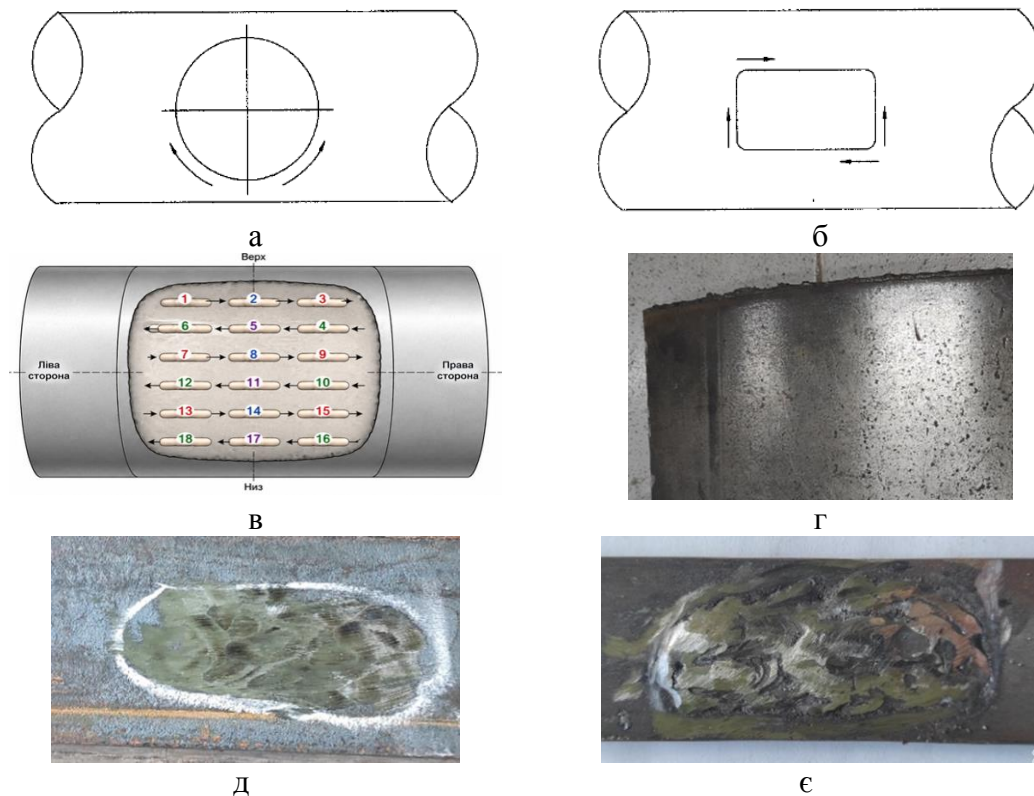


Рисунок 1. Технологічні особливості ремонту корозійних дефектів: а–в - схеми послідовності виконання наплавлювальних швів (а, б - [2], в - розроблена); фрагмент дослідженого газопроводу - г; механічно виконаний корозійний дефект - д; поверхня заплавленого дефекту - е.

Дослідження проводили на фрагменті магістрального газопроводу (рис. 1г), виготовленому зі сталі 17Г1С, товщиною 10 мм. Експлуатаційний корозійний дефект на діючому газопроводі моделювали механічним зішліфовуванням поверхні до найбільшої глибини залягання 5 мм (рис. 1д). Заплавлення корозійного дефекту (рис. 1е) виконували ручним дуговим методом зварювальним інвертором Fronius TransPocket 1500 на постійному струмі прямої полярності 90 А, напруга на дузі 20–26 В, покритими електродами УОНІ-13/55 за схемою, наведеною на рис. 1в. Наплавлення виконували таким чином, щоб температура навколо корозійного дефекту не перевищувала 150 °С, температуру контролювали цифровим пірметром.

Нова схема наплавлення (рис. 1в) відображає шахову або перехресну послідовність виконання коротких зварних швів при заповненні великого корозійного дефекту трубопроводу і є прикладом раціонального керування тепловими та напруженими станами металу в умовах локального ремонту. У центрі схеми зображено ділянку дефекту, яка умовно розбита на ряди коротких наплавлених валиків однакової довжини. Кожен шов має порядковий номер, що визначає чітку технологічну

послідовність їх виконання. Основна ідея технологічного підходу полягає у дискретному введенні тепла та просторово-часовому рознесенні зон нагріву [2].

Перший ряд (шви 1–3) виконується, наприклад, зліва направо. Це створює початковий тепловий вплив у верхній частині дефекту. Однак вже на наступному етапі принципово змінюються як просторове положення, так і напрямок наплавлення: другий ряд (шви 4–6) виконується нижче, але у зворотному напрямку – справа наліво. Таким чином, формується чергування не лише положення швів, а й напрямків руху дуги. Ключовою особливістю є те, що кожен наступний ряд зміщується відносно попереднього так, що шви розташовуються між валиками попереднього ряду. Це і створює так звану «шахову» структуру. Такий підхід забезпечує: розосередження теплових джерел у просторі; відсутність накладання піків температур у сусідніх точках; більш рівномірне формування температурного поля.

З фізичної точки зору, схема (рис. 1в) реалізує принцип зменшення температурних градієнтів, що безпосередньо впливає на формування залишкових напружень. Оскільки кожен новий шов виконується на частково охолодженій зоні, відбувається поетапна релаксація термічних деформацій. Чергування напрямків (лівий → правий, правий → лівий) має не лише геометричне, а й металургійне значення. Воно запобігає односторонньому накопиченню пластичних деформацій і зменшує ризик деформування конструкції. Крім того, такий підхід сприяє більш рівномірному розподілу структурних змін, що виникають внаслідок фазових перетворень під час нагріву і охолодження. Нумерація швів (1–18 і далі) відображає сувору послідовність виконання, яка фактично задає часову дискретизацію процесу. Інтервали між накладанням сусідніх швів забезпечують часткове охолодження металу, що є критично важливим для обмеження максимальної температури. Це, у свою чергу, знижує ймовірність утворення структур крихкості і мінімізує ризики, пов'язані з водневим окрихченням. Слід відзначити також те, що довжина кожного шва є обмеженою 10–20 мм (короткі валики). Це означає, що тепловкладення вводиться імпульсно, а не безперервно. У результаті формується більш сприятливий термічний цикл: швидкий локальний нагрів → часткове охолодження → наступний імпульс у віддаленій зоні.

У підсумку, представлена шахова послідовність є не лише зручною технологічною практикою, а й відображає обґрунтований підхід до керування тепловими, структурними та механічними процесами. Вона забезпечує мінімізацію перегріву, зниження термічних напружень і підвищення надійності відремонтованої ділянки трубопроводу в умовах експлуатації.

З точки зору забезпечення максимальної довговічності конструкції, така схема також сприяє підвищенню опору втомі матеріалу. Це пояснюється тим, що зменшуються залишкові напруження і концентрації деформацій, які є основними факторами зародження втомних тріщин

Перелік посилань

1. ГБН В.3.1-00013741-12:2011. Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації. – Чинний з 06.09.2011. – Київ: Мін-во енергетики та вугільної промисловості України, 2011. – 152 с.

2. CN121322775A Submarine pipeline corrosion defect detecting and repairing robot capable of working in oil and gas conveying state / Chen Zhanfeng, 13.01.2026. (in Chinese).

3. CN101579773A On-line repairing-welding technique for oil pipelines / Pan Hongli Li Jingchang Teng Yanping Liu Guang Zhon, 18.11.2009. (in Chinese).

УДК 621.791.052

Станіслав Драган, к.т.н., Юрій Ярослав, к.т.н., Дмитро Гладченко

Національний Університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДУГИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ АРМАТУРНИХ СТРИЖНІВ РОЗТЯГНУТОЮ ДУГОЮ ПІД ФЛЮСОМ

Анотація. Наведені результати експериментального дослідження енергетичних параметрів зварювальної дуги. Отримані показники напруженості стовпа дуги E_c та падіння потенціалу в біляелектродних областях дуги. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення стабільності процесу зварювання арматурних стрижнів розтягнутою дугою під флюсом.

Ключові слова: напруженість стовпа дуги, рівняння дуги, розтягнута дуга.

Stanislav Drahan, Ph.D, Yuriy Yaros, Ph.D, Dmytro Hladchenko Ph.D student
EXPERIMENTAL EVALUATION OF ARC ENERGY PARAMETERS FOR
SUBMERGED DRAWN ARC STUD WELDING OF REINFORCING BARS

Abstract. The paper presents the results of an experimental study on the energy parameters of a welding arc. Data on the arc column electric field intensity and the potential drop in the near-electrode regions were obtained. The research findings can be applied to improve the stability of the submerged drawn arc welding of reinforcing bars.

Key words: arc column electric field intensity, arc equitation, drawn arc.

Особливістю технології зварювання розтягнутою дугою арматурних стрижнів є те, що площа перерізу зварювальної дуги значно менша за площу перерізу електроду. В таких умовах для розробки технології зварювання виконані дослідження дугового процесу, зокрема визначення ефективного радіуса зварювальної дуги. В основу досліджень покладена загальновідома каналова модель дуги та запропонована академіком К.К. Хреновим аналітична залежність між параметрами дугового процесу [1]

$$IE = 2\pi r_0 \sigma_E T^4 \quad (1)$$

де I – зварювальний струм; E – напруженість поля стовпа дуги; r_0 – ефективний радіус дуги; $\sigma_E T^4$ – питома випромінювання за законом Стефана-Больцмана.

Таким чином, для розрахунку ефективного радіусу дуги треба встановити величину напруженості поля її стовпа.

Як відомо, напруга на зварювальній дузі з плавким електродом описується рівнянням [2]

$$U_d = (U_k + U_a) + \frac{dU_c}{dl} l_d, \quad (2)$$

де U_d – напруга дуги, В; U_k , U_a – падіння потенціалу в катодній та анодній зоні дуги відповідно, В; l_d – довжина дуги, мм

Графік функції (2), дозволяє, при незмінній силі струму ($I_{зв} = \text{const}$), визначити напруженість поля стовпа дуги E при даній довжині дуги l_d та дослідити відповідну зміну напруги U_d .

З урахуванням того, що площа перерізу електроду набагато перевищує площу анодної плями дуги, можна допустити, що внаслідок інерційності теплових процесів електродний стрижень не встигає суттєво оплавитися під час стабілізації дугового проміжку на початковому етапі горіння дуги. На підставі цього допущення довжину дуги на проміжку $t = 120 - 150$ мс після збудження вважали постійною. Розроблена

авторами конструкція зварювального пістолету дозволяє чітко встановлювати довжину дуги в момент її збудження. В ході експериментальних досліджень початкова довжина дуги дорівнювала 3, 4, 5 мм. Зміну напруги дуги фіксували за допомогою цифрового осцилографу. При кожній довжині дуги проводили осцилографування процесу запалення на трьох рівнях струму. Середні арифметичні з трьох значень, отриманих в результаті кожного досліду, дозволили визначити зміну напруги дуги в залежності від її довжини (табл. 1).

Таблиця 1. Результати дослідження зміни параметрів дугового розряду в залежності від довжини дуги

$l_{д}$, мм	$U_{д,сер}$, В	$I_{д,сер}$, А	$U_{к} + U_{а}$, В	$E_{с}$, В/мм
3	27,94	1324	20,19	2,70
4	31,42	1296		
5	33,33	1292		
3	28,87	1582	21,94	2,49
4	32,93	1560		
5	33,84	1555		
3	32,70	1840	22,72	3,22
4	34,90	1800		
5	39,18	1777		

У ході експериментів було встановлено, що відхилення миттєвого значення зварювального струму від його середньої величини не перевищувало 2% і свідчить про можливість з достатньою для практичного використання точністю стверджувати про сталість дугового процесу.

За результатами обробки та аналізу отриманих результатів побудовані графіки функції $U_{д} = f(l_{д})$ (рис.2), які дозволили зробити наступні висновки.

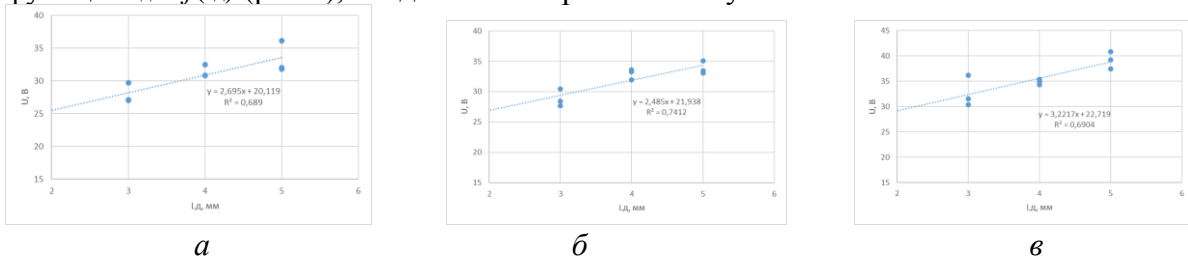


Рисунок 1. Графіки функції $U_{д} = f(l_{д})$ за результатами експериментальних досліджень:
 а – $I_{зв.} = 1304$ А; б – $I_{зв.} = 1566$ А; в – $I_{зв.} = 1806$ А

Висновки і пропозиції. Напруженість поля стовпа дуги при зварюванні арматурних стрижнів є достатньо низькою і змінюється в межах 2,5 – 3,2 В/мм. За енергетичними параметрами дуги технологія зварювання арматурних стрижнів розтягнутою дугою під флюсом займає проміжне положення між автоматичним зварюванням під флюсом та зварюванням відкритою дугою.

Перелік посилань

1. Лесков Г.І. Електрична зварювальна дуга. М: «Машинобудування», 1970, 335с.
2. Lancaster, J.F. The physics of welding. 2nd ed. Pergamon, 1983, 340p.

УДК 621.791.75:004.8

**Лагодзінський І.М., PhD; Квасницький В.В., д.т.н., проф.; Чорний А.В., к.т.н.;
Зворикін К.О., к.т.н., доц.; Черній В.О., асп.**

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

АЛГОРИТМІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЦИКЛУ WAAM ВИГОТОВЛЕННЯ З АДАПТИВНИМ УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ПРОСТОРОВИХ ВИРОБІВ

Анотація. Створений алгоритм генерування управляючих команд для системи адитивного дугового наплавлення WAAM, що враховує тепловий стан виробу та його габаритні розміри при розрахунковому визначенні діючих технологічних параметрів процесу наплавлення на різних ділянках траєкторії. Описано експериментальну установку, матеріали для проведення досліджень, особливості генерування рекомендованих базових параметрів режимів наплавлення. Обґрунтована доцільність інтеграції контролю міжшарової температури як основи для подальшого вдосконалення системи керування з динамічним зворотнім зв'язком.

Ключові слова: WAAM, планування траєкторій, теплова модель, масштабний фактор, G-код, контроль температури.

**Ivan Lahodzinskyi, Viktor Kvasnytskyi, Andrii Chorny, Kostiantyn Zvorykin,
Vladyslav Chernii**

ALGORITHMIC PLANNING OF THE WAAM MANUFACTURING CYCLE WITH ADAPTIVE CONSIDERATION OF THE THERMAL STATE OF SPATIAL PRODUCTS

Abstract. An algorithm has been developed for generating control commands for the WAAM additive arc cladding system, which takes into account the thermal state of the workpiece and its overall dimensions when calculating the operating process parameters for cladding in different sections of the trajectory. The experimental setup, materials used for the research, and the specifics of generating the recommended basic parameters for the cladding modes are described. The feasibility of integrating interlayer temperature control as a basis for further improvement of the control system with dynamic feedback is substantiated.

Keywords: WAAM, toolpath planning, thermal model, scale factor, G-code, temperature control.

Технологія Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) набуває все більшого поширення в промисловості завдяки високій продуктивності наплавлення та нижчій вартості порівняно з порошковими методами адитивного виробництва. Більшість існуючих систем планування траєкторій адаптують FDM-слайсери або комерційні САМ-пакети без урахування теплової моделі процесу, що призводить до накопичення тепла між шарами, нестабільності геометричної форми наплавлених шарів та утворення дефектів типу тріщин. Завдання ускладнюється тим, що кількість накопиченого тепла залежить від габаритів виробів, тому застосування однакових алгоритмів керуючого програмного забезпечення дає різні результати для виробів різного розміру та форми. Разом з тим, переважна більшість розглянутих підходів не враховує масштабний фактор як самостійний параметр при генеруванні траєкторії наплавлення окремих шарів, а відсутність зворотного зв'язку за температурою поверхні унеможливує оперативне коригування режимів наплавлення в реальному часі. Таким чином, наукове дослідження є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки

спрямоване на вирішення ключових проблем використання WAAM технологій у сучасній промисловості.

Для отримання просторових виробів було розроблене програмне забезпечення яке реалізує наскрізний процес перетворення від CAD-моделі до машинних команд (рис.1). Алгоритм охоплює такі кроки: аналіз геометричної форми виробу та визначення напрямку формування наплавленого шару; розрахунок рекомендованих параметрів режиму процесу наплавлення з урахуванням комплексу властивостей матеріалу, що наплавляється та геометричних розмірів виробу; нарізання моделі на шари із заданою висотою валика та генерування контурної траєкторії; розрахункова оцінка теплового стану кожного шару з урахуванням допустимої температури між шарами для матеріалу, що наплавляється; формування керуючої програми у форматах CNC G-код, ABB RAPID або KUKA KRL.

З метою мінімізації кількості накопиченого тепла в одній зоні виробу запропоновано стратегію зміни ділянок початку наплавлення між шарами: непарні шари починаються з одного боку деталі, парні – з протилежного, що забезпечує більш рівномірний розподіл температури між різними ділянками як по довжині траєкторії наплавлення, так і по висоті виробу. Параметри технологічного процесу адитивного наплавлення динамічно коригуються залежно від поточного теплового стану деталі.

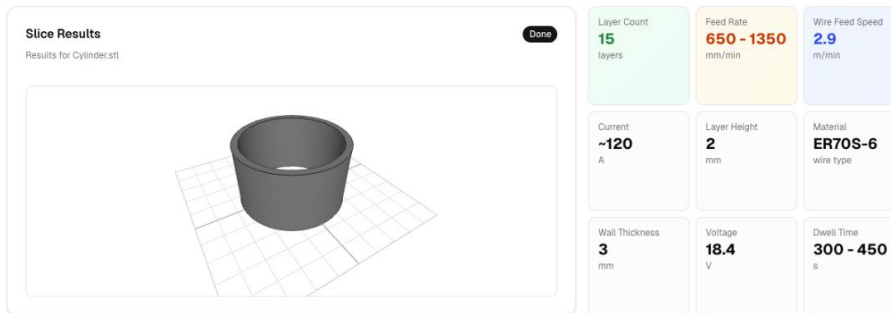


Рисунок 1. Інтерфейс розробленого програмного забезпечення: результати нарізання моделі виробу на окремі шари та рекомендовані базові параметри процесу наплавлення

Дослідження виконані за допомогою тривісної порталльної системи з керуванням за допомогою команд G-коду та із застосуванням зварювального MIG/MAG джерела зварювального струму Fronius VarioSynergic 4700. Витратні матеріали: електродний дріт ER70S-6, Ø 1,2 мм, захисна газова суміш Ag (82%) + CO₂ (18%). Параметри наплавлення: рекомендований усереднений базовий струм I = 120 А, напруга на дузі U = 18,4 В, швидкість подачі дроту WFS = 2,9 м/хв; швидкість переміщення пальника адаптивно збільшується від 650 до 1350 мм/хв залежно від теплового стану деталі та траєкторії наплавлення. Критерії вибору режиму: стабільність процесу наплавлення та відтворюваність геометричної форми окремих валиків. Окрім того, при визначенні рекомендованих базових параметрів режиму наплавлення необхідно враховувати мінімізацію глибини проплавлення попередньо сформованого шару (критерії максимальної висоти та мінімальної ширини кожного окремого валика). Керуюча програма для кожного шару містить послідовність спеціалізованих макрокоманд: активація процесу наплавлення, встановлення параметрів режиму наплавлення, переміщення до початкової ділянки формування наплавленого шару, запалювання електричної дуги, виконання контурної траєкторії, гасіння електричної дуги; витримка з наступним припиненням подачі захисного газу для пасивного охолодження (рис. 2). Тривалість витримки визначається алгоритмом індивідуально для кожного шару на основі розрахункового визначення теплового стану просторового виробу.

За однакових вхідних параметрів (марка присадного дроту, спосіб наплавлення, склад захисного газового середовища тощо) виготовлення виробів різних габаритних розмірів та форми потребує коригування рекомендованих базових технологічних параметрів процесу наплавлення та зміни робочих алгоритмів керуючого програмного забезпечення. Розрахунок теплового стану ґрунтується на оцінці питомої кількості енергії, що внесена у виріб при формуванні кожного окремого шару, з урахуванням часу наплавлення та пасивного охолодження між шарами. Погонна енергія наплавлення, що визначається діючими параметрами процесу, є основою для визначення параметрів теплової моделі. Для кожного окремого шару алгоритм порівнює розрахункову температуру поверхні з граничним значенням та визначає необхідний час витримки перед наступним проходом.

Просторовий виріб невеликих габаритних розмірів має меншу кількість накопиченого тепла, але і кожен шар завершується за менший час, що зменшує тривалість пасивного охолодження між проходами. Для великогабаритних деталей, наплавлення окремого шару займає більше часу та забезпечує можливість природного охолодження попередньо наплавленого металу під час руху пальника по траєкторії наплавлення інших ділянок до закінчення наплавлення шару. Це дозволяє зменшити тривалість паузи для охолодження металу попередньо наплавленого валика перед наплавленням наступного або рідше зупиняти процес наплавлення.

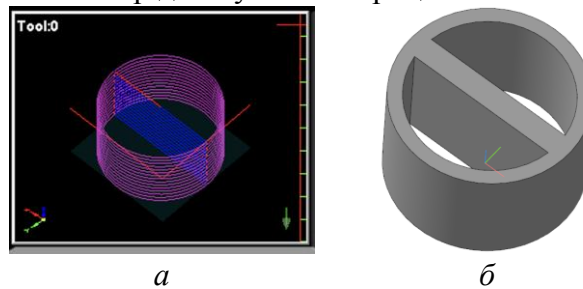


Рисунок 2. Візуалізація траєкторії наплавлення циліндричного виробу у середовищі ЧПК-керування (а) та вихідна САД модель (б)

Зокрема, для зразка з діаметром та висотою 40 мм тепла модель прогнозує досягнення граничної температури між шарами 150°C вже після 3–4 шарів, що за результатами розрахунків вимагає витримки тривалістю 60 – 90 с перед початком наступного проходу. При цьому, швидкість переміщення пальника на перших шарах становить 650 мм/хв і зростає до 980 мм/хв у міру накопичення тепла. Для деталі з діаметром та висотою 180 мм за аналогічних параметрів процесу температурний поріг досягається лише після 8–10 шарів, а необхідна витримка скорочується до 15–25 с завдяки тривалішому природному охолодженню під час переміщення пальника. Таким чином, одна й та сама САД-модель, збільшена у 4 рази, дає різну кількість шарів, різний час охолодження та різні значення швидкості зварювання на кожному шарі.

Поточна реалізація ґрунтується на розрахунковій тепловій моделі без зворотного зв'язку. Для підвищення точності заплановано інтеграцію динамічного зворотного зв'язку за температурою між шарами: температура поверхні після кожного шару порівнюватиметься з рекомендованою температурою між шарами для матеріалу, що наплавляється (для ER70S-6 – не вище 150°C), за результатами порівняння температур тривалість паузи коригуватиметься автоматично.

Наукові дослідження проведені за грантової підтримки НФДУ, проєкт №2025.05/0040 «Адитивне дугове наплавлення просторових металевих виробів складної геометричної форми з програмним перетворенням цифрових даних 3-Д моделі» (0126U003566).

УДК 621.791

Валерій Лазарюк¹, к.т.н., доц.; Зіновій Грондзаль², к.т.н.; Андрій Блавицький¹, Павло Сокіл¹

1 - Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

2 - ДНЗ «Тернопільський центр професійно-технічної освіти», Україна

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОГО ЦИКЛУ НА ПОВЕДІНКУ ВОДНЮ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ СТАЛЕЙ

Анотація. Розглянуто вплив термічного циклу на поведінку водню у зварних з'єднаннях сталей з урахуванням фазових перетворень та системи водневих пасток. Показано, що у мартенситних сталях термічний маршрут після зварювання може впливати на перерозподіл і дегазацію дифузійного водню через зміну фазового стану металу. Для низьколегованих трубних сталей проаналізовано роль феритно-бейнітної структури у формуванні системи пасток та зниженні локалізації рухомого водню у зоні термічного впливу.

Ключові слова: водневе окрихчення, дифузійний водень, термічний цикл, фазові перетворення, зона термічного впливу.

Valeriy Lazaryuk, Ph.D, Assoc. Prof; Zinovii Hrondzal, Ph.D; Andrii Blavitskyi, Pavlo Sokil

INFLUENCE OF THE THERMAL CYCLE ON HYDROGEN BEHAVIOR IN WELDED STEEL JOINTS

Abstract. The influence of the thermal cycle on hydrogen behavior in welded steel joints was analyzed with consideration of phase transformations and hydrogen trapping mechanisms. It was shown that in martensitic steels the post-weld thermal route can affect the redistribution and degassing of diffusible hydrogen through changes in the phase state of the metal. For low-alloy pipeline steels, the role of the ferritic-bainitic microstructure in the formation of hydrogen trapping sites and in reducing the localization of mobile hydrogen within the heat-affected zone was considered.

Keywords: hydrogen embrittlement, diffusible hydrogen, thermal cycle, phase transformations, heat-affected zone.

Серед основних причин сповільненого руйнування зварних з'єднань є структурні неоднорідності, зварювальні напруження та дифузійний водень. Водень залишається одним із головних чинників, що визначають схильність зварних з'єднань сталей до сповільненого та крихкого руйнування. Відповідно до сучасних уявлень про механізм водневого тиску, рекомбінація атомарного водню у молекулярний у мікропорожнинах і дефектах структури може створювати локальний внутрішній тиск, який сприяє зародженню мікротріщин та зниженню опору крихкому руйнуванню, [1]. Зменшення вмісту дифузійного водню є не лише технологічним завданням дегазації зварних з'єднань, а й одним із напрямків підвищення опору крихкому руйнуванню.

Особливу роль у поведінці водню відіграють фазозалежні зміни його розчинності, рухливості та системи пасток у різних структурних складових сталі. У сталях водень перебуває не лише у твердому розчині, а й локалізується у так званих пастках — дефектах структури, межах зерен, інших недосконалоостях структури. Залежно від енергії зв'язку розрізняють оборотні пастки, з яких водень може повторно дифундувати, та пастки з високою енергією зв'язку, здатні утримувати його протягом тривалого часу. Найбільш небезпечним є рухомий водень, який здатний локалізуватись у зонах концентрації напружень та поблизу дефектів структури, [2]. Тому стійкість

сталей до водневого руйнування визначається не лише загальним вмістом водню, а й характером системи пасток та фазовим станом металу.

У мартенситних сталях поведінка водню значною мірою визначається маршрутом фазових перетворень під час охолодження та термічної обробки після зварювання. Для покращення властивостей зварних з'єднань високохромистих сталей мартенситного класу та зменшення вмісту водню у шві може застосовуватись багатостадійне термічне оброблення з проміжним термічним відпочинком при 100–200 °С та подальшим відпуском з метою завершення мартенситного перетворення металу шва та ЗТВ, [3]. Перетворення аустеніту в мартенсит супроводжується зміною розчинності та рухливості водню, що призводить до його перерозподілу між фазами та структурними пастками. Зміна співвідношення між залишковим аустенітом, мартенситом і дефектами структури може впливати на рухливість водню та умови його локалізації. За відповідних режимів відпуску це сприяє частковому видаленню дифузійного водню зі структури. З сучасної точки зору такі процеси можуть розглядатися як фазово-індукований перерозподіл і дегазація водню. Таким чином, термічний маршрут після зварювання виступає не лише засобом керування мікроструктурою, а й способом впливу на рухливість водню, систему його пасток та схильність сталі до воднево-індукованого руйнування.

У низьколегованих трубних сталях механізми впливу термічного циклу на поведінку водню відрізняються від високохромистих мартенситних сталей через переважання феритно-перлітних або феритно-бейнітних структур, а також іншим характером мікроструктурної неоднорідності зони термічного впливу. У таких сталях зниження ризику водневого руйнування пов'язане насамперед із обмеженням локальних зон високої твердості, зменшенням рівня залишкових напружень та зниженням локалізації рухомого водню. При цьому формування дрібнодисперсної бейнітної складової може сприяти формуванню більш стабільної системи водневих пасток, порівняно з твердими мартенситними ділянками у зоні термічного впливу, [4]. Управління фазовим маршрутом в зварних з'єднаннях низьколегованих сталей може розглядатися як мікроструктурний підхід до зниження концентрації рухомого водню та ризику воднево-індукованого руйнування у зоні термічного впливу.

Перелік посилань:

1. Chen Y.-S., Huang C., Liu P.-Y., Yen H.-W., Niu R., Burr P., Moore K. L., Martínez-Pañeda E., Atrens A., Cairney J. M. Hydrogen trapping and embrittlement in metals – A review [Electronic resource] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Vol. 136. – P. 789–821.
2. Tien, I.K. Hydrogen transport by dislocations / I.K. Tien, A.W. Thompson, I.M. Bernstein, R.I. Richards // Met. Trans. – 1976. – V. 7. – № 6. – P. 821-829.
3. Левченко А. М., Гронзаль З. Я., Колесников А. М. Содержание диффузионного водорода в швах при механизированной сварке под флюсом высокохромистых сталей // Автомат, сварка.— 1986.— № 11.— С. 72—73.
4. Sun L., Li M., Fazeli F., Henein H. Effect of bainitic microstructure on hydrogen trapping in a low carbon micro-alloyed pipeline steel // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Vol. 136. – P. 702–712.

УДК 621.326

І.П. Лентюгов, к.т.н, ст. дослідник; В.В. Осін, к.т.н.; А.Ю. Северин к.т.н. ст. дослідник

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, Україна

ОЦІНКА ЯКОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО ШАРУ З ВИСОКОМІЦНОЇ СТАЛІ ВИКОНАНОГО ЗА ДОПОМОГОЮ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Виконано якісно-технологічну оцінку можливості застосування розробленого порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСТФ для здійснення дугової наплавки високоміцної сталі типу 50Х2МНСТФ на підкладку зі сталі Ст3.

Ключові слова: високоміцна сталь, дугове наплавлення, порошковий дріт, твердість, структура.

Ph.D, Sr. Res. I. Lentugov, Ph.D V. Osin, Ph.D, Sr. Res. A. Severyn

Paton Electric Welding Institut of National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

QUALITY ASSESSMENT OF HIGH-STRENGTH STEEL SURFACED LAYER PRODUCED BY ARC SURFACING

A qualitative and technological assessment of the feasibility of using the developed flux-cored wire PP-Np-50Kh2MNSGF for arc surfacing of high-strength steel of the 50Kh2MNSTF type onto a substrate made of St3 steel has been carried out.

Keywords: high-strength steel, arc surfacing, flux-cored wire, hardness, microstructure.

В умовах триваючих бойових дій та підвищеного навантаження на оборонно-промисловий комплекс України питання відновлення та продовження ресурсу високоміцних сталевих конструкцій набуває особливої важливості. Такі високоміцні сталі використовуються як броньова сталь корпусів таких сучасних бронетранспортерів як Patria AMV (Фінляндія), Pandur II (Австрія), FNSS Pars (Туреччина), українських «Дозор-Б» і «Козак», а також в бронекатерах, десантних човнах - СВ90 Н, Combatboat (Швеція), українські катери типу «Гюрза-М». При цьому вони також знаходять застосування як захист стін та інших елементів будівель поліцейських дільниць, банків, держструктур та інших споруд, у виробництві броньованих фургонів та легкових автомобілів, вантажних контейнерів, кар'єрних самоскидах, ковшах екскаваторів та багатьох інших виробів. Основними видами ремонту цього класу сталей є зварювання плавленням та наплавлення дротом, тобто відновлення зношених або зруйнованих ділянок шляхом нанесення шарів присадного металу. Одним із перспективних напрямів ремонту є застосування технологій наплавлення порошковим дротом (ПД). Використання наплавлення як методу ремонту забезпечує локальне відновлення зношених або пошкоджених поверхонь деталей різноманітної техніки без необхідності повної заміни елементів корпусу чи вузлів. Застосування порошкових дротових наплавних матеріалів дає змогу відновлювати твердість відновлюваних деталей до рівня близько 55 HRC, зносостійкість і опір втомі які наближені до характеристик основного металу.

Метою даної роботи є дослідження якості металу наплавленого шару високоміцної сталі методами дугового наплавлення та вивчення можливості їх застосування при ремонті техніки.

Дослідні партії порошкових дротів для наплавлення виготовлялися на лабораторному волочильному стані ОБ-840. Для проведення процесу наплавки використанням наплавочну установку У-653, а у якості джерела живлення

універсальний зварювальний випрямляч ВДУ-506. Все обладнання розташоване в ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України. В якості основного металу використовували пластини зі сталі Ст3 завтовшки 10 мм. Наплавка здійснювалася розробленою в інституті порошковою проволокою ПД-Нп-50Х2МНСТФ діаметром 2,4 мм з коефіцієнтом заповнення 25% під шаром флюсу АН-26П.

З метою перевірки якості наплавленого шару з високоміцної сталі на підкладку зі сталі Ст3, була виконана двопродісна наплавка дуговим способом порошковим дротом ПД-Нп-50Х2МНСТФ, який був додатково мікролегован бором у кількості 0,005%, що сприяє утворенню тонкої структури і запобігає утворенню фериту по межах зерен. Проведений спектральний хімічний аналіз встановив склад наплавленого шару, який наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Хімічний склад наплавленого шару з високоміцної сталі, отриманих способом дугової наплавки

Спосіб наплавки	Масова доля у відсотках, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	B	Fe
ДН	0,50	1,25	0,75	2,1	1,9	0,50	0,73	0,003	основа.

Проведений хімічний аналіз вказує на високолеговану сталь типу 50Х2МНСТФ, яка застосовується для виготовлення особливо відповідальних деталей, що працюють в умовах високих навантажень таких як штампи, пуансони, різальний інструмент, а також у військовій техніці.

На рисунку 1 представлено виготовлений поперечний макрошліф наплавленого шару та його мікроструктура. Загальна товщина підкладки та наплавленого шару склала 21 мм. Візуальний аналіз макрошліфа показав, що в структурі та на межі лінії сплавлення візуально не спостерігаються внутрішні дефекти у вигляді пор, тріщин, несплавлень та включень (рисунок 1 а). Дослідження мікроструктури зразка встановило, що структура наплавленого металу по всій товщині має стовпчастий вид дендритного характеру, яка орієнтована у напрямку відведення тепла і є типовою для загартованого мартенситу з домішками нижнього бейніту, після швидкого охолодження при наплавленні (рисунок 1 б). Ширина зерен становить 30...120 мкм. Дослідження лінії сплавлення показало, що вона є досить чіткою і з боку наплавленого металу має більш дрібніші зерна ніж у металі наплавки в верхній і центральній ділянках - 20...50 мкм (рисунок 1 в). З боку основного металу у лінії сплавлення виявлена перехідна зона шириною 1100...2100 мкм з дрібною структурою розміром 5...30 мкм. Вимірювання твердості отриманого біметалу встановило, що у верхній ділянці наплавленого шару твердість становить 56 HRC, а у центральній зоні наплавленого шару 55 HRC. Твердість в ділянці поблизу лінії сплавлення зі сторони наплавки, має незначне зниження до 53 HRC.

Для оцінки якості наплавленого шару було проведено гарячу обробку тиском отриманого біметалу на прокатному стані при температурі 1150 °С (рисунок 2 а). Деформування біметалу – це завжди пошук компромісу, так як ми маємо класичну «конфліктну» пару - пластична сталь Ст3 та високолегована, схильна до тріщиноутворення сталь 50Х2МНСТФ. Температуру закінчення прокатки контролювали на рівні не нижче 900°С з подальшими підігрівками. Сумарний обтиск заготівлі склав 57%, а кінцева товщина пластини склала 9 мм.

Просвіт деформованого зразка жорстким рентгенівським випромінюванням показав відсутність будь яких дефектів, розміри яких становлять не менше 2% від товщини металу як на лінії сплавлення, так і в основному металі.

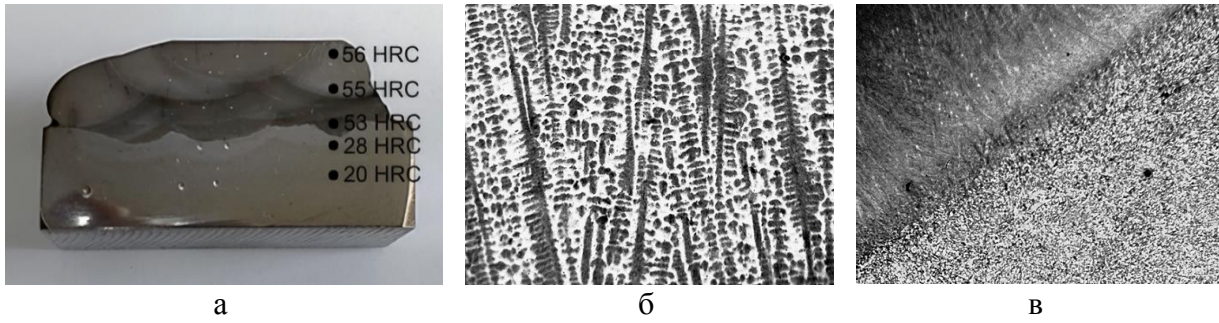


Рисунок 1 Поперечний макрошлів зоготівлі, наплавленою порошковим дротом ПД-Нп-50X2МНСТФ на Сталь 3 (а), мікроструктура (x75) наплавленого шару зі сталі 50X2МНСТФ (б) та мікроструктура (x150) лінії сплавлення (в).

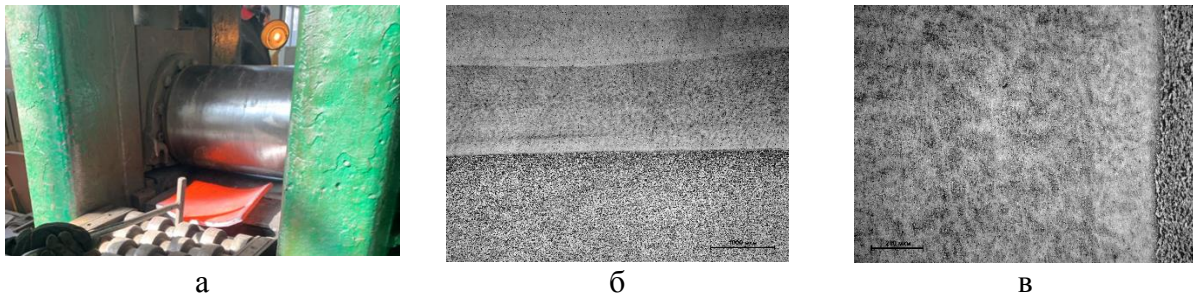


Рисунок 2 Гаряча деформаційна обробка наплавленого полуфабрикату з високоміцної сталі типу 50X2МНСТФ (а) та мікроструктура продеформованого металу після відпалу (б, в).

Для зняття залишкових напружень у прокатаних біметалічних пластинах зі сталі Ст3 з наплавленим шаром зі сталі 50X2МНСТФ застосовували термічну обробку при температурі 550 °С з витримкою 2 години з подальшим повільним охолодженням разом із піччю. Такий режим забезпечує ефективне релаксаційне розвантаження без суттєвого зниження твердості та збереження експлуатаційних властивостей наплавленого шару.

Після прокатки та подальшого відпуску у мікроструктурі наплавленого шару відбулися суттєві морфологічні зміни. Прокатка призвела до руйнування вихідної дендритної литої будови, характерної для металу після наплавлення, та формування деформованої структури (рисунок 2 б). Початкові мартенситно-бейнітні складові зазнають інтенсивної фрагментації, що супроводжується подрібненням структурних елементів. Подальший відпуск забезпечує перехід мартенситу та нижнього бейніту у відпущений стан з виділенням дисперсних карбідів легувальних елементів (Cr, Mo, V), що сприяє структурній стабілізації та зниженню внутрішніх напружень. У перехідній зоні, поблизу лінії сплавлення, внаслідок розбавлення основним металом і меншого вмісту вуглецю та легувальних компонентів формується дрібнодисперсна ферито-перлітно-бейнітна структура, яка характеризується поступовим переходом властивостей від високоміцного наплавленого шару до більш пластичного основного металу (рисунок 2 в). Така градієнтна перебудова структури забезпечує поєднання високої поверхневої твердості та підвищеної тріщиностійкості з'єднання. Профіль мікротвердості демонструє градієнт: від 559 HV (53 HRC) - верх наплавки до 519 HV (51 HRC) нижня частина наплавки, 341 HV (35 HRC) - зона сплавлення та 232 HV (20 HRC) – основний метал Ст3, що зумовлено розбавленням і відмінностями фазових перетворень. Таким чином, прокат руйнує дендритну будову та формує деформовану та більш дрібну структуру наплавленого шару, а відпуск забезпечує її стабілізацію. Отримано функціонально-градієнтний матеріал із поєднанням високої зносостійкості поверхні та підвищеної тріщиностійкості з'єднання.

УДК 621.326

Тарас Майданчук, к.т.н, старший дослідник; Анатолій Бондаренко^a, Євгенія Лук'янченко^a, Сергій Мариненко^b, Дмитро Степченко^a

^aІнститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Україна

^bТернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВОЇ СТАЛІ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВПЛИВОМ НА ЗВАРЮВАЛЬНУ ВАННУ

В проведених дослідженнях визначено вплив електромагнітного поля на зварювальну дугу та поведінка розплаву зварювальної ванни при накладанні полів різних типів та конфігурацій в діапазоні частот від 0 до 1 кГц. З метою визначення кореляції параметрів зовнішнього магнітного поля з власними коливаннями зварювальної ванни розроблена методика реєстрації останніх та досліджено їх спектр. Визначені оптимальні режими зварювання та параметри керуючого магнітного поля при зварюванні з впливом на зварювальну ванну пульсуючого поздовжнього реверсивного електромагнітного поля. Оцінка якості швів, виконаних розробленою технологією показала суттєві переваги порівняно зі звичайним аргонодуговим зварюванням при неprecizійній зборці зварюваних конструкцій.

Ключові слова: зварювання, коливання, магнітне поле, індукція, постійні, перемінні, пульсуючі, реверсні електромагнітні поля, резонансні частоти, збірка стика

Taras Maydanchuk^a, Anatolii Bondarenko^a, Yevheniia Lukianchenko^a, Sergiy Marynenko^b, Dmytro Stepchenko^a

^aE.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

^bTernopil Ivan Pului National Technical University, Ukraine

WELDING OF THIN-SHEET STEEL WITH ELECTROMAGNETIC INFLUENCE ON THE WELD POOL

The influence of electromagnetic influence on the welding arc and the behavior of the weld pool melt, optimal welding modes and parameters of the control magnetic field when applying fields of various types and configurations have been determined.

Key words: welding, oscillations, magnetic field, induction, electromagnetic fields

Для зварювання металів малих товщин (0,2...2 мм) широке розповсюдження знайшов спосіб аргонодугового зварювання неплавким електродом. Обладнання для цього процесу легко адаптується для роботи у складі механізованих та автоматизованих ліній. Проте для отримання якісних зварних з'єднань, особливо при автоматичному зварюванні, до збирання стику та підготовки кромки пред'являють високі вимоги, виконання яких досить утруднено, особливо при зварюванні швів великої протяжності та швів, де утруднений візуальний контроль за якістю збирання стику.

Одним із способів підвищення якості зварного шва, що знайшов широке застосування, є вплив на зварювальну дугу та метал зварювальної ванни зовнішніми магнітними полями [1]. Це дозволяє регулювати процеси як в самій зварювальній дузі, так і в рідкому металі зварювальної ванни, що дає можливість управляти кристалізацією зварювальної ванни і формуванням шва.

Головною особливістю дугового зварювання є те, що в ділянці активного технологічного процесу речовина присутня у вигляді слабоіонізованої плазми, газу, рідини та твердого тіла. У кожному з цих станів відбуваються коливальні процеси [2, 3], що характеризуються певними частотами. Причому діапазон частот дуже великий: від

плазмових коливань в районі сотень МГц до акустичних хвиль у сотні кГц, що виникають при утворенні та зникненні бульбашок газу, а також мікротріщин при кристалізації та інфранизьких частот коливань ванни розплаву.

Наявність коливальних процесів в зварювальній ванні та їх роль в процесі формування шва зумовила доцільність вивчення впливу зовнішніх джерел коливань на метал зварювальної ванни з метою управління якістю зварних швів.

Аналіз літературних даних показав, що практично немає досліджень по магнітному управлінню зварювальним процесом при зварюванні металу товщиною до 2 мм. Крім того, мало вивчено вплив магнітних полів різних конфігурацій на формування і структуру зварних швів, які отримують за допомогою малоамперних дуг в широкому діапазоні частот, починаючи з інфранизьких – менше 1 Гц, і до 1 кГц, а також дані і щодо впливу на зварювальну ванну магнітних полів з частотами близькими до частот власних коливань зварювальної ванни.

Метою даної роботи є дослідження поведінки зварювальної ванни при впливі на дугу та рідкий метал магнітних полів різної конфігурації; визначення оптимальних умов управління якістю швів з допомогою магнітного поля при автоматичному аргонодуговому зварюванні; виявлення роздільних і сукупних умов отримання якісних зварних з'єднань при неprecизійному збиранні зварюваних крайок.

Методика досліджень. Зварювання виконувалось струмом прямої полярності від джерела ВСВУ-315 неплавким вольфрамовим електродом \varnothing 3 мм заточеним на конус у 60° і притуплення 0,5 мм. Довжина дуги у всіх експериментах залишалась постійною – 1,5 мм, що відповідало напрузі 9 В. В якості зварюваного металу використовували зразки зі сталей 08КП та Х18Н9Т товщиною 0,8 і 2 мм. Магнітне поле в зоні зварювання створювалось магнітною лінзою соленоїдального типу, змонтованого на соплі пальника. Керуючий сигнал створювався генератором-синхронізатором функцій, завдяки якому, вводячи необхідні параметри через його програмний пристрій, можна отримувати в зоні зварювання магнітні поля різних типів.

Виконувались зварні шви стикових з'єднань в нижньому положенні на графітовій підкладці та на весу, горизонтальні шви на вертикальній площині – стикові та по відбортовці. При зварюванні кожного типу зварного з'єднання вимірювались частота та амплітуда власних коливань зварювальної ванни і відповідно до цих значень задавалась частота зовнішнього магнітного поля. Застосовувались реверсивні пульсуючі магнітні поля з віссю симетрії при нульовому значенні (В). Частота реверсування при цьому задавалась тривалістю групи імпульсів в позитивній та негативній областях магнітної індукції. Кількість імпульсів в групі залишалась постійною – рівною п'яти. Конфігурація магнітного поля зумовлена найбільшою стабільністю зварювальної дуги, яка визначалась осцилографуванням значень зварювального струму та напруги на дузі. Величина магнітної індукції змінювалась від 0 до ± 15 мТл. Результати вимірів параметрів власних коливань зварювальної ванни досліджуваних товщин металів і типів зварних з'єднань наведені в таблиці 1.

Отримані результати. При зварюванні тонколистового металу для отримання якісних швів необхідно суворо витримувати співвідношення в режимах особливо при наявності неточностей в зборці стику. Підбором режимі зварювання усунути дефекти, що з'являються, вдається не завжди. Використання технології магнітокерованого аргонодугового зварювання має суттєві переваги. Накладання пульсуючих магнітних полів в резонансному із власними коливаннями ванни діапазоні частот дозволяє підвищити стабільність якості швів навіть при значних неточностях збірки крайок.

Використання магнітного поля дозволяє отримувати стабільну якість зварних швів при збільшенні зазору, більше ніж у 4...8 раз (в залежності від товщини металу). Встановлено також, що переважання крайок може складати до 20% від товщини металу

без втрати якості зварного з'єднання, що переважає допустиме при звичайному зварюванні у 2...3 рази. Величини допустимого відхилення дуги також зростає в 2...3 рази і складає 1,5...2...0 товщини крайок. Також слід зазначити, що інтенсивний рух рідкого металу, який виникає при електромагнітному впливі на ванну, достатньо впливав на її дегазацію і отримання щільних швів. Дефекти у вигляді пор були відсутні на всіх досліджуваних зразках при зварюванні з електромагнітним впливом. В той самий час при зварюванні звичайною дугою, особливо при зварюванні по відбортовці, час від часу візуально спостерігались дефекти у вигляді раковин та свищів. Подрібнення структури шва сприяло також і відсутності тріщин.

Таблиця 1

Тип зварного з'єднання		Товщина зварюваного металу, мм	Частота, Гц	Амплітуда, mV
В нижньому положенні	стикове на весу	0,8	75...80	130...140
		2,0	55...60	100...110
	на підкладці	0,8	110...120	80...90
		2,0	85...90	65...70
Горизонтальне на вертикальній площині	стикове на весу	2,0	45...50	110...120
	по відбортовці	0,8	90...100	75...80
		2,0	70...85	55...60

Примітка: зварювання виконувалось при ретельному збиранні стику по зачищеним та обезжиреним крайкам. $I_{д. - const} = 2$ мм для:

- $\delta = 0,8$ мм, $I_{зв.} = 40...50$ А, $V_{зв.} = 30...35$ м/год;
- $\delta = 2,0$ мм, $I_{зв.} = 80...100$ А, $V_{зв.} = 20...25$ м/год.

Застосування магнітних полів розширює можливість управління рухом рідкого металу при зварюванні на весу, особливо при виконанні швів на горизонтальній площині. Тобто підбором режиму зварювання можна отримати шви аналогічні виконаним на підкладці (без посилення). Таким чином характерною відмінністю зварювання з електромагнітним впливом від звичайного аргонодугового зварювання є те, що цим способом можна отримати необхідну форму шва, управляючи рухом зварювальної ванни, підібравши відповідний характер магнітного поля

Суттєвою перевагою даної технології є і те, що використання резонансного впливу на зварювальну ванну дозволяє використовувати магнітні поля з малою величиною магнітної індукції. При зварюванні товщин до 2,0 мм достатньо магнітного поля з індукцією не більше 0,15 Тл, що дозволяє впливати на розплави електромагнітами невеликої потужності і габаритів, які можуть бути легко скомпоновані з серійними пальниками для аргонодугового зварювання.

Висновки

На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Зварювання з електромагнітним впливом є процесом більш гнучким у порівнянні зі звичайним аргонодуговим зварюванням.

2. Вивчення особливостей формування шва під впливом магнітних полів показало можливість управління формування зварного шва при зварюванні різних типів з'єднань в різних просторових положеннях.
3. При зварюванні з електромагнітним впливом реверсивного пульсуючого магнітного поля на резонансних частотах, встановлено, що оптимальне значення магнітної індукції знаходиться в зворотньопропорційній залежності від зварювального струму і прямопропорційній від швидкості зварювання.
4. Оптимізація режимів зварювання і параметрів управляючого магнітного поля при зварюванні з електромагнітним впливом дозволили суттєво знизити вимоги до точності збирання стиків без порушення якості зварних швів. Були встановлені діапазони режимів зварювання і максимально допустимі відхилення в зборці стику при виконанні зварних швів без електромагнітного впливу, що забезпечують отримання бездефектних зварних швів.
5. Можливість зниження вимог до збирання стиків, чистоті зварюваних крайок у сукупності з простотою використовуваного обладнання визначає доцільність використання цього способу зварювання в різних областях машинобудування.

Перелік посилань

1. Juanyan Miao, Yiwen Li, Siyu Zhang, Honglei Zhao, Wenfeng Zou, Chenhe Chang and Yunlong Chang. Magnetic controlled arc welding technology: a review // Rapid Prototyping Journal. – 2024. – **30 (9)**. – P. 1929-1955.
2. Черныш В.П., Кузнецов В.Д., Брискман А.Н. и др. Сварка с электромагнитным перемешиванием. Под ред. В.П. Черныш. Киев; Техника, 1983. 127с.
3. Демьянцевич В.П., Матюхин В.И. Особенности движения жидкого металла в сварочной ванне при сварке неплавящимся электродом // Сварочное производство. – 1979. – 3. – С. 1-3.

УДК 621.326

Тарас Майданчук, к.т.н.; старший дослідник; Дмитро Степченко^a, Сергій Мариненко^b, Євгенія Лук'янченко^a

^aІнститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Україна

^bТернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТАЛОПОРОШКОВОГО ДРОТУ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ МІДІ З ВИСОКИМИ ПОКАЗНИКАМИ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Проведені порівняльні експериментальні дослідження впливу додавання бора, цирконію та карбіду цирконія на зварювально-технологічні та механічні властивості, а також показники електропровідності зварних з'єднань міді. Були вивчені особливості формування мікроструктури отриманого з'єднання. Дослідження показали, що введення 1,5...2,0 % В та Zr кожного в склад шихти металопорошкового дроту значно змінюють структуру металу шва, що позитивно впливає на механічні властивості. Результати досліджень свідчать, що механічні властивості наплавленого металу дослідними металопорошковими дротами знаходяться на рівні міді марки М1. Це пов'язано з дрібнозернистою структурою наплавленого металу, та рівномірному розподіленню легуючих компонентів по металу шва. Електропровідність металу зварного з'єднання отриманого з застосуванням метало-порошкового дроту марки становить 95,0 % від чистої міді.

Ключові слова: мідь, металопорошковий дріт, модифікуючі компоненти, механічні властивості, електропровідність.

Taras Maydanchuk^a, Dmytro Stepchenko^a, Sergiy Marynenko^b, Yevheniia Lukianchenko^a

^aE.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

^bTernopil Ivan Pului Technical University, Ukraine

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF METAL POWDER WIRE FOR COPPER WELDING WITH HIGH ELECTRICAL CONDUCTIVITY INDICATORS OF WELDED JOINTS

Comparative experimental studies of the effect of adding boron, zirconium, and zirconium carbide on the welding, technological and mechanical properties, as well as the electrical conductivity of welded copper joints were conducted. The features of the formation of the microstructure of the resulting joint were studied.

Key words: copper, metal powder wire, modifying components, mechanical properties, electrical conductivity

На сьогоднішній день в світі виготовляється близько 23 млн. тон міді та мідних сплавів в рік, і попит на дані кольорові метали підвищується щорічно приблизно на 2...3%. Завдяки специфічним властивостям вони широко використовуються в машинобудівному комплексі. Незважаючи на дефіцитність та високу вартість, мідь є незамінним матеріалом при виготовленні деталей в різних галузях промисловості: енергомашинобудуванні, металургії, де важливим показником являється тепло- та електропровідність.

Одним з найбільш широко застосовуваних способів зварювання міді є TIG-процес з використанням присадних матеріалів.

Матеріали, які використовують зараз (сплави БрКМц3-1, МНЖКТ 5,0-1,0-0,2-0,2 та ін.) забезпечують тепло- та електропровідність наплавленого металу на рівні не вище 30% від чистої міді. Це призводить до погіршення службових характеристик виробів, зниження терміну їх експлуатації, унеможливує відновлення робочих поверхонь з чистої міді з метою подальшої експлуатації виробів (наприклад плити кристалізаторів МНЛЗ). Аналіз літературних даних свідчить [1-4], що використання невеликої кількості (0,1...0,5%) високоактивних розкислюючих, модифікуючих та легуючих компонентів дозволить набутти високих характеристик тепло- та електропровідності (на рівні 65...80% по відношенню до міді). При цьому виготовлення металопорошкового дроту є достатньо економічним способом отримання зварювального матеріалу для зварювання міді, та являється перспективним.

Основною метою роботи є покращення якості та службових характеристик металу зварних швів міді шляхом введення певних компонентів у склад металопорошкового дроту. Дані елементи мають забезпечити ефективне розкислення зварювальної ванни, покращити зварювально-технологічні властивості металопорошкового дроту (стабільність процесу, хороше формування шва, відсутність пористості), та підвищити показники електропровідності металу шва й зварного з'єднання.

Методика досліджень. Найбільш доступним методом введення легуючих елементів в метал зварного шва є введення порошкоподібних елементів в склад металопорошкового дроту. Дана методика характеризується простотою технології виготовлення зварювального дроту, відсутністю необхідності використання специфічного обладнання, наявністю відпрацьованих методів проведення випробувань зварювально-технологічних властивостей дротів та наплавлення металу для отримання зразків для випробування механічних властивостей. Виготовлення порошкових дротів проводили згідно класичної методики, яка складається з наступних операцій: підготовка мідної стрічки; підготовка наповнювача; формування профілю і засипання його наповнювачем; волочіння дроту до досягнення заданого діаметра.

Під час виготовлення дослідних дротів використовувалася мідна стрічка марки М1М (ГОСТ 1173-93). Всього було виготовлено 9 дослідних дротів із введенням бора цирконію та карбіду цирконія, а також шляхом введення даних компонентів комплексно. Дані елементи вводили в кількості 1,0...3,0% в склад шихти металопорошкового дроту. Також додавали такі компоненти як польовий шпат, флюорит, соду та буру, які покращують захист поверхні розплавленого металу шва та дещо знижують його поверхневий натяг.

Усі досліді (по три для кожного варіанта) здійснювали шляхом зварювання зразків з міді марки М1 товщиною 10 мм в нижньому положенні постійним струмом прямої полярності від випрямляча ВДУ-506УЗ.

Для реєстрації та подальшого аналізу параметрів процесу дугового зварювання використовувалось наявне обладнання на базі аналого-цифрового перетворювача ADA-1406. В якості захисного газу використовували аргон 1 сорту.

При цьому використано дві схеми зварювання: в першому випадку зварювання проводили «один по одному» з метою забезпечення необхідного розміру по висоті для вирізки зразків МІ-12 тип І, які використовуються при випробуванні межі текучості, межі міцності, відносного подовження, відносного звуження та показників електропровідності наплавленого металу; у другому буде проводитись стикове зварювання мідних пластин товщиною 8-10 мм. З отриманих зварних з'єднань виготовлені зразки для оцінки службових властивостей металу та зроблені шліфи для дослідження структури металу шва.

Шліфування та полірування шліфів виконувалось на лабораторній шліфувальній машині. Дослідження структурних особливостей зварних швів та наявність дефектів –

пори, несплавлення їх структурні особливості досліджуватимуться за допомогою мікроскопа МИМ-7.

Методика вимірювання питомої електропровідності, заснована на сигналі з еталоном відповідно до ГОСТ 27333-87 «Вимірювання електричної провідності кольорових металів вихровим методом». Зразки для товщини малий діаметр не менше 15 мм, товщина - не менше 1,25 мм, шорсткість поверхні $R_a \leq 0,63$ мкм.

Електропровідність сплавів визначатиметься за допомогою приладу "SMP-1" ("Сигмаскоп" виробництва фірми "X.Fischer", Німеччина). Точність вимірювання становила $\pm 2\%$, температура під час вимірювань підтримувалася на рівні $+20$ °С.

Отримані результати. Дослідження зварювально-технологічних властивостей проводились з урахуванням наступних показників: стабільність плавлення дроту, якість формування шва, наявність пор в металі шва, газовиділення та випаровування компонентів, продуктивність процесу.

Всі наплавки відбувались на постійному струмі при прямій полярності.

Режими наплавлення визначались з умовою формування наплавленого зварювальної ванни та розплавлення присадного металопорошкового дроту.

Результати досліджень зварювально-технологічних властивостей свідчать про хорошу стабільність процесу наплавлення без обривів дуги та значних стрибків параметрів режиму при застосуванні всіх досліджуваних металопорошкових дротів;

В усіх наплавлених валиках поверхня дрібночешуйчата, без підворотів та інших поверхневих дефектів. При цьому у наплавленому металі дротом без розкислюючих елементів в складі шихти вже в першому шарі виявлені пори; при додаванні карбіду бора в склад металопорошкового дроту зафіксоване погане формування наплавлених валиків; якісне формування швів та відсутність пор зафіксовано при застосуванні дротів, в складі яких присутні такі компоненти як флюорит та польовий шпат. Додавання бури та соди не призвело до суттєвого покращення формування валиків. Помічено, що присутність карбіду бора суттєво підвищує поверхневий натяг розплавленого металу та погіршує зварювально-технологічні властивості дротів.

Продуктивність наплавлення та показники втрат металу на випаровування та газовиділення і також питома кількість теплоти, що витрачається на розплавлення одиниці маси у всіх випадках знаходяться приблизно на одному рівні.

Тому по зварювально-технологічним властивостям кращими являються металопорошкові дроти, в складі яких присутні шлакоутворюючі компоненти (флюорит, польовий шпат, сода) в кількостях що не перевищує 2,0% в шихті, які дещо покращують формування наплавлених валиків та захист наплавленого металу.

Встановлено, що при використанні металопорошкового дроту, в складі якого присутні бор та цирконій, режими зварювання необхідно підвищити в середньому на 8...15%, оскільки через підвищені показники поверхневого натягу металу шва не досягається отримання якісного формування зварного шва, особливо кореневого.

Характерним для металу шва в порівнянні з основним металом та металом шва, в складі якого присутні легуючі елементи кремній та марганець, є більш дрібнозерниста структура, яка залежить від температурно-часових умов кристалізації та наявності бора з цирконієм, які виконують роль комплексних модифікаторів.

Встановлено, що наявні домішки-модифікатори в складі металопорошкового дроту забезпечують отримання механічних властивостей на рівні основного металу. Всі зразки витримали випробування на загин на 180 град.

Крім того, показники електропровідності зварних з'єднань із міді товщиною 10 мм отримані при застосуванні металопорошкових дротів в складі шихти яких присутні бор (1,5%) та цирконій (2,0%) становить 90-95% від чистої міді.

Висновки

1. Визначено оптимальний склад металопорошкових дротів для зварювання міді, які мають високі зварювально-технологічні властивості.
2. Дослідження показують, що введення 1,5...2,0 % В та Zr кожного в склад шихти дроту значно змінюють структуру металу шва, що позитивно впливає на механічні властивості.
3. Визначено оптимальні параметри процесу зварювання та наплавлення міді методом ТІГ з застосуванням дослідних дротів. Встановлено, що при використанні дослідних дротів з вмістом бору та цирконію необхідно на 8...12 % підвищувати параметри режимів зварювання у зв'язку з підвищенням поверхневого натягу металу та відповідно, погіршенням формування зварного шва.
4. Результати механічних досліджень свідчать, що механічні властивості наплавленого металу дослідними металопорошковими дротами знаходяться на рівні міді марки М1, що пов'язано з дрібнозернистою структурою наплавленого металу та рівномірному розподіленню легуючих компонентів по зварному шву.
5. Електропровідність металу зварного шва отриманого з застосуванням металопорошкового дроту з вмістом 1,5% бору та 2,0% цирконію становить 95,0 % від чистої міді.

Перелік посилань

1. Смирязин А.П., Смирязина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургия, 1974. 488 с.
2. Сучков Д.И. Медь и ее сплавы. М.: Металлургия, 1967. 248 с.
3. Лебедев К.П., Райнес Л.С., Шемтов Г.С. и др. Литейные бронзы. Л.: Машиностроение, 1973. 312 с.
4. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. Конструкционные материалы: Справочник. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 668 с.

УДК 621.326

Тарас Майданчук^a, к.т.н., старший дослідник; Андрій Ганчук^a, Євгенія Лук'яненко^a, Сергій Мариненко^b, Анатолій Бабинець^c, к.т.н., ст. наук. співр.

^aІнститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Україна

^bТернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

^cДержавний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ), Україна

ОСОБЛИВОСТІ З'ЄДНАНЬ МІДНИЙ СПЛАВ – СТАЛЬ МАРКИ 20X13, ОТРИМАНИХ ПЛАЗМОВО-ДУГОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

Дослідним шляхом визначено оптимальні режими плазмово-дугового наплавлення мідних сплавів досліджуваними дротами на сталь 20X13, які забезпечують ширину валику 28...38 мм та висоту наплавленого валику до 5,0 мм при мінімальному переході заліза в наплавлений метал та при цьому продуктивність процесу наплавлення становить 4,5...5,4 кг/год. Встановлено, що в наплавленому металі, присутня друга фаза на основі заліза, переважно сферичної форми, розміром 20-100 мкм та твердістю 916...4300 МПа. Проведені механічні та металографічні дослідження показали, що структура наплавленого металу металопорошковим дротом PDM-1 однофазна з твердістю HV 0,1 940-1050 МПа; у зразку наплавленого металопорошковим дротом PD-Sn10P1 структура двофазна, з наявністю дендритів першого та другого порядку та твердістю 1710...1760 МПа. Визначено, що зона термічного впливу (ЗТВ) має показники мікротвердості в 1,7...2,0 рази вищі чим металу без термічного впливу, що пояснюється наявністю бейніту з відпущеним мартенситом..

Ключові слова: мідні сплави, steel X20Cr13, PAW surfacing process, режими наплавлення, зона термічного впливу, структура, мікротвердість, фізико-механічні дослідження

Taras Maydanchuk^a, Andrii Hanchuk^a, Yevheniia Lukianchenko^a, Sergiy Marynenko^b, Anatolii Babinets^c

^aE.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine

^bTernopil Ivan Pului Technical University, Ukraine

^cThe State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (SSTC NRS), Ukraine

FEATURES OF COMPOUNDS COPPER ALLOY – STEEL GRADE X20Cr13 OBTAINED BY PLASMA ARC SURFACING

The optimal conditions for plasma arc deposition of copper alloys onto X20Cr13 steel using the investigated wires were determined experimentally. These conditions provide a bead width of 28–38 mm and a bead height of up to 5.0 mm with minimal iron transfer into the deposited metal, while the deposition process productivity reaches 4.5–5.4 kg/h.

Key words: copper alloys, steel X20Cr13, PAW surfacing process, structure, physical and mechanical investigations

На сьогоднішній день сплави на основі міді, мають широке застосування в вузлах і парах тертя машин і механізмів, що працюють в умовах підвищеного зношення при різних режимах експлуатації [1-3]. Цьому в значній мірі сприяє поєднання їх фізичних і технологічних властивостей. Оскільки мідні сплави відносяться до дефіцитних і дорогих матеріалів, а також сплавів, на які постійно зростає попит, актуальною є задача бережного їх використання. Заміна монолітних деталей, отриманих з мідних сплавів,

біметалевими – частково може бути успішно вирішена шляхом наплавлення на сталь, із застосуванням різноманітних зварювальних процесів [4-8] (TIG, MIG, SAW, PAW). Одним із найбільш ефективних способів наплавлення на сталь є плазмово-дуговий спосіб (PAW), який дозволяє в широкому діапазоні регулювати енергетичні характеристики джерела нагріву та регулювання проплавлення сталі [7].

Метою даної роботи є оцінка можливості отримання якісних біметалевих з'єднань мідний сплав – сталь 20X13 на основі проведених комплексних досліджень із застосуванням PAW-процесу наплавлення низьколегованого мідного сплаву металопорошковим дротом PDM-1 та висококов'яної бронзи металопорошковим дротом PD-Sn10P1 на сталь X20Cr13.

Матеріал та методика досліджень. З метою оцінки можливості отримання якісних біметалевих з'єднань мідний сплав – сталь 20X13 проведені комплексні дослідження із застосуванням PAW-процесу зварювання. Для експериментальних робіт використовували циліндричні зразки зі сталі мартенситного класу легованих сталей марки X20Cr13 діаметром 130 мм та довжиною 400 мм з товщиною стінки 12 мм. В якості присадних матеріалів використовувались металопорошкові дроти, розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона марок ПДМ-1 та ПД-БрОФ10-1, які забезпечують хімічний склад наплавленого металу типу низьколегованого мідного сплаву та висококов'яної бронзи відповідно.

Плазмово-дугове наплавлення виконувалось на модернізованій установці УД-417.

Візуально визначалась наявність пор та макроструктура при 5-7 кратному збільшенні на мікроскопі МИМ-7. Також проводилась капілярна дефектоскопія із застосуванням a set of penetrating components from SREM Technologie, France.

Дослідження мікроструктури проводили методами світлової мікроскопії (мікроскопи Neophot-32 і Versamet-2, Японія) зі збільшенням $\times 90$, $\times 140$, $\times 200$ та $\times 400$. Твердість по Роквеллу вимірювали на твердомірі Суперроквел HRSD-3 (фірма МІКРОТЕХ, Україна) при навантаженні на алмазну піраміду 147 Н.

Для визначення геометричних розмірів поперечного перерізу наплавлених валиків та ЗТВ застосовували програму Compas-3D V16.

Отримані результати. На модернізованій установці УД-417 проведено плазмово-дугове наплавлення металопорошковими дротами марок PDM-1 та PD-Sn10P1 мідних сплавів на циліндричні зразки зі сталі X20Cr13 (PAW-процес) та визначено оптимальні режими наплавлення валиків шириною від 28 до 38 мм та висотою до 5,0 мм, що забезпечують перехід заліза в наплавлений метал менше 4,0%.

Виконано комплекс фізико-механічних та металографічних досліджень наплавленого металу, перехідної зони та зони термічного впливу, візуально визначалась наявність пор і якість формування зварних з'єднань.

За результатами візуального огляду, дослідженні макро- та мікроструктур та проведення кольорової дефектоскопії в деяких випадках виявлено наявність міжзеренних проникнень бронзи в сталь протяжністю до 1900 мкм, що пов'язано як з хімічним складом основного металу(сталі) та наплавленого металу, так із погонною енергією процесу наплавлення.

Також металографічні дослідження показали:

- у всіх зразках в наплавленому металі присутня друга фаза на основі заліза, в основному глобулярної форми, розміром 20-70 мкм та твердістю 257-430 кгс/мм²;
- в перехідній зоні мідний сплав – сталь зі сторони сталі фіксується світло травна зона шириною 300-800 мкм, яка має твердість 383-421 кгс/мм²;
- рівень мікротвердості ділянки ЗТВ, що прилягає до лінії світло травної зони завширшки 1600-3000 мкм для всіх досліджуваних зразків практично не відрізняється і складає в межах HV 0,1 – 383-401 кгс/мм², що пояснюється наявністю бейніту із

відпущеним мартенситом. При цьому твердість основного металу становить 236-245 кгс/мм².

Дослідним шляхом визначено оптимальні режими плазово-дугового наплавлення досліджуваними дротами на сталь 20X13, які забезпечують продуктивність процесу наплавлення на рівні 4,0...4,5 кг/год та мінімальний перехід заліза в наплавлений метал.

Висновки

В результаті проведених комплексних досліджень розроблено принципову технологію плазово-дугового наплавлення із застосуванням присадних дротів марок ПДМ-1 та ПД-БрОФ10-1. При цьому забезпечується якісне бездефектне зварне з'єднання, отримання щільних швів з достатньо високими механічними властивостями та мінімальною зоною знеміцнення.

Перелік посилань

1. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. Конструкционные материалы: Справочник. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.:Машиностроение, 1990. 668 с.
2. Freudenberger, J. and Warlimont, H. Copper and Copper Alloys. In Springer Handbook of Materials Data; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 297–305.
3. Davis J.R. Copper and Copper Alloys; ASM International: Materials Park, OH, USA, 2001.
4. Maydanchuk T., Lukianchenko Y., Kozulin S., Porohonko V. and Marynenko S. Development of a fundamental technology for repairing products made of CuZn37 brass through TIG welding . Procedia Structural Integrity. Vol. 59, 2024, P. 399-406. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.057>
5. Skorupa A. and Goral T. Influence of technological parameters of MIG surfacing on bronze padding weld geometry on the steel substrate. Przegląd Splawalnictwa. 2012. – 3. P.41-47.
6. Naduch J. Single-ply filling bronze with the TIG method. Przegląd Splawalnictwa. 2009. – 3. P.9-13.
7. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. К.: Екотехнологія, 2013. 400 с.
8. Илюшенко В.М., Лукьянченко Е.П. Сварка и наплавка меди и медных сплавов. К.: Международная ассоциация «Сварка», 2013. 396 с

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., старший викладач, Анатолій Мініцький, д.т.н., професор Віталій Михайліченко, аспірант Роман Марчук, магістрант

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

Іван Вдовиченко, Дмитро Вдовиченко

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ ТА ПЕРЕВАГИ ТЕХНОЛОГІЇ WAAM ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ КРИВОЛІНІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Досліджено переваги WAAM для виготовлення складних тонкостінних деталей. Порівняно методи GMAW та GTAW, обґрунтовано ефективність GTAW-процесу для забезпечення точності, чистоти швів та контролю термічного циклу при наплавленні тонкостінних криволінійних елементів.

Ключові слова: WAAM, адитивне виробництво, GTAW, тонкостінні конструкції, криволінійна геометрія.

Serhii Minakov, Yevgenia Chvertko, Nataliia Strelenko, Anton Minakov, Denys Stepanov, Anatolii Minitzkyi, Vitalii Mykhailichenko, Roman Marchuk, Ivan Vdovychenko, Dmytro Vdovychenko

CONCEPTUAL FOUNDATIONS AND ADVANTAGES OF WAAM TECHNOLOGY FOR THE FABRICATION OF THIN-WALLED CURVILINEAR STRUCTURES

The advantages of WAAM for producing complex thin-walled parts are investigated. GMAW and GTAW methods are compared, justifying GTAW's efficiency in ensuring precision, weld cleanliness, and thermal cycle control for depositing thin-walled elements with curvilinear geometry.

Keywords: WAAM, additive manufacturing, GTAW, thin-walled structures, curvilinear geometry.

Виготовлення тонкостінних деталей зі складною кривизною традиційними методами субтрактивного виробництва, такими як механічна обробка (фрезерування), стикається з низкою критичних обмежень. Основними проблемами є величезні обсяги відходів матеріалу, тривалі цикли виробництва та висока ймовірність деформації деталей під час зняття шарів металу. Технологія Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), яка базується на використанні електричної дуги (GMAW, GTAW або плазмової) для плавлення дроту, пропонує принципово інший підхід. Замість видалення зайвого матеріалу, вона дозволяє створювати об'єкти методом пошарового наплавлення, що докорінно змінює підходи до проектування та виробництва великогабаритних компонентів.

Однією з ключових переваг WAAM є максимально ефективне використання сировини. Процес дозволяє отримувати вироби форми «near-net-shape» (максимально наближеної до заданої), що практично нівелює потребу у видаленні великих обсягів металу.

У субтрактивному виробництві при створенні тонких стінок часто доводиться використовувати масивні блоки металу для забезпечення жорсткості при затисканні в

інструменті. WAAM наносить матеріал лише там, де це необхідно, що є вагомою економічною та екологічною перевагою.

Використання комерційно доступного зварювального дроту як витратного матеріалу замість оригінальних металевих порошків, що застосовуються в методах SLM або EBM, суттєво знижує загальну вартість виробництва.

Завдяки поєднанню високої швидкості наплавлення та низької вартості матеріалу, собівартість великих тонкостінних деталей стає значно нижчою, ніж при механічній обробці чи інших методах 3D-друку.

Адитивне виробництво відкриває нові можливості для створення складних геометрій, які раніше вважалися неможливими для практичної реалізації. Керування траєкторією наплавлення дозволяє створювати органічні криволінійні форми, критично важливі, наприклад, для аерокосмічної та автомобільної галузей. Це дозволяє оптимізувати жорсткість конструкцій, вагу та аеродинамічні властивості, наприклад, при виготовленні ребер жорсткості літаків або корпусів резервуарів.

Швидкість наплавлення в WAAM може досягати кількох кілограмів на годину. Це дозволяє застосовувати дану технологію для створення великогабаритних структур (розміром у кілька метрів), де швидкість виробництва є вирішальним фактором. Гнучке планування траєкторії руху пальника дозволяє виконувати безперервне наплавлення вздовж контуру, що зменшує потребу у використанні додаткових допоміжних структур.

Попри можливу анізотропію мікроструктури, сучасні стратегії керування процесом дозволяють отримувати високі експлуатаційні характеристики.

Використання міжшарового охолодження, прокатки або термічної обробки допомагає керувати розміром і орієнтацією зерен металу. Для тонких стінок характерне швидке охолодження, що часто призводить до утворення дрібнозернистої, міцної структури.

Матеріал, отриманий методом WAAM, зазвичай є щільним і має низьку пористість, що забезпечує високі показники міцності та пластичності для відповідальних конструкцій.

У роботі детально проаналізували переваги методу дугового зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах (GTAW) над напівавтоматичним зварюванням (GMAW). GTAW забезпечує надзвичайно чисті шви без бризок і шлаку, що гарантує привабливий зовнішній вигляд (ефект «стопки монет») і зменшує потребу в подальшій обробці. Використання неплавкого електрода дозволяє точно регулювати подачу тепла та присадкового матеріалу. Це забезпечує низьке тепловкладення, що мінімізує деформації та запобігає прожогам при роботі з тонкими матеріалами. Також цей метод може бути успішно застосований для зварювання алюмінію, нержавкої сталі та титану, які важко обробляти за допомогою систем з активними газами та плавким дротом.

Незважаючи на порівняно високу продуктивність GMAW, метод GTAW виграє в питаннях якості, точності та контролю термічного циклу. Це робить його найбільш доцільним для дослідження в контексті виготовлення тонкостінних криволінійних деталей як зі сталей групи 1.1 за ISO/TR 15608, так і в перспективі виокологованих.

Використання GTAW-WAAM дозволяє значно скоротити терміни виробництва та ланцюги постачання, забезпечуючи можливість швидкого прототипування та ремонту складних компонентів.

Таким чином, технологія представляє собою ефективне, економічно вигідне та гнучке рішення для сучасного промислового виробництва.

УДК 531.374

Паньків М.Р., д.т.н., професор; Мариненко С.Ю., к.т.н., доцент; Паньків В.Р., к.т.н., доцент

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ТОЧКОВОГО КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Точкове контактне зварювання (ТКЗ) широко використовується для з'єднання різних металів та сплавів, так як воно забезпечує високу швидкість роботи. Точкове зварювання поєднує в собі взаємопов'язані теплові, електричні, електромагнітні та механічні явища, що відбуваються за частки секунди. Заміна дороговартісних натурних експериментів чисельним аналізом для прогнозування якості з'єднання та оптимізації параметрів є актуальною науковою проблемою.

Ключові слова: модель, зварювання, деформація.

Pankiv M.R., PhD, Prof., Marynenko S.Yu., PhD, Assoc. Prof., Pankiv V.R., PhD, Assoc. Prof.

RESEARCH OF THE QUALITY OF SPOT CONTACT WELDING USING MATHEMATICAL MODELING METHODS

Resistance spot welding is widely used to join different metals and alloys, as it provides high speed of work. Spot welding combines interconnected thermal, electrical, electromagnetic and mechanical phenomena that occur in fractions of a second. Replacing expensive full-scale experiments with numerical analysis for predicting the quality of the connection and optimizing the parameters is an urgent scientific problem.

Точкове контактне зварювання — це процес утворення нероз'ємного з'єднання, при якому деталі нагріваються електричним струмом, що проходить через них, і одночасно стискаються зусиллям електродів.

Процес базується на законі Джоуля-Ленца. Коли через метал проходить струм великої сили, виділяється тепло. Найбільший опір, відповідно, найбільший нагрів, виникає в місці контакту між двома листами. Метал там миттєво плавиться, утворюючи «зварне ядро», яке після охолодження кристалізується в монолітну точку.

У процесі ТКЗ частини сплаву піддаються нагріву до високих температур. При цьому відбуваються складні фазові перетворення у сплаві, а також може здійснюватися перехід у стан рідкої фази. Після закінчення процесу нагрівання відбувається охолодження з'єднаної частини деталей та знову змінюється фазовий склад сплаву.

При такому режимі нагрівання-охолодження сплаву, коли у зоні зварювання відбуваються складні зміни фазового складу, відповідно змінюється мікроструктура сплаву, а ці зміни у свою чергу впливають на механічні властивості металу у зоні зварювання.

Питанням моделювання зміни фазового складу та механічних властивостей сплавів у процесі ТКЗ присвячено велику кількість робіт, однак, як правило, при цьому розглядаються моделі аналітичного класу, які не враховують зміну мікроструктури сплавів. Останнім часом виник інтерес до розроблення моделей мікроструктур сплавів при зварюванні, які дозволяють проводити наступні кінцево-елементні розрахунки властивостей таких сплавів у зоні зварних з'єднань.

Протягом багатьох років ТКЗ є надійною та популярною технологією з'єднання, перш за все в автомобільній промисловості. Завдяки своїм властивостям технологія забезпечує отримання високоякісних швів у короткі терміни та значно підвищує

ефективність виробництва. Використання передових обчислювальних інструментів значно знижує витрати на створення прототипів і виключає дорогі випробування, які через безперервність виробництва важко чи навіть неможливо провести. Істотно вплинути на якість та міцність зварних з'єднань дозволяє використання чисельного аналізу, за допомогою якого можна моделювати розміри та форму зварних швів.

Процес ТКЗ ділиться на три основні етапи:

- Стиснення деталей. Деталі затискаються між електродами під дією механічного зусилля. Це необхідно для забезпечення щільного контакту, зменшення електричного опору в місцях контакту електрод-деталь та формування майбутньої зони зварювання

- Проходження зварювального струму. Через електроди пропускається електричний струм, який проходить крізь деталі. Через опір металу в зоні контакту заготовок виділяється тепло (джоулеве тепло), що призводить до розплавлення металу (утворення литої зони) або його пластичної деформації. формування зварних швів та проковування зварного шва під час охолодження.

- Охолодження. Вимкнення струму при збереженні або збільшенні тиску електродів. Метал кристалізується під тиском, формуючи міцну зварну точку або шов, що запобігає появі тріщин та пористості.

Розглянемо точкове контактне зварювання в числовому форматі. При зазначеному форматі розрахунку виникають наступні проблеми: електрокінетичні, пов'язані з перенесенням тепла, металургійні перетворення, що відбуваються при нагріванні та охолодженні зварюваних елементів, процеси, які відносяться до напруг і деформацій в елементах, що зварюються.

Якщо матеріал, що зварюється, зазнає змін, також необхідно враховувати кореляцію між перенесенням тепла та металургійними перетвореннями.

З погляду чисельного аналізу, розподіли металургійних фаз є додаткові змінні стани, які можна описати за допомогою диференціальних рівнянь у часі.

Виявлення кореляцій між металургійними перетвореннями та властивостями матеріалу – теплопровідністю та щільністю – передбачає використання лінійних рівнянь кожної фази окремо. Виділенням тепла в результаті розсіювання можна знехтувати через дуже низькі значення коефіцієнтів трансформації, викликаних процесом зварювання, особливо в порівнянні з втратами енергії. У термо-металургійному аналізі не враховується конвекція рідкого металу у зварному ядрі та приймається збільшення теплопровідності.

Кореляція між тепловими та механічними явищами має велике значення при моделюванні, оскільки необхідно враховувати термічні напруги, зміни об'єму, пластичність, спричинену металургійним перетворенням.

Математичне моделювання ТКЗ базується на розв'язанні системи зв'язаних диференціальних рівнянь, що описують електричні, теплові та механічні процеси.

Електрична задача використовується для розрахунку розподілу електричного потенціалу та густини струму, тепла задача описує зміну температури у часі з урахуванням внутрішніх джерел тепла, механічна характеризує зміну напружено-деформованого стану з врахуванням контактних умов.

За допомогою створення математичних моделей можна побачити розмір зварного ядра та міцність з'єднання ще до початку робіт, підібрати ідеальний час імпульсу, силу струму та тиску для нових матеріалів.

УДК 531.374

Паньків М.Р., д.т.н., професор; Мариненко С.Ю., к.т.н., доцент; Окіпний І.Б., к.т.н., доцент; Гурик О.Я, к.т.н., доцент; Паньків В.Р, к.т.н., доцент
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ В УМОВАХ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Сучасне промислове виробництво та будівництво неможливі без застосування технологій зварювання металів. Проте зварювальні роботи належать до категорій підвищеної небезпеки. Технологічний процес супроводжується комплексом шкідливих чинників, які негативно впливають на організм працівника. Зростання обсягів виробництва вимагає постійного вдосконалення системи управління охороною праці. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю зниження рівня виробничого травматизму та запобігання професійним захворюванням.

Ключові слова: модель, зварювання, небезпека, охорона праці

Pankiv M.R., PhD, Prof., Marinenko S.Yu., PhD, Assoc. Prof., Okipnyi I, PhD, Assoc. Prof Huryk O.Ya. PhD, Assoc. Prof. Pankiv V.R., PhD, Assoc. Prof.

LABOR PROTECTION WHEN CARRYING OUT WELDING WORK

Modern industrial production and construction are impossible without the use of metal welding technologies. However, welding work belongs to the categories of increased danger. The technological process is accompanied by a complex of harmful factors that negatively affect the worker's body. The growth of production volumes requires constant improvement of the occupational health and safety management system. The relevance of the study is due to the need to reduce the level of industrial injuries and prevent occupational diseases.

Keywords: model, welding, danger, occupational safety

Під час виконання зварювальних робіт на персонал одночасно діє декілька небезпечних факторів:

- хімічні чинники - специфіка процесів пов'язана з виділенням зварювального аерозолю. У його складі містяться токсичні сполуки марганцю, хрому, нікелю, заліза, а також шкідливі гази: озон, оксиди азоту та вуглецю. Тривала дія цих речовин викликає важкі ураження дихальної системи та хронічні інтоксикації.

- оптичне випромінювання - електрична дуга є джерелом потужного ультрафіолетового (УФ) та інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. УФ-промені викликають гостре ураження очей та опіки шкіри. ІЧ-випромінювання призводить до теплового опромінення та розвитку катаракти.

- термічні небезпеки - висока температура дуги та розплавленого металу (до 4000°C) створює постійний ризик отримання важких термічних опіків. Небезпеку становлять і бризки рідкого металу, що розлітаються на відстань до кількох метрів.

- електричний струм - використання напруги холостого ходу джерела живлення (до 80-90 В) за певних умов (підвищена вологість, обмежений простір) є смертельно небезпечним для життя зварювальника.

Для мінімізації ризиків необхідно впроваджувати трирівневу систему захисту: технологічну, колективну та індивідуальну.

1. Модернізація технологій. Пріоритетним напрямком є заміна ручного дугового зварювання на автоматизовані або напівавтоматичні процеси в середовищі захисних газів. Це дозволяє суттєво зменшити об'єми виділення зварювальних димів та видалити працівника безпосередньо з небезпечної зони.

2. Колективний захист. Основою очищення повітряного середовища є ефективна вентиляція. Застосування лише загальнообмінної вентиляції є недостатнім. Робочі місця мають бути обов'язково обладнані місцевими відсмоктувачами (бортовими, щілинними або пересувними вентиляційними підвісними консолями). Вони повинні вловлювати до 85-90% шкідливих виділень безпосередньо біля джерела їх утворення.
3. Ізоляція робочих зон. Стаціонарні зварювальні пости необхідно розміщувати в окремих кабінах з відкритим верхом. Стіни кабін мають бути пофарбовані в світлі матові тони з додаванням оксиду цинку для поглинання УФ-променів і запобігання відблискам. Нестационарні пости слід огороджувати переносними вогнестійкими ширмами або екранами.

Кожен вид зварювання має свою специфіку та особливості небезпеки.

Контактне зварювання: відсутній зварювальний аерозоль. Головна небезпека — потужні електромагнітні поля. Необхідне екранування трансформаторів. Існує високий ризик механічного травмування пальців приводами стискання електродів.

Лазерне зварювання: генерує когерентне випромінювання високої щільності. Прямі та відбиті промені миттєво випалюють сітківку ока. Робоча зона вимагає повного світлонепроникного капітального огороження. Персонал використовує спеціальні окуляри з оптичною щільністю під конкретну довжину хвилі лазера.

Плазмове зварювання та різання: супроводжується екстремальним рівнем шуму (понад 100 дБА) через витікання плазмового струменя. Обов'язкове застосування протишумних навушників найвищого класу захисту. Генерує значні концентрації озону та оксидів азоту. Потребує локальних відсмоктувачів безпосередньо вмонтованих у плазмотрон.

Праця зварювальника супроводжується значними статичними навантаженнями та незручними робочими позами. Для профілактики захворювань опорно-рухового апарату необхідно впроваджувати раціональний режим праці та відпочинку. Регламентовані перерви тривалістю 10 хвилин через кожну годину роботи мають поєднуватися з виконанням легких фізичних вправ. Робочі місця слід укомплектовувати підйомними стільцями, підставками під ноги та спеціальними маніпуляторами чи позиціонерами для деталей. Це дозволяє уникнути тривалого перебування працівника в зігнутому стані.

Забезпечення безпечних умов праці при проведенні зварювальних робіт — це комплексне завдання, яке не може обмежуватися лише видачею засобів індивідуального захисту. Оптимальний рівень безпеки досягається поєднанням впровадження новітніх автоматизованих технологій, проектуванням вискоелективних локальних систем вентиляції та суворим дотриманням технологічної дисципліни. Постійне навчання персоналу, регулярний моніторинг стану виробничого середовища та впровадження ризикоорієнтованого підходу дозволяють мінімізувати ймовірність травматизму та зберегти здоров'я працівників.

Перелік посилань

1. Серіков Я. О. Основи охорони праці: Навч. посіб. — Харків, ХНАМГ, 2007. - 227с.
2. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці. — К.: Каравела, 2004. — 408 с.
3. Катренко Л.А., Кіт Ю.В., Пістун І.П. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум: Навч. посіб. — Суми: Університетська книга, 2009. — 540 с.
4. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник — Львів: УАД, 2006 — 336 с.

УДК 621.791.927.5

Валерій Перемітько, д.т.н., професор, Ігор Коломоєць, PhD, доцент, Сергій Плітченко, к.т.н., доц.; Михайло Чумак, аспірант, Денис Драничер, здобувач вищої освіти першого рівня

Дніпровський державний технічний університет, Україна

КОНСТРУКЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ

Анотація: У роботі розглянуто актуальну проблему відновлення та зміцнення тонкостінних деталей методом наплавлення, що ускладнюється виникненням теплових деформацій, нестабільністю геометрії та труднощами керування формуванням наплавленого шару. Проведено аналіз існуючих технологічних рішень і встановлено їх обмеження, зокрема недостатній контроль геометрії шару, складність конструкцій та обмежені технологічні можливості.

Запропоновано нові конструктивно-технологічні рішення, що базуються на поєднанні керованого теплового циклу, механічної стабілізації та засобів формоутворення. Розроблені пристрої включають індукційні нагрівачі, системи примусового охолодження та спеціалізовані формувальні вузли, зокрема канавки й притискні елементи, які забезпечують локалізацію розплаву та стабільність геометрії. Особливу увагу приділено пристрою для наплавлення по кромці диска з реалізацією обертального руху та керованого формоутворення, що дозволяє виконувати багат шарове наплавлення і регулювати геометричні параметри виробу.

Впровадження запропонованих рішень забезпечує зменшення теплових деформацій, підвищення точності формування наплавленого шару та розширення технологічних можливостей процесу, що сприяє підвищенню ресурсу деталей і ефективності виробництва.

Ключові слова: тонкостінні деталі, наплавлення, теплові деформації, жолоблення, геометрична стабільність, формування наплавленого шару, індукційний нагрів, примусове охолодження, формоутворення, притискні елементи, роликові вузли, формувальна канавка, обмежувальна камера, наплавлення по кромці, дискові деталі, багат шарове наплавлення, керування тепловим циклом, локалізація розплаву, якість наплавлення, відновлення деталей

Valerii Peremitko, D.Sc., Professor, Ihor Kolomoiets, PhD, Associate Professor, Serhii Plitchenko, PhD, Associate Professor, Mykhailo Chumak, Postgraduate Student, Denys Dranych, first-level higher education student

Dnipro State Technical University, Ukraine

DESIGN AND OPERATING PRINCIPLE OF DEVICES FOR HARD-FACING OF THIN-WALLED PARTS

Abstract: The paper addresses the relevant problem of restoration and strengthening of thin-walled parts by hard-facing, which is complicated by the occurrence of thermal deformations, geometric instability, and difficulties in controlling the formation of the deposited layer. An analysis of existing technological solutions has been carried out, revealing their limitations, including insufficient control of layer geometry, structural complexity, and restricted technological capabilities.

New design and technological solutions are proposed, based on the integration of a controlled thermal cycle, mechanical stabilization, and forming means. The developed devices include induction heaters, forced cooling systems, and specialized forming units, in particular

grooves and clamping elements, which ensure melt localization and geometric stability. Special attention is given to a device for edge hard-facing of disk components, implementing rotational motion and controlled shaping, which enables multilayer deposition and regulation of geometric parameters of the product.

The implementation of the proposed solutions ensures a reduction in thermal deformations, improves the accuracy of deposited layer formation, and expands the technological capabilities of the process, thereby contributing to increased service life of components and overall production efficiency.

Keywords: thin-walled parts, hard-facing, thermal deformations, warping, geometric stability, deposited layer formation, induction heating, forced cooling, forming, clamping elements, roller units, forming groove, confinement chamber, edge hard-facing, disk components, multilayer deposition, thermal cycle control, melt localization, deposition quality, component restoration

Однією з актуальних задач сучасного зварювального виробництва є відновлення та зміцнення тонкостінних деталей шляхом наплавлення [1, 2]. Основна складність полягає у високій схильності таких виробів до теплових деформацій, жолоблення та нестабільності геометрії в процесі локального нагріву. Додатково ускладнює ситуацію необхідність точного контролю товщини наплавленого шару та забезпечення рівномірності його формування, особливо при обробці наплавленням торців або при необхідності збільшення діаметра деталі. Існуючі технологічні рішення не забезпечують достатньої керованості процесу, що обмежує їх ефективність і якість отриманих виробів.

Аналіз відомих технічних рішень показує, що більшість пристроїв для наплавлення тонкостінних деталей базуються на використанні індукційного нагріву, притискних елементів та систем охолодження. Разом із тим, такі конструкції мають ряд суттєвих недоліків. Зокрема, відсутній ефективний механізм керування геометрією наплавленого шару, що призводить до нерівномірного розтікання розплаву під дією гравітаційних та поверхневих сил. Частина пристроїв обмежена можливістю обробки лише прямолінійних ділянок або вимагає попередньої механічної підготовки поверхні. Інші рішення характеризуються конструктивною складністю, значними витратами часу на налаштування та обслуговування, а також недостатнім контролем температурного режиму. Прототипи, незважаючи на часткове вирішення задачі стабілізації процесу, не забезпечують можливості керованого формування шару по кромці та нарощування геометричних розмірів деталей.

У представленій роботі запропоновано нові конструктивно-технологічні рішення для наплавлення тонкостінних деталей, які базуються на поєднанні керованого теплового циклу, механічної стабілізації та формоутворення наплавленого шару (рис.1). Розроблені пристрої оснащені індукційними нагрівачами, системами примусового охолодження та спеціалізованими вузлами формоутворення, що забезпечують локалізацію розплаву та контроль його геометрії.

Пристрій для наплавлення тонкостінних деталей плоскої форми (рис.1 а) включає станину 1 з мідною примусово охолоджуваною основою, оснащеною каналами для циркуляції охолоджувальної рідини. На станині розміщено формувальну канавку 2 та індукційний нагрівач 3. На станині встановлена обмежувальна камера 4 з можливістю поперечного переміщення відносно осі руху деталі 5. Камера має виріз 6 для дії джерела нагріву. По обидва боки вирізу розташовані контактні роликіві притискачі: вхідний конічний 7 і вихідний циліндричний 8, виконані з високо теплопровідного та зносостійкого матеріалу. Конічний притискач 7 встановлено під кутом 10...15° до поверхні деталі, що забезпечує оптимальний контакт, ефективний

теплообмін із охолоджуваною основою та стабільне підгинання заготовки. Зменшення кута ($<10^\circ$) погіршує притиск і теплообмін, збільшення ($>15^\circ$) призводить до надмірного тертя та можливого блокування переміщення деталі.

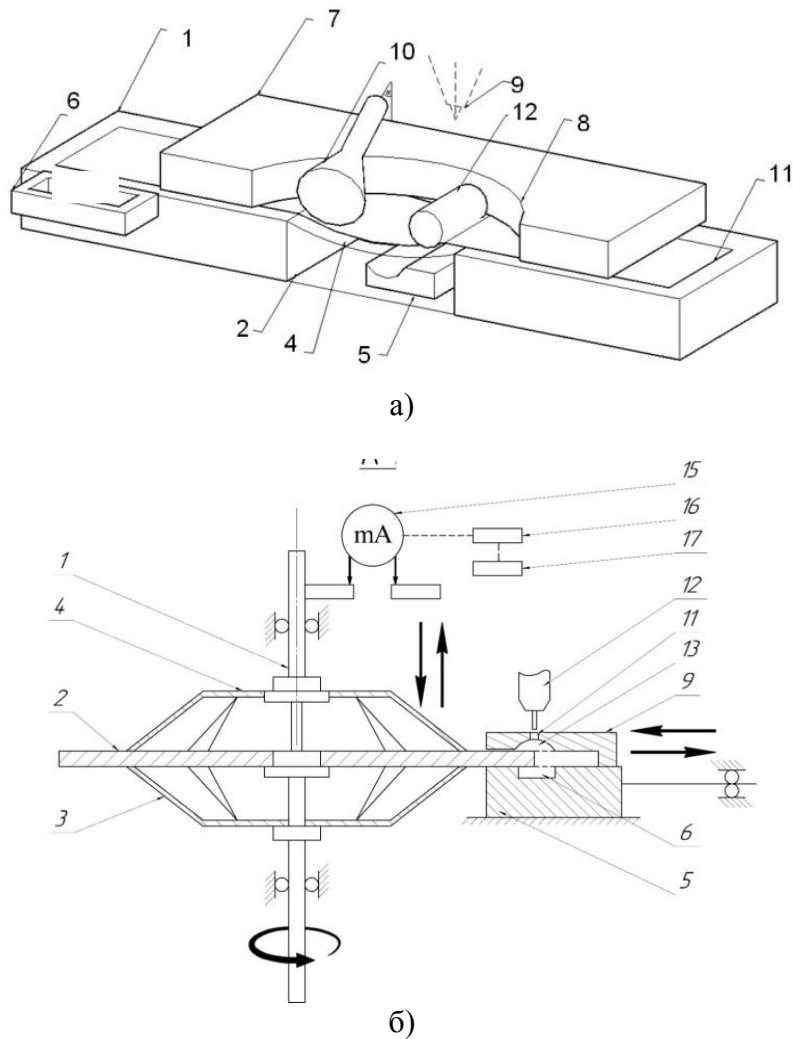


Рисунок 1. Схеми пристроїв для наплавлення тонкостінних деталей: а) пласкої форми; б) дискової форми

Ключовою особливістю є використання формувальної канавки та притискних елементів (зокрема роликів), які забезпечують стабілізацію положення деталі, покращення теплообміну та запобігання деформаціям. Удосконалена конструкція передбачає наявність обмежувальної камери з регульованим положенням, що дозволяє адаптувати процес до різної товщини виробів і концентрувати тепловий вплив у необхідній зоні.

Окремим напрямом є розробка пристрою для наплавлення по кромці диска, в якому реалізовано обертотий рух деталі та незалежний вузол формоутворення з можливістю радіальних і вертикальних переміщень. Це дозволяє виконувати багатшарове наплавлення, керовано змінювати товщину та діаметр виробу, а також формувати наплавлені валики по колу і по торцю. Введення системи керування з датчиком завершення циклу забезпечує синхронізацію процесів нагріву, обертання та

подачі матеріалу, що покращує якість формування кінцевих ділянок шва та знижує ймовірність дефектів.

Пристрій для наплавлення деталей дискової форми (рис.1 б) містить обертач 1 для диска 2, виконаний у вигляді вертикального шпинделя. Посадка диска здійснюється через вал на нижню таріль 3 та фіксується верхньою таріллю 4. Обидві тарілі виконані розсувними по горизонталі, що забезпечує адаптацію до різних діаметрів дисків, регулювання зони притискання та опори. Пристрій оснащено вузлом формоутворення, що складається з нижньої частини 5 з формувальною канавкою 6, індуктором 7 та примусовим охолоджувальним сегментом 8, а також верхньої частини 9 у вигляді камери з підвідним патрубком 10 для подачі захисного газу та пазом 11 для дії джерела нагріву 12. Верхня частина 9 має регулювання по висоті для адаптації до товщини диска та багатошарового наплавлення. На верхній частині 9 виконано округлу виточку 13, узгоджену з профілем наплавленого валика. Верхня та нижня частини вузла з'єднані скобою 14. Формувальна канавка 6 забезпечує додаткову опору при наплавленні або приварюванні торцевих елементів, сприяє щільному притисканню вузла до диска та зменшенню термічних деформацій, а також підвищує ефективність газового захисту зони нагріву.

У сукупності запропоновані технічні рішення забезпечують зменшення теплових деформацій, підвищення стабільності геометрії наплавленого шару та розширення технологічних можливостей процесу. Це створює передумови для підвищення ресурсу деталей, ефективного використання матеріалів та адаптації технології до широкого спектра виробничих задач.

Перелік посилань

1. Experimental comparison of abrasive and erosive wear characteristics of four wear-resistant steels / A. Jafari et al. *Wear*. 2018. Vol. 416-417. P. 14–26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.09.010>
2. Wahlström J., Olander L., Olofsson U. Size, Shape, and Elemental Composition of Airborne Wear Particles from Disc Brake Materials. *Tribology Letters*. 2009. Vol. 38, no. 1. P. 15–24. URL: <https://doi.org/10.1007/s11249-009-9564-x>.
3. Пристрій для наплавлення тонкостінних деталей : пат. 93288 Україна : В23К13/00. № а200905554; заявл. 01.06.2009 ; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 23/2010.
4. Пристрій для наплавлення плоских тонкостінних деталей : пат. 55346 Україна : В23К13/00. № 3882277; заявл. 15.04.1985 ; опубл. 17.03.2003, Бюл. № № 3/2003.
5. Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків: пат. 152210 Україна : В23К13/00, В23К101/00. № u202200783; заявл. 21.02.2022; опубл. 05.01.2023.
6. Пристрій для наплавлення тонких фасонних дисків: пат. 59994 Україна : В23К13/00. № u201013152; заявл. 05.11.2010 ; опубл. 10.06.2011.

УДК 621.91

Юрій Попіль, к.т.н., доц.; Денис Степанов, к.т.н., доц.; Сергій Мінаков, к.т.н., доц.; Антон Мінаков, к.т.н., старший викладач, Євгенія Чвертко, к.т.н., доц.; Наталія Стреленко, к.т.н., доц.; Ілля Перемітько, студент Прищепа Аліна, студентка; Євгеній Приймак, студент

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

РІЗАННЯ МЕТАЛІВ ВЕЛИКОЇ ТОВЩИНИ КИСНЕМ НИЗЬКОГО ТИСКУ

Наведено переваги різання металів великої товщини киснем низького тиску, що дозволяє уникнути турбулентності струменя та дроселюючого ефекту. Розглянуто практичний досвід утилізації станини 630-тонного пресу з використанням спеціалізованих різаків серії Р.

Ключові слова: різання киснем низького тиску, метал великої товщини, утилізаційний різ.

Yurii Popil, Denys Stepanov, Serhii Minakov, Anton Minakov, Yevgenia Chvertko, Nataliia Strelenko, Ilyya Peremitko, Alina Pryshchepa, Yevhenii Pryimak

APPLICATION OF LOW-PRESSURE OXYGEN FOR THICK METAL CUTTING

Analysis of the advantages of low-pressure oxygen cutting for thick metals, which prevents jet turbulence and the throttling effect. It examines the practical experience of dismantling a 630-ton press frame using specialized R-series torches.

Keywords: low-pressure oxygen cutting, thick metal, scrap cutting.

Труднощі при газовому різанні металу великих товщин значною мірою полягають у необхідності використання спеціальних потужних різаків, з більш потужним підігрівачим полум'ям та збільшення діаметра сопла ріжучого кисню. За існуючою теорією тиск ріжучого кисню має зростати зі збільшенням товщини. На додачу, використання кисню високого тиску ускладнюється через швидке розширення струменя кисню на виході з сопла та значного охолодження кисню внаслідок дроселюючого ефекту.

При збільшенні тиску вище критичного, швидкість витікання не збільшується. Натомість струмінь на виході розширюється, що приводить до марної втрати потенційної енергії стиснутого кисню.

Основними перевагами різання киснем низького тиску є:

- низький тиск кисню;
- зменшене розширення струменю на значній відстані;
- можливість зниження забруднення струменю повітрям і іншими газами;
- можливість на великій довжині зберігати підвищену хімічну активність;
- більш повне окислення металу;
- стабільна форма струменю, що забезпечує високу шорсткість поверхні різі;
- зменшення витрат ріжучого кисню.

Форма струменю залежить від умов витікання, що визначаються геометрією та станом поверхні каналів. Так канал ріжучого кисню не повинен мати різких перегинів і повинен мати прямолінійну форму на довжині в кілька разів більшої за перетин сопла на виході.

Експериментальним шляхом були знайдені вдалі форми сопел для безударного витікання. Технічні характеристики обладнання наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні параметри різаків для різання киснем низького тиску

Назва	Товщина металу, мм	Тиск ріжучого кисню, кг/см ²	Тиск пального газу, кг/см ²	Швидкість різання, мм/хв	Витрати кисню, м ³ /год	Витрати пального газу, м ³ /год
P-1200	800–1500	2–3	Ацетилен: 0,7	15–25	100–130	10–12,5
P-100-5	100–450	1,5–2,5	Пропан-бутан: 0,7–1,0	30–100	5,5–35	1–1,7
P-100-7	200–850	1,5–2,5	Пропан-бутан: 0,7–1,0	35–95	7–50	1–3,5

Для перевірки роботи здатності різаків і набуття навичок в технології різання низьким тиском, використовувались, теоретично-практичні дослідження газодинаміки струменю кисню, зондовим методом та при взаємодії його з металом. Одним з перших таких досліджуваних різаків був P-100-7, розроблений на кафедрі зварювального виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського ще в середині 20 століття.

Однією з успішно вирішених практичних задач було газокисневе утилізаційне різання, яке використовувалося для різання киснем низького тиску станини 630-тонного пресу загальною висотою 2 м.

На першому етапі було виконано підготовку та зрізання надбудови. Товщина стінок надбудови становила 800 мм. Першочерговим завданням було створення рівної площини для безперешкодного переміщення візка газорізальної машини. Оскільки товщина окремих частин сягала 1,2 м (що перевищувало паспортні 850 мм різака), було прийнято рішення проводити різання частинами під кутом.

На другому етапі виконували розрізання основної станини. Ділянку товщиною 600 мм розрізали комбінованим методом: спочатку зверху, потім знизу. По мірі демонтажу фрагментів товщину доводили до 800 мм.

Для прискорення робіт та економії ресурсів було обрано режим різання частин товщиною 600 мм з підвищеною швидкістю. Використовували сопло діаметром 8 мм. Довжина ядра становила 52 мм, а робоча відстань до поверхні металу – 20 мм.

Щоб мінімізувати відставання окислення в нижніх шарах металу, було впроваджено:

Ступінчасте зниження швидкості наприкінці різі з одночасним нахилом різака у бік, протилежний руху (на кут 10...15°).

Збільшення теплової потужності та довжини факела підігрівуючого полум'я.

На рисунку 1 наведено вигляд утилізаційного різі станини 630-тонного пресу.



Рисунок 1 – Вигляд утилізаційного різі станини 630-тонного пресу

УДК 621.3:621.7

Олексій Прокоф'єв, к.т.н.; Руслан Губатюк, к.т.н., с.н.с.; Сергій Римар, д.т.н., с.н.с.; Євген Пантелеймонов, к.т.н., с.н.с.; Валерій Абдулах, інж.; Олексій Нікрітін, інж.

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

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ-ПАЯННЯ ПІД ТИСКОМ У ВИГОТОВЛЕННІ БАГАТОШАРОВИХ ОБОЛОНКОВИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України апробовано використання процесу індукційного зварювання-паяння під тиском із застосуванням активуючих речовин для виготовлення багат шарових суцільних і перфорованих циліндричних оболонкових металевих конструкцій. Це можуть бути труби і балони підвищеної міцності.

Ключові слова: зварювання-паяння тиском, активуючі речовини, багат шарові оболонкові конструкції, підвищення міцності.

Oleksiy Prokofiev, Ruslan Gubatyuk, Serhii Rymar, Yevhen Panteleimonov, Valery Abdulakh, Oleksiy Nikritin

APPLICATION OF THE WELDING-BRAZING PROCESS IN THE MANUFACTURE OF MULTILAYER SHELL METAL STRUCTURES

The E.O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine has tested the application of the process of induction welding-brazing under pressure with the use of activating substances for the manufacture of multilayer cylindrical shell metal structures using solid and perforated sheet materials. These can be pipes and cylinders of increased strength.

Keywords: pressure welding-soldering, activating substances, multilayer shell structures, strength enhancement.

Зварювання-паяння під тиском [1] це спосіб зварювання у твердій фазі з зустрічною пластичною деформацією зварювальних поверхонь під час їх осадження. Цей спосіб був розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [2].

Процес індукційного зварювання-паяння із застосуванням активуючих речовин [3, 4] може використовуватися для виготовлення багат шарових суцільних і перфорованих циліндричних оболонкових металевих конструкцій [5–7]. Зазвичай оболонкові конструкції використовують для трубопроводів і балонів, які працюють під тиском.

На підготовчому етапі процесу відбувається нанесення припою та активуючих речовин на зовнішню зварювальну поверхню першої суцільної оболонки, на яку концентрично одягається друга суцільна або перфорована оболонка.

На етапі процесу зварювання-паяння відбувається індукційне нагрівання оболонок під час їх проходження крізь тунельний індуктор із розплавленням активуючих речовин і припою і заповнення ними місця з'єднання. Після виходу із зони дії індуктора відбувається процес зварювання-паяння стінок оболонок за рахунок автоосадження під час їх остигання. В результаті утворюється двошарова оболонкова конструкція. Таким чином формування з'єднання відбувається на ділянці певної довжини під термомеханічним впливом у вигляді пружно-пластичного деформування із послідуною кристалізацією під тиском. Це сприяє отриманню однорідного металу шву з підвищеними показниками міцності. Даний процес дозволяє виготовляти багат шарові зварно-паяні оболонкові конструкції із використанням важко зварюваних

традиційними методами матеріалів, зазвичай легованими, із підвищеними показниками міцності, які в звичайних умовах потребують особливих умов зварювання.

Для виготовлення тришарової конструкції на виготовлену двошарову конструкцію одягається третя суцільна оболонка з попереднім нанесеним на її внутрішню поверхню припою і активуючих речовин і процес зварювання-паяння повторюється.

Внутрішня суцільна оболонка надає герметичність та стійкість під час взаємодії із внутрішнім робочим середовищем. Матеріал внутрішньої суцільної оболонки повинен мати задовільні якості щодо зварювання, яке виконують у подальшому її монтажі.

Встановлено, що за внутрішнього навантаження оболонкової конструкції напруження у внутрішній оболонці є більшими у порівнянні із зовнішніми оболонками, тому застосування у багатошарових оболонкових конструкціях однієї марки матеріалу із однаковими показниками міцності не є доцільним і не призводить до ефективного навантаження спільної стінки і зменшення її товщини.

Зовнішні оболонки доцільно виготовляти із більш тонких матеріалів з підвищеними показниками міцності, що призводить до підвищення у них напружень і більш раціональному розподілу навантажень спільної стінки, а також зменшенню товщини загальної стінки, у порівнянні із суцільною оболонковою конструкцією.

Перелік посилань

1. ДСТУ 3761. 2-98 (2006) Зварювання та споріднені процеси. Ч. 2. Процеси зварювання та паяння. Терміни та визначення. Зміна № 1 – Абетковий покажчик українських термінів доповнити терміном «Зварювання-паяння під тиском» і класифікаційним номером терміно статті 3.92. Чинна від 2006.07.01 (ІПС № 3), с. 1.

2. Прокоф'єв О.С., Губатюк Р.С., Рymar С.В., Абдулах В.М., Петрієнко О.І., Сенчишин В.С. Індукційне зварювання труб і трубної арматури із застосуванням активуючих речовин (Огляд). Автоматичне зварювання. 2023. № 7. С. 37-47. <https://doi.org/10.37434/as2023.07.05>

3. Prokofiev O., Hubatyuk R., Rymar S., Kostin V., Abdulah V., Senchyshyn V. Features of forming joints using solder 18XFC during induction pressure welding of K76F steel. Scientific Journal of TNTU. Tern.: TNTU, 2025. Vol. 118. No. 2. P. 176–189. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2025.02.176

4. Prokofiev O.S., Gubatyuk R.S., Rymar S.V., Panteleimonov E.O., Abdulah V.M. Approval of the induction pressure welding process of high carbon steel. VII International Conference “Welding and Related Technologies”, 7–10 October 2024, Yaremche, Ukraine: Abstracts of plenary and poster papers. Kyiv, International Association “Welding”, 2024. P. 34.

5. Pismenny A.A., Gubatyuk R.S., Prokofiev A.S., Muzhichenko A.F., Shinkarenko A.S. Braze-welded tubular billets for pipelines and high-pressure vessels. The Paton Welding Journal. 2014. No. 10. P. 38–44.

6. Пат. UA 107847 С2 Україна, МПК F17C 1/00, B23K 1/00. Балон високого тиску, у якому циліндричний корпус має оболонкову конструкцію. О.С. Письменний, М.М. Савицький, О.О. Письменний, О.М. Савицький, О.С. Прокоф'єв, Р.С. Губатюк, Р.В. Юхименко, В.О. Супруненко, О.Ф. Мужиченко, А.С. Шинкаренко (Україна (UA)); заявник і патентовласник ІЕЗ ім Є.О. Патона НАНУ (UA). № а 2013 03154; Заявл. 15.03.2013; Опубл. 25.02.2015, Бюл. № 4.

7. Prokofiev A.S., Gubatyuk R.S., Muzhichenko A.F., Baranovsky V.N. Calculation of two-layer billet of spherical bottoms for high-pressure vessels. The Paton Welding Journal. 2016. No. 8. P. 49–53.

УДК 621.791.92:621.793.927

**Пулька Ч.В., д.т.н., проф.; Сенчишин В.С., к.т.н., доц.; Окіпний І.Б. к.т.н., доц.;
Сенчишин Віт. С.; Бордун В.Л.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРООБРОБЛЕННЯ В ЗВАРЮВАННІ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ

Анотація. У роботі розглянуто шляхи застосування віброоброблення в процесах зварювання та наплавлення деталей. Обґрунтовано, що введення механічних або ультразвукових коливань у виріб, електрод, зварювальну ванну чи технологічне оснащення дає змогу впливати на процеси кристалізації, формування структури металу, розподіл зміцнювальних фаз і рівень залишкових напружень. Проаналізовано результати досліджень щодо використання вібрації при зварюванні, індукційному, дуговому, лазерному та плазмовому наплавленні. Показано, що вібраційний вплив сприяє подрібненню структурних складових, підвищенню твердості та зносостійкості напавленого шару, зменшенню глибини проплавлення, стабілізації геометрії валика і зниженню залишкових напружень. Особливу увагу приділено індукційному наплавленню порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1, де застосування вертикальної та горизонтальної вібрації забезпечує зменшення розмірів карбідних складових, рівномірніший розподіл хрому, підвищення твердості та зростання зносостійкості напавленого металу. Встановлено, що ефективність віброоброблення залежить від частоти, амплітуди, напрямку коливань і моменту їх введення в технологічний процес. Ключові слова: віброоброблення, зварювання, наплавлення, індукційне наплавлення, механічна вібрація, ультразвукова вібрація, залишкові напруження, зносостійкість, мікроструктура.

Pulka Ch.V., Senchyshyn V.S., Okipnyi I.B., Senchyshyn Vit. S.; Bordun V.L.

APPLICATION OF VIBRATION TREATMENT IN WELDING AND RELATED PROCESSES

Abstract. The paper considers the ways of applying vibration treatment in welding and surfacing processes of machine parts. It is substantiated that the introduction of mechanical or ultrasonic vibrations into a workpiece, electrode, weld pool or technological equipment makes it possible to influence crystallization processes, metal structure formation, distribution of strengthening phases and the level of residual stresses. The results of studies on the use of vibration in welding, induction surfacing, arc surfacing, laser cladding and plasma cladding are analyzed. It is shown that vibration action contributes to the refinement of structural constituents, an increase in hardness and wear resistance of the deposited layer, a reduction in penetration depth, stabilization of bead geometry and a decrease in residual stresses. Particular attention is paid to induction surfacing with PG-S1 powdered hard alloy, where the use of vertical and horizontal vibration ensures a reduction in the size of carbide constituents, a more uniform chromium distribution, increased hardness and improved wear resistance of the deposited metal. It has been established that the effectiveness of vibration treatment depends on the frequency, amplitude, direction of oscillations and the moment of their introduction into the technological process.

Keywords: vibration treatment, welding, surfacing, induction surfacing, mechanical vibration, ultrasonic vibration, residual stresses, wear resistance, microstructure.

У сучасному машинобудуванні, ремонтному виробництві та технологіях відновлення деталей процеси зварювання і наплавлення займають важливе місце, оскільки дають змогу отримувати нероз'ємні з'єднання або формувати на робочих поверхнях шар із необхідними експлуатаційними властивостями. Дані процеси супроводжуються складними тепловими, металургійними та деформаційними явищами. У зоні дії джерела тепла відбувається локальне нагрівання металу, розплавлення присадного матеріалу, перемішування рідкої ванни, кристалізація наплавленого шару або шва, а також формування зони термічного впливу. Нерівномірне нагрівання і охолодження призводить до виникнення залишкових напружень, деформацій, структурної неоднорідності, пористості, гарячих і холодних тріщин. Тому підвищення якості зварних з'єднань і наплавлених шарів потребує не лише правильного вибору матеріалів і режимів, а й застосування додаткових технологічних операцій. Однією із таких операцій є застосування вібрації в процесах виготовлення чи оброблення готових деталей [1-5].

Суть застосування вібрації у процесах зварювання та наплавлення полягає у введенні механічних або ультразвукових коливань у виріб, електрод, зварювальну ванну, наплавлювальний інструмент або технологічне оснащення. Додаткові вібраційні процеси можуть змінювати умови кристалізації металу, характер формування шва, розподіл структурних складових, рівень залишкових напружень і механічні властивості зварних з'єднань та наплавленого металу. Тому віброоброблення доцільно розглядати не тільки як післяопераційний спосіб зняття залишкових напружень, а як ефективний технологічний фактор, який може впливати на формування властивостей металу безпосередньо під час процесу [4-5].

У працях [6, 7] досліджено вплив вібраційного навантаження на зварні з'єднання та залишкові напруження. У роботі [6] показано, що прикладання вібрації під час або після зварювання змінює мікроструктуру металу шва і сприяє зниженню залишкових напружень. Одночасно встановлено підвищення твердості металу приблизно на 25 %, що свідчить про вплив коливань не лише на напружений стан, а й на структуроутворення у металі шва. У роботі [7] розглянуто механізм вібраційного зняття напружень і встановлено, що тривала низькоамплітудна вібрація з частотою 100 Гц може забезпечувати зниження залишкових напружень до 40 %, якщо їх початковий рівень наближається до границі текучості матеріалу. Це має важливе значення для великогабаритних зварних і наплавлених конструкцій, для яких термічне зняття напружень є складним або економічно недоцільним.

Особливо перспективним є застосування вібрації не після завершення процесу, а безпосередньо під час наплавлення. У працях [8–10, 14] розглянуто індукційне наплавлення тонких плоских сталевих деталей порошкоподібними твердими сплавами з використанням горизонтальної та вертикальної механічної вібрації. Такий спосіб дає змогу формувати тонкий зносостійкий шар при порівняно незначному перемішуванні основного металу з наплавленим. У працях [8–10] запропоновано вводити вібрацію в момент початку плавлення шихти і підтримувати її до повного розплавлення та кристалізації наплавленого металу.

Слід відмітити, що вібрація в період плавлення шихти сприяє перемішуванню розплаву, вирівнюванню товщини шару, подрібненню структурних складових і зменшенню залишкових деформацій.

Авторами встановлено, що застосування горизонтальної механічної вібрації амплітудою 0,2 мм і частотою 50 Гц при індукційному напавленні порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 дозволяє підвищити зносостійкість наплавленого металу в 1,4 рази, а також рівномірність товщини наплавленого шару порівняно з напавленням без вібрації. При цьому структура металу змінюється з крупнозернистої на дрібнозернисту,

що підтверджує активний вплив механічних коливань на кристалізацію наплавленого шару. Це зумовлено тим що вплив вібрації істотно впливає на формування структури наплавленого металу. Зокрема, під дією коливань змінюються розміри карбідних складових типу $(\text{Fe}, \text{Cr})_7 \text{C}_3$ і $(\text{Fe}, \text{Cr})_3 \text{C}$, а також забезпечується рівномірніший розподіл хрому по товщині наплавленого шару. Якщо без застосування вібрації розміри структурних складових становлять 10...12 мкм, то при вертикальній вібрації вони зменшуються до 7...10 мкм, а при горизонтальній — до 3,5...7 мкм. Введення механічних коливань у процес індукційного наплавлення сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей наплавленого шару. Зносостійкість металу зростає з 2,2 при наплавленні без вібрації до 3,1 у разі застосування вертикальної вібрації та до 3,4 — при горизонтальній. Одночасно підвищується твердість наплавленого шару: з 3500 МПа без вібраційного впливу до 4800 МПа при вертикальних коливаннях і до 5400 МПа при горизонтальній вібрації.

Застосування вібрації в процесі індукційного наплавлення є засобом керованого формування структури та експлуатаційних властивостей наплавленого шару.

У роботі [11] розглянуто дугове наплавлення з низькочастотними механічними коливаннями плоскої деталі в середовищі вуглекислого газу. Коливання здійснювали з частотою 2,5...4,5 Гц і амплітудою 3...7 мм. Встановлено, що за частоти 2,5 Гц і амплітуди 7 мм досягається найбільше підвищення твердості наплавленого металу. При використанні коливань ширина наплавленого валика збільшується у 1,3...1,8 раза, його висота зменшується у 1,2...6,4 раза, а глибина проплавлення основного металу зменшується приблизно у 2 рази. Крім того, твердість наплавленого металу може зростати на 3...53 %, а твердість металу зони термічного впливу — на 27...144 % порівняно з наплавленням без коливань [11]. Це свідчить, що низькочастотна вібрація при дуговому наплавленні впливає не тільки на структуру, а й на геометрію наплавленого валика та ступінь розбавлення шару основним металом.

У сучасних дослідженнях значну увагу приділяють також лазерному наплавленню з ультразвуковою вібрацією. У праці [12] досліджено композиційне покриття IN718/WC, сформоване методом лазерного наплавлення з ультразвуковим впливом. Встановлено, що ультразвукова дія сприяє рівномірнішому розподілу WC-частинок у металевій матриці, руйнуванню стовпчастих дендритів і подрібненню зерна. У результаті середня мікротвердість покриття підвищується на 15,6 % і досягає 475 HV0.2, коефіцієнт тертя зменшується з 0,548 до 0,452, а об'єм зношування знижується на 22,9 % порівняно з покриттям, отриманим без ультразвукового впливу [12].

Перспективним напрямом є використання ультразвуку при плазмовому наплавленні. У роботі [13] досліджено вплив ультразвукової потужності та частоти на залишкові напруження при плазмовому наплавленні залізовмісного сплаву. Встановлено, що при частоті 28 кГц залишкові напруження у сформованому шарі є найменшими. Порівняно з процесом без ультразвукового впливу вони зменшуються на 17,23 % у напрямку X і на 19,79 % у напрямку Y. При потужності ультразвуку 240 Вт максимальне зниження залишкових напружень становить 62,56 % і 63,23 % відповідно у двох напрямках [13]. Такий результат пояснюється дією акустичних потоків, кавітації та механічного перемішування розплаву, що зменшує температурний градієнт і сприяє релаксації напружень у наплавленому шарі.

Таким чином, аналіз наведених праць показує, що застосування віброоброблення у процесах зварювання та наплавлення сприяє зменшенню залишкових напружень та підвищенню експлуатаційних властивостей за рахунок подрібнення структурних складових. Ефективність вібраційного впливу залежить від частоти, амплітуди, напрямку коливань та моменту їх введення.

Аналіз показав, що віброоброблення є ефективним технологічним методом підвищення якості зварних з'єднань і наплавлених шарів, що потребує додаткових досліджень та оптимізації параметрів.

Перелік посилань

1. Рябцев І. О. Наплавка деталей машин і механізмів. — К.: Екотехнологія, 2004. — 160 с.
2. Гладкий П. В., Переpletчиков Є. Ф., Рябцев І. О. Плазменная наплавка. — К.: Екотехнологія, 2007. — 292 с.
3. V.S. Senchishin and Ch.V. Pulka. Modern methods of surfacing the tools of agricultural tillers and harvesters (Review). The Paton Welding Journal. 9/2012. P. 44-49.
4. Ch.V. Pulka O.N. Shably V.N. Baranovsky V.S. Senchishin and V.Ya. Gavrilyuk. Ways of updating the technology of induction surfacing of thin steel discs. The Paton Welding Journal. 5-6/2015. P.59-62.
5. Jose M. J., Kumar S. S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds // Science and Technology of Welding and Joining. — 2016. — Vol. 21, Issue 4. — P. 243–258.
6. Munsif A. S. M. Y., Waddell A. J., Walker C. A. The effect of vibratory stress on the welding microstructure and residual stress distribution // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. — 2001. — Vol. 215, № 2. — P. 99–111.
7. Walker C. A., Waddell A. J., Johnston D. J. Vibratory Stress Relief — An Investigation of the Underlying Processes // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. — 1995. — Vol. 209. — P. 51–58.
8. Calculation of size of structural constituents of metal deposited by induction method with application of mechanical vibration / V.S. Senchishin And Ch.V. Pulka // The Paton Welding Journal, 2015, №8, 31-34 pages
9. Effect of horizontal mechanical vibration on service properties of deposited metal / Ch.V. Pulka, M.I. Pidgurskyi, V.S. Senchyshyn, M.V Sharyk a V.Ya. Gavrylyuk // The Paton Welding Journal, 2019, №10, 21-25 pages
10. Influence of vibration of parts on structure and properties of metal in surfacing /Pulka Ch.V., Shably O.N., Senchyshyn V.S., Sharyk M.V., Gordan G.N.// The Paton Welding Journal, January 2012, №1, P. 23–25.
11. Novykov S. Investigation of the influence of low-frequency harmonic oscillations on deposited metal. Kovove Mater. 2022. No 5 (60), P. 315-326. doi: <https://doi.org/10.31577/km.2022.5.315>
12. Lv J., Zhou J., Peng L. et al. Microstructure and Wear Properties of IN718/WC Composite Coating Fabricated by Ultrasonic Vibration-Assisted Laser Cladding // Coatings. — 2022. — Vol. 12, № 3. — Article 412.
13. Lai Y., Yue W., Zhang Y. Effect of ultrasonic vibration on residual stress in plasma cladding of iron-based alloy // Frontiers in Materials. — 2023. — Vol. 10. — Article 1092526.
14. Структура та властивості наплавленого металу сплаву типу Сормайт-1 після природного старіння / Ч.В. Пулька, В.С. Сенчишин, І.Б. Окіпний, Віт. С. Сенчишин, Р.Т. Бішак // Автоматичне зварювання, № 6, 2023, с. 18-20

УДК 621.791.3:669.017.3

І. Серебряник¹, к.т.н., М. Полещук¹, к.т.н., В. Бовкун¹, І. Кривко¹, С. Мариненко², к.т.н., доц.

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України 03150, м. Київ, вул. Каземира Малевича, 11, E-mail: office@paton.kiev.ua

²Тернопільській національний технічний університет ім. Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56; E-mail: marynenkosrgij@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЦНОСТІ КОАКСІАЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ ДЕТАЛЕЙ КРУГЛИХ ФОРМФАКТОРІВ, ВИКОНАНОГО МАГНІТНО – ІМПУЛЬСНИМ ЗВАРЮВАННЯМ ВІД ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ

Анотація. У роботі розглянуто магнітно-імпульсне зварювання (МІЗ) деталей круглих форм – факторів одновитковим пласким індуктором. Розроблено спосіб оцінки механічних властивостей зварного з'єднання деталей круглих форм-факторів. Виготовлено пристосування для проведення випробувань міцності.

Ключові слова: магнітно імпульсне зварювання, міцність, пристосування, випробування.

I. Serebryanik, M. Poleschuk, V. Bovkun, I. Krivko, S. Marynenko

DETERMINATION OF THE QUALITATIVE DEPENDENCE OF THE STRENGTH OF THE COAXIAL CONNECTION OF PARTS OF ROUND FORM FACTORS, PERFORMED BY MAGNETIC PULSE WELDING, ON THE PARAMETERS OF THE TECHNOLOGY

Annotation. The paper considers magnetic pulse welding (MPW) of round form factor parts using a single-turn flat inductor. A method for assessing the mechanical properties of welded joints of round form factor parts has been developed. A device for strength testing has been manufactured.

Keywords: magnetic pulse welding, strength, device, testing.

Магнітно-імпульсне зварювання (МІЗ) деталей круглих форм факторів широко застосовується при виготовленні виробів енергетичного, автомобільного та інших спеціальних галузей машинобудування. Ці вироби експлуатуються в умовах великого навантаження, в агресивних середовищах, за низьких та високих температур. Жорсткі умови експлуатації вимагають високих значень механічних властивостей з'єднання.

Для визначення характеристик міцності з'єднання, була розроблена схема випробувань коаксіальних з'єднань деталей круглих форм-факторів, рис.1 [1]. Макетне з'єднання 3 (сталева втулка з привареним МІЗ кільцем) встановлено на вертикальну направляючу 2, закріплену в опорі 1. Зусилля преса передається на зварне з'єднання по всьому периметру за рахунок застосування проміжної втулки 5. Рівнонавантаженість всіх ділянок з'єднання досягається за рахунок того, що руйнівне зусилля створюється кільцевим ножом 4, який конструктивно відділений від проміжної втулки, щільно прилягає своєю робочою крайкою до зварного з'єднання.

Проведення випробувань зразка, в якому сталеві втулка з Ст3, а кільце з алюмінію АД31Т5, зварені МІЗ, зображене на рис. 2.

Магнітне імпульсне зварювання макетних зразків круглих формфакторів виконували на установці Н-126А із застосуванням одновиткового плаского індуктора [2]. Робоча частина індуктора має трапецеїдальний виступ з однаковими скосами 45 град. Ширина майданчика 5мм.

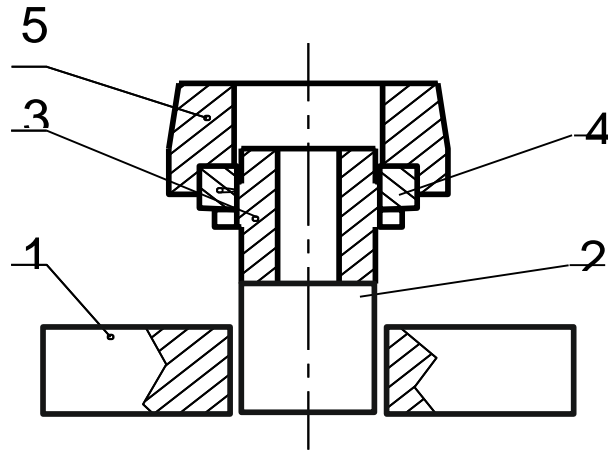


Рисунок 1 – Схема визначення міцності з'єднання в цілому: 1 – опора, 2 – направляюча, 3 – макетне з'єднання, 4 – кільцевий ніж, 5 – проміжна втулка



Рисунок 2 – Проведення випробувань сумарної міцності з'єднання сталевій втулці з кільцем з алюмінієвого сплаву

У процесі досліджень вивчали вплив на міцність з'єднання наступних технологічних факторів:

- зазор між рухомим та нерухомим елементом;
- становище робочої частини індуктора щодо деталей, що зварюються;
- величина енергії взаємодії.

Технічною документацією для з'єднання Ст3 + АД31Т5 так і для з'єднання сплав 7136 + АТ 31Т5 передбачено зусилля руйнації щонайменше 10000Н. Результати випробувань показують, що в дослідженій області при оптимальних режимах, середнє руйнівне зусилля для з'єднання сталь + алюміній та алюміній + алюмінієвий сплав становило 13000 Н., що суттєво перевищує вимогу технічної документації.

Перелік посилань

1. Поліщук М., Серебряник І. та ін. Патент на корисну модель №151234. Спосіб випробування на міцність з'єднання коаксіальних циліндричних деталей. Зареєстровано в Держ. Реєстрі патентів України на корисні моделі 23. 06. 2022р.

2. Поліщук М. А, Матвеев І. та ін.(2022) Магнітно-Імпульсне зварювання мідних кілець зі сталевими деталями з використанням одновиткового індуктора. Автоматичне зварювання./1. С14-17.

УДК 621.926:621.791

Святослав Фик, аспірант

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

**ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ БАГАТОШАРОВИХ ЗВАРНИХ ШВІВ У ВУЗЛІ
КРІПЛЕННЯ НОЖІВ ДО ВАЛІВ ДВОХВАЛЬНОГО ШРЕДЕРА ДЛЯ
ЗМЕНШЕННЯ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ**

Анотація. У роботі досліджено напружено-деформований стан вузла кріплення ножів до валів двовального шредера за умов короткочасних перевантажень і циклічної дії навантаження. Обґрунтовано доцільність застосування нероз'ємного зварного з'єднання як більш жорсткого і конструктивно простішого порівняно з болтовим. Показано, що найбільш небезпечними зонами є ділянки переходу багат шарового зварного шва в тіло ножа, де формуються локальні концентратори напружень. Запропоновано підхід до оптимізації форми багат шарових швів, який передбачає плавне профілювання зовнішнього контуру, зміщення шарів та мінімізацію різких геометричних переходів. Реалізація такого підходу забезпечує зменшення локальних пікових напружень і підвищення втомної довговічності вузла.

Ключові слова: двовальний шредер, ніж, вал, зварне з'єднання, багат шаровий зварний шов, концентратор напружень, втомна міцність.

Sviatoslav Fyk

**OPTIMIZATION OF MULTILAYER WELD SHAPE IN THE JOINT OF CUTTING
KNIVES AND SHAFTS OF A TWIN-SHAFT SHREDDER TO REDUCE STRESS
CONCENTRATORS**

Abstract. The stress-strain state of the joint between cutting knives and shafts of a twin-shaft shredder under peak and cyclic loads is considered. The expediency of using a welded joint instead of a bolted one is substantiated. It is shown that the most dangerous zones are located at the transition of the multilayer weld into the knife body. A rational weld profile is proposed to reduce stress concentration and improve fatigue durability of the joint.

Keywords: twin-shaft shredder, knife, shaft, welded joint, multilayer weld, stress concentration, fatigue strength.

Надійність і довговічність вузлів двовальних шредерів значною мірою визначаються працездатністю з'єднання ножів з валами. Саме цей вузол сприймає основні силові навантаження в процесі руйнування матеріалу, працює в умовах змінної дії крутного моменту, ударних перевантажень і періодичного реверсування. За таких умов навіть незначні конструктивні недоліки в зоні кріплення ножів можуть призводити до виникнення локальних концентраторів напружень, прискореного розвитку втомних пошкоджень і зниження загального ресурсу шредера.

Для вузлів кріплення ножів до валів застосовують як роз'ємні болтові, так і нероз'ємні зварні з'єднання. Болтове кріплення забезпечує ремонтпридатність, однак ускладнює конструкцію, потребує виконання отворів, уступів, фрезерованих поверхонь і створює додаткові зони локального ослаблення. Зварне з'єднання є простішим, жорсткішим і технологічно доцільнішим, однак його ефективність суттєво залежить від геометрії шва, розташування шарів та характеру переходу металу шва в тіло ножа. Саме тому підвищення довговічності такого вузла доцільно забезпечувати не лише вибором матеріалів і розмірів елементів, а передусім оптимізацією форми багат шарового зварного шва.

Метою роботи є обґрунтування раціональної форми багатошарових зварних швів у вузлі кріплення ножів до валів двовального шредера для зменшення концентраторів напружень у тілі ножа та підвищення втомної довговічності конструкції.

Аналіз силового навантаження вузла показує, що в процесі роботи шредера виникають значні змінні зусилля. Максимальні значення сили різання на ножі досягають 310–330 кН, тоді як середнє значення амплітуди сили становить близько 70 кН. Для оцінювання статичної міцності вузла доцільно приймати максимальне навантаження 310 кН, що відповідає крутному моменту на валу близько 100 кН·м, а для оцінки втомної міцності — момент близько 23 кН·м. Такі навантаження зумовлюють необхідність мінімізації всіх локальних геометричних концентраторів у зоні кріплення ножа до вала.

Порівняння зварного і болтового варіантів показує, що зварна конструкція має вищу жорсткість. Для зварного з'єднання переміщення вільної крайки ножа становить близько 1 мм, тоді як для болтового — до 2 мм. Це свідчить про меншу податливість вузла та сприятливіший розподіл навантаження у випадку нероз'ємного кріплення. Водночас результати чисельного аналізу показують, що для зварного варіанта найбільш небезпечними є не загальні переміщення, а локальні еквівалентні напруження в зоні переходу шва до ножа. При короткочасному перевантаженні напруження понад 500 МПа локалізуються на різучій крайці та поблизу границі зварного шва з тілом ножа. Саме ця зона є найімовірнішим осередком зародження втомних тріщин.

Такий характер напруженого стану свідчить, що просте збільшення катета шва не гарантує підвищення довговічності. Навпаки, надмірне локальне підсилення може сформувати додатковий концентратор напружень через різкий геометричний перехід між поверхнею ножа та зовнішнім контуром шва. За наявності подрізів, опуклого профілю або нерівномірного накладання валиків силовий потік у перерізі розподіляється нерівномірно, а в приповерхневих об'ємах металу виникають локальні піки напружень.

Для зменшення концентрації напружень у вузлі запропоновано формувати шов як багатошарову систему з послідовним нарощуванням перерізу. Перший шар повинен забезпечувати надійне сплавлення елементів і стабільну передачу навантаження в кореневій частині. Наступні шари доцільно накладати так, щоб вони не просто збільшували розмір шва, а формували плавний зовнішній контур із поступовим переходом до тіла ножа. З конструктивної точки зору найбільш раціональним є профіль з великим радіусом переходу, мінімальним підсиленням верхнього шару та зміщенням суміжних валиків відносно один одного. Така геометрія забезпечує поступове перетікання силового потоку від ножа до вала та знижує градієнт еквівалентних напружень у зоні сплавлення.

Особливо важливо уникати трьох факторів. Першим є різкий перехід від поверхні ножа до шва. Другим — надмірна опуклість зовнішнього шару. Третім — несиметричне накладання валиків, яке може призводити до додаткових залишкових деформацій після охолодження. Натомість симетричне формування шарів і плавне профілювання контуру дають змогу зменшити локальні напруження як у металі шва, так і в прилеглій зоні ножа. Це особливо актуально для деталей, що працюють у режимі циклічного навантаження, де визначальним є не лише рівень максимального напруження, а й інтенсивність його зміни на малих ділянках перерізу.

З технологічної точки зору оптимізація форми багатошарового шва є раціональнішою, ніж ускладнення всієї конструкції вузла. Вона не потребує принципової зміни схеми кріплення ножа, але дозволяє суттєво поліпшити умови роботи з'єднання. Крім того, плавний профіль шва зменшує ймовірність виникнення

дефектів, пов'язаних із локальним перегрівом, нерівномірною усадкою чи концентрацією залишкових напружень. Таким чином, багатошаровий шов повинен розглядатися не лише як технологічний елемент з'єднання, а як повноцінний конструктивний засіб керування напруженим станом вузла.

Отже, для вузла кріплення ножів до валів двовального шредера нероз'ємне зварне з'єднання є більш раціональним, ніж болтове, з точки зору жорсткості, конструктивної простоти та довговічності. Найбільш небезпечними залишаються ділянки переходу багатошарового шва в тіло ножа, де формуються концентратори напружень. Зменшити їх вплив можна шляхом оптимізації форми шва, яка передбачає плавний радіусний перехід, мінімізацію підсилення і раціональне взаємне розташування шарів. Такий підхід дає змогу підвищити втомну довговічність вузла без істотного ускладнення конструкції та технології його виготовлення.

Перелік посилань

1. Ступницький В. В., Проданчук О. О. Вплив технологічних чинників та геометрії різального інструменту на оброблюваність хромонікелевих сталей і сплавів на їх основі // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2024. Вип. 58. С. 59–77.

2. Stupnytskyu V., Prodanchuk O. Analysis of thermodynamic, stress-strain, and loaded states of chromium-nickel alloy workpieces using machining process simulation in advantage software // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2024. Vol. 10, No. 1. P. 45–62.

УДК 621.791

Олексій Швець, кандидат технічних наук, доцент, Сергій Березовецький, кандидат технічних наук, доцент, Петро Коруняк, кандидат технічних наук, доцент
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АДИТИВНОГО ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Анотація. В роботі досліджено вплив режимів зварювання на геометричні параметри та твердість поверхонь, отриманих за технологією адитивного наплавлення. В результаті досліджень встановлено суттєву різницю характеристик поверхонь. Комплексна оцінка якісних характеристик наплавлених поверхонь дає можливість в повній мірі оцінити придатність даної технології до практичного застосування.

Ключові слова: адитивна технологія, наплавлення, режим зварювання, характеристики поверхні.

Oleksii Shvets, Serhiy Berezovetskyi, Petro Koruniak

STUDY OF ADDITIVE ELECTRIC ARC WELDING TECHNOLOGY

Abstract. The work investigates the influence of welding modes on the geometric parameters and hardness of surfaces obtained by additive surfacing technology. As a result of the research, a significant difference in surface characteristics was established. A comprehensive assessment of the qualitative characteristics of deposited surfaces makes it possible to fully assess the suitability of this technology for practical application.

Keywords: additive technology, surfacing, welding mode, surface characteristics.

В сучасних технологічних процесах виготовлення заготовок та деталей, а також відновлення їх геометрії все частіше застосовуються адитивні технології, зокрема процес Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Це різновид технології адитивного виробництва, яка базується на використанні джерел для електродугового зварювання та різноманітних присадкових матеріалів [1]. Він побудований на принципі пошарового наплавлення валиків металу. На відміну від процесу зварювання, в адитивних процесах намагаються досягати мінімального проплавлення деталі (основи) та перемішування металу кожного наступного шару з попереднім. Це забезпечується шляхом підбору оптимальних режимів роботи сучасних зварювальних джерел, які мають широкий діапазон налаштування та регулювань.

З поміж усіх відомих способів адитивного наплавлення суттєвого розвитку набули технології наплавлення плавким електродом у середовищі захисних газів Gas Metal Arc Welding (GMAW) [1, 2, 4]. Основними перевагами їх використання в адитивному виробництві є: достатньо висока точність формування валиків; незначна кількість контрольованих параметрів режиму наплавлення, що сприяє простоті керування процесом та його автоматизації; простота, доступність та відносно низька вартість обладнання.

Мета роботи – дослідити вплив процесів зварювання, які забезпечує зварювальне джерело живлення, на характеристики поверхонь виробів, отриманих методом адитивного дугового наплавлення.

Для досліджень технологічного процесу GMAW наплавлення використовували комплект обладнання фірми Fronius, до якого входить зварювальне джерело живлення CMT 4000 Advanced, механізм подачі дроту VR 7000 CMT, пульт дистанційного керування RCU 5000i, пальник Robacta Drive CMT з шланговим пакетом Fronius

ROBOTER BRENNER та дровим буфером [3, 5]. Переміщення зварювального пальника по траєкторії накладання валиків для формування наплавленої поверхні здійснювався за допомогою колаборативного робота-маніпулятора UR-10. Загальний вигляд експериментальної установки показаний на рис. 1.

Під час досліджень задавалися три різні режими роботи джерела живлення: Standard – стандартний; Impulse – імпульсний; Cold Metal Transfer (CMT) – холодне перенесення металу. На цих режимах здійснювали адитивне наплавлення зразків для подальшого дослідження їх впливу на характеристики отриманих поверхонь.

Процес GMAW наплавлення виконувався на мінімальних можливих значеннях зварювального струму. Процес та струм зварювання задавався за допомогою пульта дистанційного керування RCU 5000i. В якості наплавленого матеріалу використовувався зварювальний дріт ER70S-6 діаметром 1,0 мм. Для захисту дуги й наплавленого шару металу застосовували зварювальну газову суміш 82 % Ar + 18 % CO₂.

Фото експериментальних зразків, виконаних за допомогою процесів CMT, Impulse та Standard наведені на рис. 1.



Рисунок 1 – Процес адитивного наплавлення та експериментальні зразки, отримані в процесі CMT (а), Impulse (б) та Standard (в) наплавлення

Отриману форму валиків для кожного з досліджуваних процесів оцінювали за коефіцієнтом форми:

$$k_{\phi} = \frac{a}{b}$$

Встановлено, що при наплавленні в процесі CMT висота валиків перевищує їх ширину в середньому на 27 %, а їх форма характеризується коефіцієнтом $k_{\phi} = 1,36$. Крім того процес CMT забезпечує малі тепловкладення в деталь, що в сукупності є хорошою передумовою побудови тонкостінних поверхонь. Процеси Standard та Impulse вирізняються більшими тепловкладеннями, меншою висотою та значно більшою шириною валиків. Коефіцієнт їх форми є меншим одиниці і становив $k_{\phi} = 0,43$ і $k_{\phi} = 0,39$ відповідно. Тому дані процеси краще підходять для наплавлення широкими валиками та побудови поверхонь з товщиною стінки понад 5 мм.

Експериментальні дослідження показали, що процес наплавлення також впливає на геометричні параметри (висоту та товщину) отриманих виробів. Так, процес CMT в порівнянні з процесами Standard та Impulse, дозволяє отримати за заданої кількості циклів наплавлення більшу висоту виробу ($h = 20-22$ мм) при мінімальній товщині

наплавленого шару ($\delta = 3,5-4$ мм). За рахунок менших значень коефіцієнта форми валиків, які вдавалося наплавляти за один цикл, висота експериментального зразка, отриманого з використанням процесу Standard становила $h = 16-18$ мм при товщині наплавленого шару $\delta = 6,0-7,0$ мм.

Для процесу Impulse дані параметри виробу становили: $h = 14-15$ мм; $\delta = 5,5-6,0$ мм. В результаті можна стверджувати, що процес СМТ є кращим для виготовлення тонкостінних виробів.

Під час дослідження процесів GMAW наплавлення за технологією WAAM встановлено, що вироби, які мають форму замкнутого контуру з чітко вираженими кутами характеризуються суттєвим відхиленням параметрів h та δ в кутовій зоні, порівняно з прямолінійною частиною напавленої поверхні. Експериментальні дослідження показали, що відхилення висоти напавленої поверхні в кутовій зоні h_r може відрізнятись на 10,5-18,6 %, а відхилення по товщині δ_r – на 12,5-33,3 %. Причому, максимальні відхилення геометрії виробу в кутовій зоні характерні для зразків, напавлених методом Standard.

Ще однією важливою характеристикою досліджуваних процесів є нерівномірність поверхні отриманих зразків. З рис. 1,а видно, що поверхня зразка, отримана в процесі СМТ-напавлення має чітко виражені границі в зоні сплавлення сусідніх валиків. Поверхня зразка, отриманого за допомогою процесу Standard (рис. 1,б), має найбільшу нерівномірність і характеризується значними напливами шарів металу. Найкращої рівномірності поверхні вдалося досягти напавленням в процесі Impulse (рис. 1,в). Шари металу сплавилися рівномірно без утворення западин в зоні сплавлення та підтікань.

Важливою характеристикою досліджуваного процесу є твердість напавленої поверхні. Дослідження твердості матеріалу напавлених зразків проводили за допомогою портативного твердоміра ТПУ-1.



Рисунок 2 – Дослідження твердості матеріалу за допомогою твердоміра ТПУ-1
1 - блок індикації; 2 – індентор;
3 – досліджуваний експериментальний зразок;
4 – експериментальні зразки

За результатами досліджень встановлено суттєву різницю між технологіями напавлення як за твердістю, так і за якістю формування шару. Так, для процесу СМТ характерні відносно стабільні значення твердості в межах 268–346 НL, при цьому основна частина результатів зосереджена у діапазоні 293–314 НL. Технологія Impulse забезпечує найнижчу твердість - у межах 246–295 НL, з переважанням значень 263–288 НL. В процесі Standard було отримано значення твердості в діапазоні від 272 до 346 НL.

Висновки. Дослідження процесів зварювання Standard, Impulse та Cold Metal Transfer, які здатні забезпечувати сучасні зварювальні цифрові джерела струму, показали суттєву різницю геометричних параметрів виробів, напавлених за їх допомогою. Стандартний процес зварювання (Standard), який можуть реалізовувати більшість зварювальних апаратів показав низьку ефективність його застосування для напавлення за технологією WAAM через значну нерівномірність напавлених шарів,

значні відхилення за геометричними параметрами виробу, суттєві тепловкладення та низьку якість наплавлених поверхонь та нерівномірну твердість поверхні. Процес СМТ в порівнянні з двома іншими, дозволяє наплавляти деталі тонкими високими валиками і отримувати тонкостінні вироби більшої висоти, характеризується мінімальними відхиленнями висоти та товщини виробів, які мають чітко виражені кути і наплавлених по замкнутому контуру, а також дозволяє отримати достатню твердість і високу стабільність формування наплавленого шару. Процес імпульсного наплавлення (Impulse), на нашу думку, є кращим для формування поверхонь з більшої товщини. За його допомогою вдається досягти більшої рівномірності наплавленої поверхні з рівномірним сплавленням шарів металу та значних відхилень розмірів в кутових зонах виробу.

Загалом отримані результати свідчать про те, що при оцінюванні ефективності технологій наплавлення доцільно враховувати не лише максимальні значення твердості, а також якість формування поверхні, оскільки саме комплекс цих показників найбільш повно характеризує придатність технології до практичного застосування.

Перелік посилань

1. Квасницький В.В., Лагодзінський І.М. Вплив методів GMAW і PAW адитивного дугового наплавлення та складу захисного газу на геометричні характеристики поверхонь і структуру металу виробів. Журнал «Автоматичне зварювання», № 11, 2023, с. 23-31. <https://doi.org/10.37434/as2023.11.02>.

2. Лагодзінський І.М., Квасницький В.В., Гринюк А.А. Особливості використання СМТ та Pulse технологій при дуговому адитивному виготовленні просторових виробів. Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку : тези доп. V Міжнар. наук.-тех. конф. (м. Краматорськ, 19-20 жовт. 2021 р.). Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія, 2021. с. 50-53.

3. Швець О.П., Талабко Ю.І. Технологічний комплекс для відновлення спрацьованих деталей наплавленням. Modern research in world science. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. SPC -Sci-conf.com.ua. Lviv, Ukraine. 2022. Pp. 281-285.

4. Kvasnytskyi V., Korzhyk V., Lahodzinkyi I. et al. (2020) Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials. IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), pp. 02SAMA16-1–02SAMA16-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>

5. Shvets O.P. The effect of the operating modes of the welding source on the hardness of the deposited metal. В: Shibaev AG, editor. SWorld &D.A. Tsenov Academy of Economics, 2025; 34 (01). 23-32. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2025-34-01-031>.

Секція: МЕХАНІКА РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 539.432

**Олег Герасимчук, доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Олег Кононученко, кандидат технічних наук, старший дослідник**
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

ОЦІНКА ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ СТАЛЕВИХ ЗРАЗКІВ ЗА ЗМІННОГО РОЗМАХУ НАПРУЖЕНЬ ЦИКЛУ

Анотація. Запропоновано модель для розрахунку втомної довговічності металевих зразків із концентратором напружень за змінного (ступінчастого) прикладеного розмаху напружень циклу. Модель враховує нелінійність накопичення втомного пошкодження та історію зміни розмаху напружень циклу на обох стадіях процесу втомного руйнування. Вихідними даними для розрахунку, окрім параметрів навантаження і геометричних розмірів поперечного перерізу зразка та концентратора, є характеристики пружно-пластичних властивостей, які отримують із випробувань зразків на монотонний розтяг, та характеристики мікроструктури вихідного матеріалу. Ключові слова: ступінчасте циклічне навантаження; стадія зародження втомної тріщини; стадія росту втомної тріщини; втомна довговічність;

Oleh Herasymchuk, Dr., Oleh Kononuchenko, Ph.D.

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ESTIMATION OF THE FATIGUE LIFE OF STEEL SPECIMENS UNDER VARIABLE CYCLIC STRESS RANGE

Abstract. A model is proposed for calculation of the fatigue life of metal specimens with a notch under variable (stepwise) applied cycle stress range, based on elastic-plastic and microstructure characteristics of the initial material.

Keywords: step cyclic load; fatigue crack nucleation stage; fatigue crack growth stage; fatigue life.

Всі сучасні моделі втомної довговічності (або накопичення втомного пошкодження) за змінного розмаху напружень циклу використовують результати випробувань зразків на втому і втомну тріщиностійкість за постійного розмаху. Метою представленої роботи є розроблення моделі для розрахунку кількості циклів одновісного навантаження металевих зразків до моменту ініціювання втомної тріщини від концентратора напружень і під час її росту до руйнування 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 матеріалу. Тобто, вихідними даними для такого розрахунку є характеристики пружно-пластичних властивостей і мікроструктури матеріалу.

Опис моделі. Оскільки процес втомного руйнування розділяють на дві основні стадії: стадію зародження втомної тріщини до моменту її ініціювання (стадію 1) і стадію росту цієї тріщини до руйнування (стадію 2), для розробки моделі розрахунку тривалості кожної стадії застосовуються різні підходи.

Стадія 1. Степеневе рівняння для розрахунку втомного пошкодження D_i на стадії 1 ($0 \leq D_i \leq 1$), яке відображає кінетику накопичення цього пошкодження за i -го прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma_i$ пропонується у наступному вигляді:

$$D_i = (n / N_{in,i})^{m_D}, \quad (1)$$

$$m_D = 1/(1 + m/2), \quad (2)$$

n – кількість циклів навантаження; $N_{in,i}$ – кількість циклів навантаження до появи тріщини за прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma_i$ [1],

$$N_{in,i} = \left(\frac{40EM}{\xi(1+\nu)\sqrt{\pi(1-\nu)}(\Delta\sigma_i - \Delta\sigma_{R,e})} \right)^{m-1}; \quad (3)$$

де 40 – універсальна константа; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона; M – фактор Тейлора; ξ – критична гострота інтрузії, відношення її глибини до радіусу вістря, характеристика матеріалу, розрахунковий параметр [1]; $\Delta\sigma_{R,e}$ – нижня межа границі витривалості гладких зразків у термінах розмаху напружень циклу за асиметрії R , мінімальний розмах напружень, необхідний для ініціювання тріщини, характеристика матеріалу, розрахунковий параметр [1]; m – показник степеня у рівнянні швидкості росту тріщини [1].

За наявності тупого концентратора напружень (або отвору) з радіусом вершини ρ у рівнянні (3) 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 [1]:

$$\sigma_{max,i}^{loc} = K_t \sigma_{max,i}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5l_{c,R,max,i} / \rho}, \quad (4)$$

де $l_{c,R,max,i}$ – критична відстань від вершини концентратора, на якій визначається $\sigma_{max,i}^{loc}$ з розподілу пружних локальних напружень за $\sigma_{max,i}^{nom}$:

$$l_{c,R,max,i} = l_{c,R} \left(\frac{K_t \sigma_{max,i}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5l_{c,R} / \rho}}{\sigma_{max,R,e}} \right)^{(m-1)m_D}; \quad (5)$$

$l_{c,R}$ – критична відстань для додатних асиметрій циклу ($1 > R \geq 0$) за $\sigma_{max,i}^{loc} = \sigma_{max,R}$:

$$l_{c,R} = l_{c,-1} [2/(1-R)]^{1/(m-1)^2}, \quad (6)$$

$$l_{c,-1} = E^2 b / \sigma_{-1}^2; \quad (7)$$

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 за ступінчастого циклічного навантаження 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 (4), наступним чином:

$$\sigma_{\max,L(H)}^{loc} = K_t \sigma_{\max,L}^{nom} / \sqrt{1 + 4,5 l_{c,R,\max,H} / \rho}, \quad (8)$$

Тобто розмах локальних напружень на ступені L , розрахований за формулою (8), буде меншим, ніж розрахований за формулою (4) для однакового розмаху номінальних напружень, оскільки $l_{c,R,\max,H} > l_{c,R,\max,L}$. 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 тривалості стадії 1 \tilde{N}_{in} за змінного розмаху напружень можна використовувати лінійне правило підсумовування пошкоджень у вигляді:

$$\sum_i (n_i / N_{in,i}) = 1, \quad (9)$$

де n_i – кількість циклів на кожному ступені. Тоді

$$\tilde{N}_{in} = \sum_i n_i. \quad (10)$$

Стадія 2. Кількість циклів навантаження під час росту втомної тріщини до руйнування (тривалість стадії 2) N_{FCG} отримаємо в результаті чисельного інтегрування рівняння швидкості її росту від $l = 0$ до $l = l_t$, де l_t – кінцевий лінійний розмір тріщини, який приймається за критерій руйнування від втоми [1]:

$$N_{FCG} = \frac{(\Delta K_{th,in})^m l_t}{v_0} \int_0^{l_t} [(\Delta K_e)^m - (\Delta K_{th,in})^m]^{-1} dl, \quad (11)$$

де v_0 – мінімальна швидкість росту тріщини, яка дорівнює одній міжатомній відстані b у напрямку вектора Бюргерса \vec{b} за цикл; ΔK_e – ефективна рушійна сила втомної тріщини

$$\Delta K_e = \Delta K - (\Delta K_{th,R} - \Delta K_{th,in})(2 - e^{-k_1(\Delta\sigma,l)} - e^{-k_2(\Delta\sigma,l)}); \quad (12)$$

ΔK – прикладений розмах КІН, $\Delta K = f(\Delta\sigma, l)$; $\Delta K_{th,R}$ – пороговий розмах КІН для довгих тріщин за асиметрії R ; $\Delta K_{th,in}$ – «внутрішній» пороговий розмах КІН [2]; $k_1(\Delta\sigma, l)$, $k_2(\Delta\sigma, l)$ – параметри, які враховують зростання ефекту закриття тріщини за різними механізмами в процесі росту короткої тріщини і які залежать від рівня прикладеного розмаху напружень циклу $\Delta\sigma$ та лінійного розміру тріщини l . Розрахунок $\Delta K_{th,R}$, $k_1(\Delta\sigma, l)$, $k_2(\Delta\sigma, l)$ та m детально описано у [1]. За ступінчастого циклічного навантаження після переходу від більшого i -го розмаху напружень H до меншого $(i+1)$ -го розмаху L тріщина розміром l_i^H буде проростати ще через пластичну зону розміром r_p^H , сформовану K_{\max}^H попереду вістря за більшого розмаху напружень. Пропонується кількість циклів $\Delta n_{L(H)}$, необхідних для проходження короткою тріщиною цієї пластичної зони від початку ступеня L , розраховувати за рівнянням:

$$\Delta n_{L(H)} = \frac{(\Delta K_{th,in})^{m_{in}} l_i^H + r_p^H}{v_0} \int_{l_i^H}^{l_i^H + r_p^H} [(\Delta K_{e,L(H)})^{m_{in}} - (\Delta K_{th,in})^{m_{in}}]^{-1} dl, \quad (13)$$

де $\Delta K_{e,L(H)}$ – ефективна рушійна сила тріщини за меншого прикладеного розмаху напружень $\Delta\sigma_L$, але з ефектом закриття тріщини, який формується від більшого розмаху, оскільки ще немає достатнього напруження для подолання залишкового напруження, яке утримує тріщину

$$\Delta K_{e,L(H)} = \Delta K_L - (\Delta K_{th,R} - \Delta K_{th,in}) \left(2 - e^{-k_{1,H}(\Delta\sigma_H,l)} - e^{-k_{2,H}(\Delta\sigma_H,l)} \right). \quad (14)$$

Тобто ефект закриття тріщини від більшого розмаху напружень враховується параметрами $k_{1,H}(\Delta\sigma_H,l)$ і $k_{2,H}(\Delta\sigma_H,l)$, які визначаються за аналогією з [1].

На рис. 1а наведено розраховану кінетику росту короткої втомної тріщини від моменту її ініціювання $l=0$ до досягнення розміру $l=l_f$ за типової схеми двоступінчастого циклічного навантаження зразка зі сталі 45 за режимом $H-L$, а на рис. 1б, в – порівняння розрахованих \tilde{N}_{in}^{calc} , \tilde{N}_{FCG}^{calc} та визначених експериментально $\tilde{N}_{in,0}^{exp}$, \tilde{N}_{FCG}^{exp} тривалостей стадій 1 і 2 для зразків за різних режимів ступінчастої зміни розмаху напружень з варіюванням n_i та $\sigma_{max,i}^{nom}$. У розрахунках було використано вихідні дані для зразків зі сталі 45 із глухим отвором [1]. Як видно з рис. 1, розрахунок добре збігається з експериментальними результатами. Стадія 1 показує більший розкид довговічності, ніж стадія 2, внаслідок суттєвішого впливу мікроструктури на довговічність саме до ініціювання тріщини.

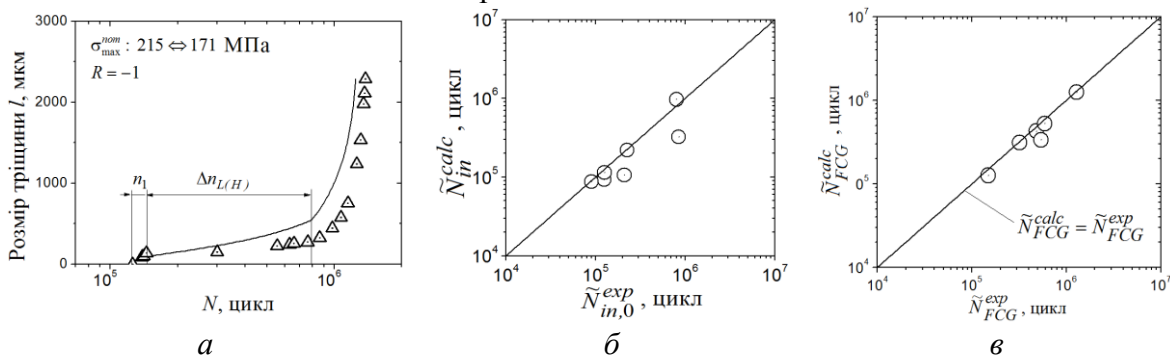


Рисунок 1. Порівняння результатів розрахунку та експерименту для зразків зі сталі 45: а – типова кінетика росту тріщини за схемою двоступінчастого циклічного навантаження $H-L$ (n_1 – задана кількість циклів на рівні H); б, в – довговічності зразків за різних схем двоступінчастого циклічного навантаження на стадіях 1 і 2 відповідно.

Висновки. Запропонована модель втомної довговічності дає змогу прогнозувати кількість циклів навантаження до моменту ініціювання тріщини і під час її росту у зразках/елементах конструкцій за ступінчастої зміни розмаху прикладених номінальних напружень циклу, використовуючи при цьому, як вихідні дані, тільки характеристики пружно-пластичних властивостей: E, ν і напруження текучості $\sigma_{0,2}$ та мікроструктури: M, b і розмір зерна d вихідного матеріалу.

Перелік посилань

1. Herasymchuk O. M., and Kononuchenko O. V. “Model of short fatigue crack growth rate and fatigue life estimation of carbon steel specimens”, *Strength Mater.*, (55), 683–698 (2023).
2. Chan K. S. “Variability of large-crack fatigue-crack-growth thresholds in structural alloys”, *Metall. Mater. Trans. A.*, (35A), 3721–3735 (2004).

УДК 669.539.43

Галина Кречковська, доктор технічних наук, старший дослідник
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

МЕТАЛОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАКЛЕПКОВИХ З'ЄДНАНЬ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ

Анотація. Проаналізовано механічні властивості (ударну в'язкість, характеристики міцності та пластичності) заклепкових з'єднань парової турбіни ТЕС. Показано, що сумісний вплив напружень та технологічного середовища сприяв зародженню та поширенню в них втомних тріщин. Встановлено, що механічні характеристики сталей заклепкових з'єднань відповідали вимогам регламентованих документів, але все ж таки вони зруйнувалися. Причиною руйнування, ймовірно, була значна кількість неметалевих включень, які, як концентратори напружень, могли стати причиною руйнування заклепкових з'єднань.

Ключові слова: заклепкові з'єднання, механічні властивості, структура.

Halyna Krechkovska

METALLOGRAPHIC FEATURES OF RIVET JOINTS OF STEAM TURBINES

Abstract. The mechanical properties (impact toughness, strength, and ductility) of riveted joints in a TPP steam turbine were analyzed. It was shown that the combined effect of stresses and the technological environment contributed to the initiation and propagation of fatigue cracks. It was established that the mechanical characteristics of the steel used in the riveted joints met the requirements of the regulatory documents, yet they nevertheless collapsed. The cause of the collapse was probably a significant number of non-metallic inclusions, which, as stress concentrators, could cause the collapse of the riveted joints.

Keywords: rivet joints, mechanical properties, structure.

Вступ. Надійність і довговічність елементів парової турбіни є ключовими для безпечної експлуатації енергетичного обладнання. Аналіз випадків їх руйнування свідчить, що основними причинами відмов є дефекти матеріалу, недостатня втомна міцність і концентрація напружень. Водночас підвищені температури експлуатації та розвиток повзучості матеріалу суттєво впливають на зародження і поширення тріщин в елементах [1, 2]. Чинником деградації є корозійно-ерозійні процеси в агресивному паровому середовищі, які спричиняють формування дефектів та прискорюють розвиток тріщин при циклічному навантаженні. Синергічна дія цих чинників призводить до суттєвого зниження довговічності та експлуатаційної надійності елементів парових турбін.

Одними із елементів парової турбіни є заклепкові з'єднання, якими кріпляться робочі лопатки до диска турбіни. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні міцності та надійності роторної системи, і руйнування заклепок чи послаблення з'єднання спричинятиме зміну напружено-деформованого стану лопаток, підвищення динамічних навантажень, що призведе до аварійного відриву лопаток і пошкодження турбіни. Встановлення особливостей руйнування заклепкових з'єднань парової турбіни є актуальним дослідженням, оскільки аналіз механічних властивостей та мікроструктурних змін дозволяє обґрунтувати причини їх відмови та надати рекомендації щодо їх експлуатації.

Матеріали та методики дослідження. Причини пошкодження елементів парових турбін аналізували на заклепкових з'єднаннях, які експлуатувалися 129 978 год. Вони виготовлені зі сталей 25X1МФ (мас. %: 0.26 С, 0.22 Si, 0.54 Mn, 1.85 Cr, 0,002 S,

$\leq 0,0005$ P, 0.14 Ni, 0.19 V, 0.29 Mo, 0.12Cu) та 18X11МНФБ (мас. %: 0.21 C, 0.57 Si, 0.62 Mn, 10.95 Cr, $\leq 0,0005$ S, $\leq 0,0005$ P, 0.59 Ni, 0.27 V, 0.89 Mo, 0.24 Nb).

Для аналізу стану експлуатованих сталей використали характеристики міцності та пластичності, а також ударну в'язкість. Механічні властивості сталей визначали на гладких циліндричних зразках діаметром 5 мм і їх випробовували на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Ударну в'язкість визначали на маятниковому копрі на зразках Менаже. Металографічні особливості елементів аналізували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

Результати досліджень і їх аналіз. Ударна в'язкість та механічні властивості міцності та пластичності сталей 18X11МНФБ та 25X1МФ заклепкових з'єднань відповідали вимогам регламентованих документів ГОСТ 5949-75 та ГОСТ 20072-74 (див. таблицю). Слід відзначити, що звикло значення КСУ приблизно на 25 % вище за КСВ (оскільки відбиває енергозатрати в основному на поширення руйнування), і тому вимоги регламенту не порушилися [3].

Таблиця – Механічні властивості сталей заклепкових з'єднань

Сталь	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСВ, МДж/м ²
Сталь 18X11МНФБ	898	749	17	74,0	0,96
ГОСТ 5949-75, пруток, гартування 1080 – 1130°C у повітрі, відпуск 660 – 770°C у повітрі	Понад 740	590-735	Понад 15	Понад 50	КСУ $\geq 0,59$
Сталь 25X1МФ	825	763	17	63,0	1,82
ГОСТ 20072-74, прутки, полоси, товщина до 25мм, гартування 880 – 900°C в оливі, відпуск 640 – 660°C у повітрі	Понад 880	Понад 735	Понад 14	Понад 50	КСУ $\geq 0,59$

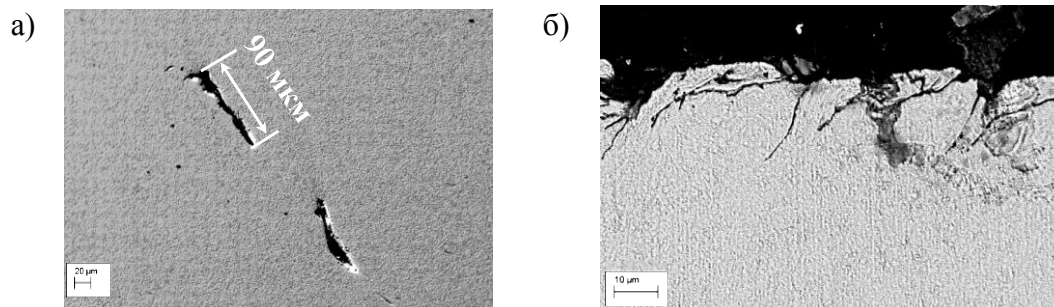


Рисунок 1. Мікроструктура сталі 25X1МФ заклепок (а) та морфологія розтріскування поверхневих шарів (б)

Металографічним аналізом виявлено, що структура сталі 25X1МФ заклепки є однорідною механічною сумішшю дрібнодисперсних (до 0,5 мкм) карбідів у фериті (структура типу троститу). Це типова структура сталі після термічної обробки шляхом гартування і високого відпуску. В структурі виявлено пошкодження досить великих розмірів від 65 до 90 мкм, причиною яких є корозійно-активні неметалеві включення (рис.1а). Вони інтенсифікують локальне анодне розчинення матриці навколо них та сприяють акумулюванню водню на міжфазних межах, з чим пов'язують схильність до корозійно-механічного руйнування. Ці включення є концентраторами напружень, і їх вміст у сталі заклепки є небезпечним, особливо біля поверхні, через потрапляння вологи в зону контакту заклепки з диском. Підповерхневі пошкодження у вигляді відшарувань, корозійні виразки як результат впливу робочого технологічного середовища сприятимуть зародженню і поширенню тріщин (рис.1б).

У мікроструктурі сталі 18X11МНФБ заклепок виявили також включення і мікрорентгенівським спектральним аналізом встановили, що це бориди ніобію (мас. %: 15.98 В, 1.71 Cr, 82.31 Nb). Зафіксовано значну кількість пошкоджень у вигляді пор, що є недопустимо для елементів, що працюють при високій температурі (рис. 2а). Також виявлено скупчення фаз на основі ніобію (рис.2б). Великі розміри цих виділень (довжина до 10 мкм) та специфічна форма (витягнені пластинки або навіть огранені геометричні фігури) створювали додаткову концентрацію напружень на мікрорівні, але, найголовніше, не виконували звичку покладену за легування ванадієм і ніобієм роль зв'язати вуглець в стійкі карбіди і запобігти збідненню твердого розчину на вміст у ньому хрому. Це могло сприяти виділенню карбідів, багатих на вміст у них хрому, вздовж меж зерен і кристалів мартенситу та погіршити їх роботоzдатність за високої температури через послаблення меж зерен та міжфазних меж у матриці.

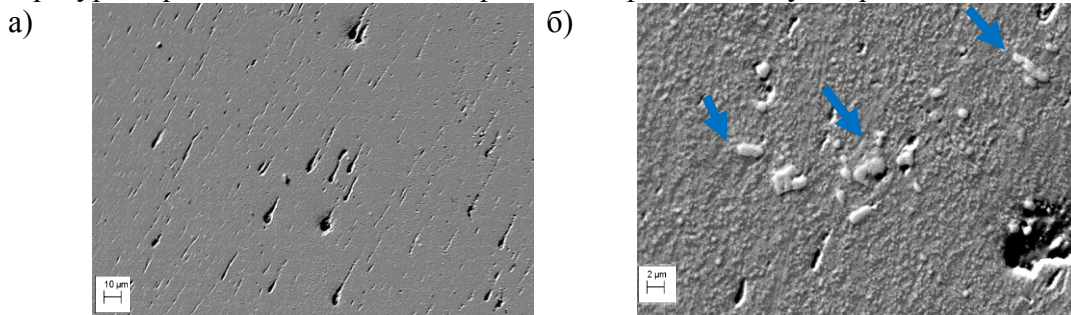


Рисунок 2. Включення боридів ніобію (а) і пошкодження від них (б) в сталі 18X11МНФБ.

Отже, негативним чинником впливу на роботоzдатність заклепкових з'єднань є достатньо висока густина неметалевих включень в їх структурі. Підвищена корозійна активність за контакту з технологічним середовищем сприяла розчиненню матриці навколо них з формуванням розвиненої мережі структурних дефектів, які полегшували зародження та поширення тріщин. Враховуючи значну кількість включень у сталях, рекомендовано забезпечити вхідний металографічний контроль на наявність неметалевих включень у структурі, а також їх кількість та розміри.

Висновки. В сталі заклепкових з'єднань ударна в'язкість та механічні властивості міцності та пластичності відповідали вимогам регламентованих документів. В структурі сталі виявлено значну кількість неметалевих включень, як корозивно-активних, так і боридів ніобію, які були ініціаторами зародження пошкоджень, що знижували здатність сталі чинити опір високотемпературному руйнуванню, особливо за їх розташуванням в зоні контакту ребер диска з вилкоподібними елементами хвостовика лопатки.

Наукові дослідження за Проєктом 2025.02/0031 виконано за рахунок коштів гранту Президента України, наданого Національним фондом досліджень України.

Перелік посилань

1. Stress-corrosion crack propagation in nuclear steam turbine rotor steels: effects of microstructure in a simulated environment. S. Weng, Y. Huang, S. Lin, F.-Z. Xuan, Journal of Materials Research and Technology. 17 (2022) 725–742. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.020>
2. Solovey P., Krechkovska H., Student O. Structural-fractographic indicators of operational damage in steam turbine rotor disc steel. Scientific Journal of TNTU (Tern.), 2025, vol. 120, no. 4, pp. 90–98. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2025.04.090
3. H.V. Krechkov's'ka, O.Z. Student, Determination of the Degree of Degradation of Steels of Steam Pipelines According to Their Impact Toughness on Specimens with Different Geometries of Notches, Materials Science. 52, Is.4 (2017) 566–571). <https://doi.org/10.1007/s11003-017-9991-z>

УДК 621.326

Юрій Крутій, д.т.н., проф.; Алла Перпері, к.т.н., доц.; Данило Величко, аспірант
Одеська державна академія будівництва та архітектури, Україна

ПРО ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ КРУГЛИХ ПЛАСТИН НА СТЕПЕНЕВО-ЗМІННІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

Досліджено задачу про вільні осесиметричні коливання круглих пластин на степеневозмінній пружній основі Вінклера. Запропонований метод дослідження ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння коливань в частинних похідних. Для множини значень показника степеня s , який характеризує неоднорідність основи, обчислено власні частоти коливань круглої пластини та встановлено аналітичні залежності частот від параметра s .

Ключові слова: круглі пластини, неоднорідна пружна основа, вільні осесиметричні коливання, аналітичний метод, частоти коливань, параметричний аналіз.

Yurii Krutii, Alla Perperi, Danylo Velychko

ABOUT THE PARAMETRIC ANALYSIS OF AXISYMMETRIC VIBRATIONS OF CIRCULAR PLATES ON A POWER-LAW VARYING ELASTIC FOUNDATION

The problem of free axisymmetric vibrations of solid circular plates resting on a power-law varying Winkler elastic foundation is investigated. The proposed analytical approach is based on the exact solution of the corresponding partial differential equation of motion. For a range of values of the exponent that characterizes the inhomogeneity of the foundation, the natural frequencies of the circular plate are computed, and analytical relationships between the frequencies and the governing parameter are established.

Key words: circular plates, inhomogeneous elastic foundation, free symmetric oscillations, analytical method, oscillation frequencies, parametric analysis.

Круглі пластини на суцільній пружній основі становлять окремий тип конструкцій, що широко використовуються в інженерній практиці. Їх застосування охоплює низку галузей, серед яких – промислове та цивільне будівництво, гідротехніка, транспортна інфраструктура, машинобудування, кораблебудування тощо. Одним з найпоширеніших підходів до моделювання взаємодії конструкції з пружною основою є модель Вінклера, де основа характеризується коефіцієнтом постелі – єдиним параметром, що описує її жорсткість. Зазвичай передбачається, що основа є однорідною, а коефіцієнт постелі відповідно – сталим, що суттєво спрощує математичний опис. Проте на практиці така ідеалізація рідко відповідає дійсності. Для отримання точніших результатів доцільно враховувати неоднорідність основи, при якій коефіцієнт постелі є функцією координат.

Авторами досліджено задачу про осесиметричні коливання круглих суцільних пластин сталої циліндричної жорсткості D , що опираються на неоднорідну пружну основу (рис. 1), для якої коефіцієнт постелі задається степеневою функцією

$$k(r) = k(a) \left(\frac{r}{a} \right)^s, \quad s \geq 0.$$

Диференціальне рівняння коливань в амплітудному стані має вигляд [1, 2]

$$D \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw(r)}{dr} \right) \right] \right\} + \left(k(a) \left(\frac{r}{a} \right)^s - \rho h \omega^2 \right) w(r) = 0, \quad (1)$$

де ρ – щільність матеріалу, h – товщина пластини, ω^2 – частота вільних коливань пластини, $w(r)$ – амплітудна функція прогинів, що залежить тільки від координати r .

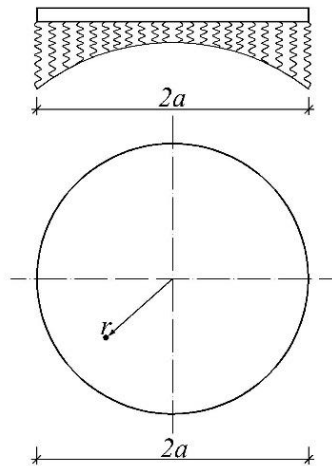


Рисунок 1. Суцільна пластина на змінній пружній основі

Точний розв’язок рівняння (1) повністю визначається наступною формулою [1, 2]:

$$w(r) = C_1 X_1(r) + C_2 X_2(r) + C_3 Y_1(r) + C_4 Y_2(r), \quad (2)$$

де C_1, C_2, C_3, C_4 – сталі інтегрування, $X_n(r)$, $Y_n(r)$ ($n=1,2$) – визначені фундаментальні розв’язки рівняння (1), причому функції $Y_n(r)$ ($n=1,2$) містять логарифми. Загалом формула (2) буде придатна для дослідження коливань суцільних та кільцевих пластин. Однак дане дослідження присвячено саме суцільним пластинам, тому із умови скінченності прогину в центрі пластини $r=0$, знаходимо $C_3 = C_4 = 0$. В такому разі замість формули (2) матимемо

$$w(r) = C_1 X_1(r) + C_2 X_2(r). \quad (3)$$

Отже, у випадку що розглядається будуть задіяні тільки фундаментальні функції

$$X_n(r) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} (-K)^k \Omega^{2m} \alpha_{n,m,k}(r) \quad (n=1,2),$$

де $K = a^4 k(a)/D$ – відомий безрозмірний параметр, $\Omega = \sqrt{(a^4 \rho h \omega^2)/D}$ – безрозмірна частота,

$$\alpha_{n,0,0}(r) = \left(\frac{r}{a}\right)^{2n-2} \quad (n=1,2),$$

$$\alpha_{n,m,0}(r) = \frac{1}{(2^{2m} (n+2m-1)!)^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+4m-2} \quad (m=1,2,3,\dots),$$

$$\alpha_{n,0,k}(r) = \frac{1}{(p_{n,0,1} p_{n,0,2} \dots p_{n,0,k})^2} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+k(s+4)-2} \quad (k=1,2,3,\dots),$$

$$\alpha_{n,m,k}(r) = c_{n,m,k} \left(\frac{r}{a}\right)^{2n+4(m+k)+ks-2} \quad (m=1,2,3,\dots)(k=1,2,3,\dots),$$

$$c_{n,0,0} = 1. \quad c_{n,m,0} = \frac{1}{(2^{2m} (n+2m-1)!)^2}, \quad c_{n,0,k} = \frac{1}{(p_{n,0,1} p_{n,0,2} \dots p_{n,0,k})^2}, \quad c_{n,m,k} = \frac{c_{n,m-1,k} + c_{n,m,k-1}}{p_{n,m,k}^2},$$

$$p_{n,m,k,s} = (2n+4(m+k)+ks-4)(2n+4(m+k)+ks-2).$$

Для реалізації авторського методу (АМ) створено відповідний алгоритм розрахунку, який реалізовано у вигляді програмного коду на Visual Basic for Applications, чим забезпечено можливість параметричного аналізу осесиметричних

коливань пластин на степеневно-змінній пружній основі типу Вінклер у програмному режимі.

Приклад. Розглянуто суцільну круглу бетонну пластину жорстко закріплену по контуру з характеристиками: модуль пружності матеріалу $E = 15 \text{ ГПа}$; коефіцієнт Пуассона $\mu = 1/6$; $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$; $a = 2 \text{ м}$; $h = 0,1 \text{ м}$; $k(a) = 6 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^3$. Для заданої пластини виконано розрахунки перших п'яти осесиметричних частот коливань для різних значень показника степеня із заданого інтервалу $0 \leq s \leq 3$ з кроком 0,25. Відповідні результати розрахунку АМ наведені в табл. 1.

Таблиця 1

s	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
0	76,589699	232,965588	512,434350	906,813307	1414,756161
0,25	72,527302	231,857063	511,943731	906,538915	1414,581180
0,5	69,503496	231,093743	511,612155	906,354668	1414,464043
0,75	67,226178	230,541866	511,375005	906,223232	1414,380543
1	65,490879	230,125643	511,197093	906,124722	1414,317971
1,25	64,153616	229,800290	511,058301	906,047936	1414,269219
1,5	63,112035	229,538324	510,946587	905,986212	1414,230070
1,75	62,292578	229,322262	510,854414	905,935382	1414,197881
2	61,641819	229,140606	510,776863	905,892713	1414,170909
2,75	61,120489	228,985538	510,710589	905,856337	1414,147957
3	60,699429	228,851574	510,653237	905,824926	1414,128175

Розглядаючи частоти як функції незалежної змінної s на інтервалі $0 \leq s \leq 3$, а також маючи множину значень цих функцій, апроксимуємо їх поліномами. Вибираючи четвертий степінь апроксимуючого полінома, матимемо наступні аналітичні залежності частот коливань від параметра s та відповідні значення коефіцієнту детермінації R^2 :

$$\omega_1 = 76,5590 - 18,0650s + 9,1480s^2 - 2,4532s^3 + 0,2672s^4, R^2 = 0,9999;$$

$$\omega_2 = 232,9500 - 4,8867s + 2,8012s^2 - 0,8586s^3 + 0,1028s^4, R^2 = 0,9999;$$

$$\omega_3 = 512,4300 - 2,1581s + 1,2674s^2 - 0,3949s^3 + 0,0478s^4, R^2 = 0,9998;$$

$$\omega_4 = 906,8100 - 1,2053s + 0,7120s^2 - 0,2226s^3 + 0,0270s^4, R^2 = 0,9998;$$

$$\omega_5 = 1414,800 - 0,768s + 0,4546s^2 - 0,1422s^3 + 0,0173s^4, R^2 = 0,9998.$$

Наявність цих формул дозволяє обчислювати частоти вільних коливань пластини для будь якого значення параметра s з інтервалу $0 \leq s \leq 3$. З метою верифікації розробленого АМ виконано порівняння результатів розрахунку з відповідними даними, отриманими методом скінченних елементів у програмному комплексі LIRA-FEM. Результати зіставлення продемонстрували добру узгодженість обчислень та підтвердили валідність запропонованого АМ.

Перелік посилань

1. Крутий Ю., Величко Д. Про вільні коливання круглих суцільних та кільцевих пластин на неоднорідній пружній основі Вінклера. *Матеріали I-ї Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА» присвяченої 80-ти річчю з дня народження професора Ч.В. Пульки*, м. Тернопіль, 6-7 черв. 2024 р., с. 186-188.

2. Крутий Ю.С., Перпері А.О., Величко Д.В. Розрахунок на вільні осесиметричні коливання круглих пластин, що опираються на степеневно-змінну пружну основу Вінклера. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2025. № 12. С. 51-64.

<https://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-12-51-64>

УДК 539.3

**Микола Чаусов, д-р. техн. наук, проф.^а; Павло Марущак, д-р. техн. наук, проф.^б;
Владислав Шманенко^а**

^аНаціональний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

^бТернопільській національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

**ЕФЕКТИ СУМІСНОГО ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ НЕЗРІВНОВАЖЕНИХ
ПРОЦЕСІВ І КРІОГЕННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ЗМІНУ МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ AISI 201**

Аналізуються нові механічні ефекти, які пов'язані з різким падінням деформації нержавіючої сталі AISI 201 при попередньому сумісному впливі динамічних незрівноважених процесів зростаючій інтенсивності і криогенного охолодження.

Ключові слова: динамічні незрівноважені процеси, ударне-коливальне навантаження, нержавіюча сталь, зміна механічних властивостей.

**Mykola Chausov, DSc, Prof.; Pavlo Maruschak, DSc, Prof.; Vladyslav Shmanenko
COMBINED EFFECTS OF DYNAMIC NON-EQUILIBRIUM PROCESSES AND
CRYOGENIC COOLING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AISI 201
STEEL**

The paper analyzes new mechanical effects associated with a sharp drop in the strain of AISI 201 stainless steel under the prior combined influence of dynamic non-equilibrium processes of increasing intensity and cryogenic cooling.

Keywords: dynamic non-equilibrium processes, impact-oscillatory loading, stainless steel, evolution of mechanical properties.

Ґрунтуючись на оригінальній методиці реалізації динамічних незрівноважених процесів (ДНП) за ударно-коливального навантаження (УКН), авторами розпочато новий цикл досліджень, який присвячено оцінюванню попереднього сумісного впливу УКН різної інтенсивності і криогенного охолодження на зміну структурного стану і механічних властивостей нержавіючих сталей [1-3]. Актуальність цих досліджень зумовлена тим, що нержавіючі сталі, які, зокрема, широко застосовуються в ракетно-космічній техніці, можуть зазнавати складних режимів навантаження, зокрема ударно-коливальних. Однак у світовій літературі практично відсутні результати подібних експериментів.

Попередні результати свідчать [1-3], що залежно від вихідного хімічного складу та початкових механічних властивостей нержавіючих сталей відгук матеріалів на попередній вплив такого складного навантаження є різним. Особливо цікавим є факт, відповідно до якого опір ударно-коливальному навантаженню деяких нержавіючих сталей, в середовищі рідкого азоту, є незначним. За невеликих значень імпульсного введення енергії ($\epsilon_{\text{імп.}} > 2,7 \%$) зразки таких сталей руйнуються [3]. В іншій нержавіючій сталі AISI 301 за поступового збільшення $\epsilon_{\text{імп}}$ виникають ефекти стрімкого зниження пластичності при повторному статичному розтязі за кімнатної температури [2].

Дослідження стрімкого зниження пластичності нержавіючої сталі за комбінованого впливу УКН різної інтенсивності та криогенного охолодження заслугоує додаткової уваги. На нашу думку, важливо встановити який фактор є визначальним для нержавіючих сталей під час прояву такого механічного ефекту за заданих умов навантаження – вихідний хімічний склад чи початкові механічні

властивості. Тому в цьому випадку для досліджень і порівняння ефектів обрано високомарганцеву аустенітну сталь AISI 201, механічні властивості якої близькі до властивостей сталі AISI 301, а хімічний склад суттєво відрізняється.

Метою цієї роботи є дослідження нових ефектів сумісного впливу криогенного охолодження та УКН різної інтенсивності на зміну механічних властивостей високомарганцевої аустенітної сталі AISI 201.

Експериментальні дослідження проводили на модифікованій випробувальній машині ZD-100Pu з пристосуванням для імпульсного введення енергії за рахунок УКН різної інтенсивності та додатково встановленою камерою охолодження за методикою, детально описаною в працях [1-3]. Час попередньої криогенної витримки зразків із досліджуваних сталей становив 1 годину. Діапазон імпульсного введення енергії в сталі визначався $\epsilon_{\text{імп.}} = 3,09 \dots 13,4\%$.

На рис. 1 наведено результати експериментальних досліджень циліндричних зразків діаметром 6,5 мм. Ліва координата на рис. 1 – шкала деформації сталей, права – шкала межі міцності. Цифрами позначені номери випробуваних зразків.

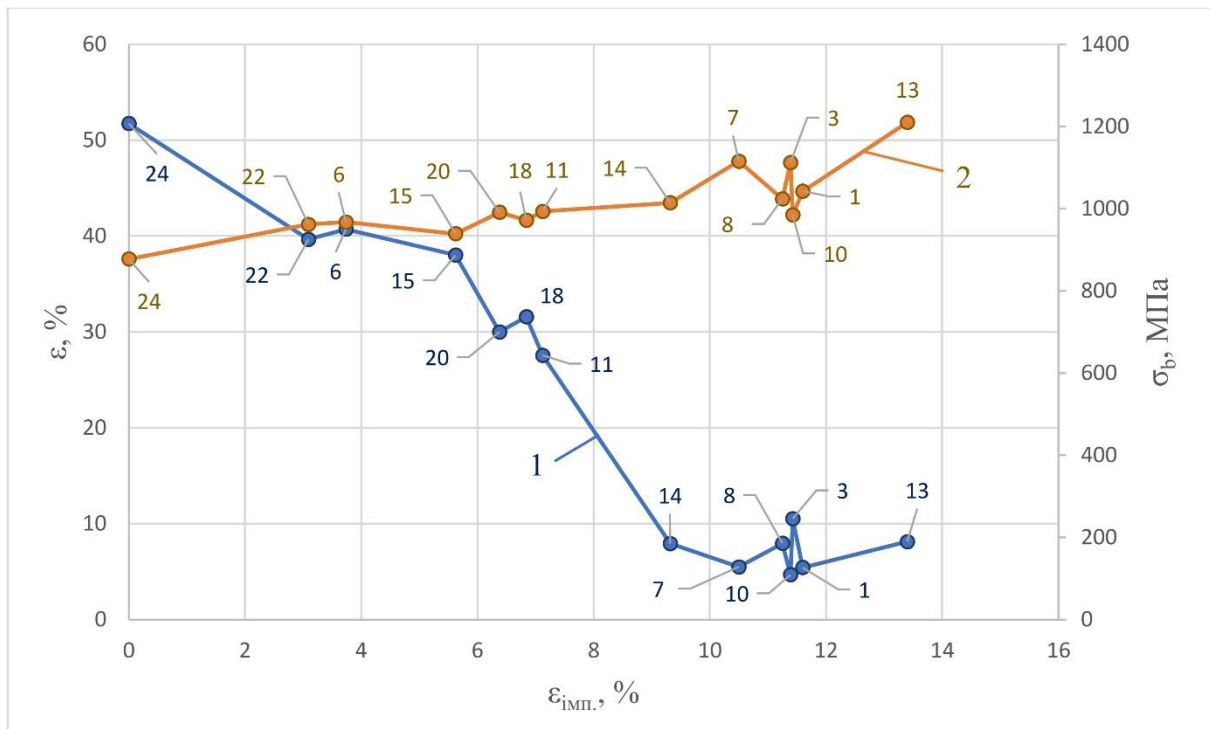


Рисунок 1. Зміна механічних властивостей нержавіючої сталі AISI 201 залежно від величини $\epsilon_{\text{імп.}}$ у рідкому азоті: 1 – зміна пластичності; 2 – зміна межі міцності; номери на графіку – номери зразків.

Оскільки для кожного діапазону $\epsilon_{\text{імп.}}$ механічні властивості сталі за подальшого статичного розтягу значно відрізняються, то для прикладу (зокрема для зразків 15, 14, 10) наведено криві деформування після заданого режиму навантаження порівняно з вихідним станом (рис. 2). Така форма подання даних наочно демонструє, за яких значень $\epsilon_{\text{імп.}}$ одночасно зі зростанням межі міцності ще наявна достатня пластичність матеріалу, а за якої – на тлі значного зміцнення вона стрімко падає.

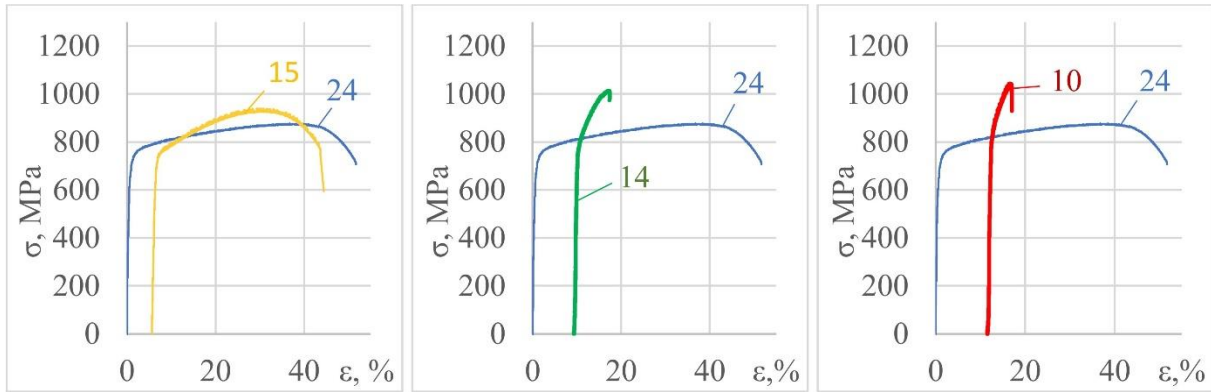


Рисунок 2. Криві деформацій сталі AISI 201 після заданих складних режимів навантаження: крива 15 ($\epsilon_{\text{імп.}} = 5,62 \%$), крива 14 ($\epsilon_{\text{імп.}} = 9,35 \%$), крива 10 ($\epsilon_{\text{імп.}} = 11,39 \%$) порівняно з кривою деформацій сталі у вихідному стані за нормальної температури (крива 24).

Проведений аналіз результатів механічних випробувань нержавіючої сталі AISI 201 за сумісного впливу попередньої криогенної витримки протягом 1 години та ДНП різної інтенсивності підтвердив перспективність запропонованої методики випробувань. Це стосується як оцінювання критичного $\epsilon_{\text{імп.}}$, так і визначення діапазону цього параметра, який забезпечить його використання в технологічних цілях.

Виявлено складний характер зміни механічних властивостей досліджуваної сталі під час подальшого статичного розтягування за кімнатної температури залежно від інтенсивності імпульсного введення енергії. Встановлено, що за такого розтягування міцнісні характеристики сталі покращуються, а деформаційні - погіршуються. Так, наприклад, у діапазоні $\epsilon_{\text{імп.}} = 11,39 \dots 11,6 \%$ проявляється ефект значного падіння пластичності до величини 4,67 %. При максимальній інтенсивності імпульсного введення енергії $\epsilon_{\text{імп.}} = 13,4 \%$, під час повторного статичного розтягування за кімнатної температури межа міцності сталі зростає на 37,9 %, а деформація залишається на рівні 8,11 %.

Порівняльний аналіз даних механічних випробувань сталей AISI 201 і AISI 301 [2] за аналогічних умов складного навантаження виявив подібний характер механічної поведінки сталей. Цікаво, що і мінімальні значення деформації сталей (4,67 % для сталі AISI 201 та 3,83 % для сталі AISI 301) є близькими за своїми значеннями та виникають за майже однакових величин $\epsilon_{\text{імп.}}$, у діапазоні $\epsilon_{\text{імп.}} = 11,11 \dots 11,39 \%$. Автори пов'язують цей факт із практично однаковими значеннями межі міцності обох досліджених сталей.

Перелік посилань

1. Chausov M., Maruschak P., Pylypenko A., Shmanenko V., Brezinová J., Lisnichuk M. The effects of cryogenic treatment and impact-oscillatory loading on changes in the mechanical properties and structural condition of stainless steel 12Kh18N10T, *Materials Science and Engineering A* 913 (2024) 147007, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147007>
2. Chausov M., Maruschak P., Pylypenko A., Shmanenko V., Lisnichuk M., Yudina D., Sovák P. Changes in the mechanical properties and structural condition of stainless steel AISI 301 caused by the combined effect of impact-oscillatory loading and cryogenic cooling. Effects caused by holding specimens in liquid nitrogen for 1 h, *Vacuum* 240 (2025) 114541, <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114541>
3. Chausov M., Maruschak P., Pylypenko A., Shmanenko V., Lisnichuk M., Yudina D., Sovák P. Risks Associated with the Use of Stainless Steel X10CrNi18-8 Under Combined Impact-Oscillatory Loading and Cryogenic Cooling. *Metals* 16(1), (2026) 30, <https://doi.org/10.3390/met16010030>

УДК 624.046

Володимир Семенюк; Ярослав Ковальчук, к.т.н., доцент

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ ЗА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ СТАТИЧНИХ ТА ВИПАДКОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Анотація. Запропоновано введення додаткового коефіцієнту імпульсних навантажень при проектуванні тримкості зварних ферм для будівельних конструкцій.

Ключові слова: напружено-деформований стан, зварні ферми, статистичне моделювання, комп'ютерний моделюючий експеримент.

Volodymyr Semeniuk; Yaroslav Kovalchuk, Ph.D., Assoc. Prof.

SYSTEMS ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A WELDED TRUSS UNDER COMBINED STATIC AND STOCHASTIC LOADING

Abstract. It is proposed to introduce an additional impulse load factor when designing the load-bearing capacity of welded trusses for building structures.

Keywords: stress-strain state, welded trusses, stochastic modeling, computer simulation experiment.

У конструкціях зварних сталевих ферм, що застосовуються для перекриття різноцільових будівель, вузлові з'єднання є зоною найбільшої локалізації напружень та втомного пошкодження, тому їх проектування має передбачати не лише нормативне експлуатаційне навантаження, а множину експлуатаційних, конструктивних, технологічних та випадкових факторів.

Поєднання снігових, вітрових та аварійних впливів відображено в ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 Єврокод, згідно з яким розрахунок здійснюється сумарним впливом постійних і змінних навантажень із використанням часткових коефіцієнтів надійності та коефіцієнтів комбінування, що відображено у формулах 6.10, 6.10a, 6.10b [1].

Оскільки коефіцієнти надійності та комбінування є загальними в межах стандарту, а регіональні аномальні засніження чи інші зовнішні фактори можуть епізодично перевищувати закладені значення, то впровадження додаткового коефіцієнта, що передбачає імпульсні перевищення розрахункових даних, дозволить проектувати стійкі до локальних імпульсів ферми.

Для визначення доцільності введення такого коефіцієнту застосовано комп'ютерно-моделюючий експеримент, яким досліджено спрощену модель зварної ферми розмірами 18000 x 3600 мм, виконану зі сталі ВСтЗпс, для якої побудовано скінченно-елементну модель у середовищі ANSYS Workbench 2025 R2 з метою оцінки напружено-деформованого стану ферми при різних сценаріях навантаження (рис. 1).

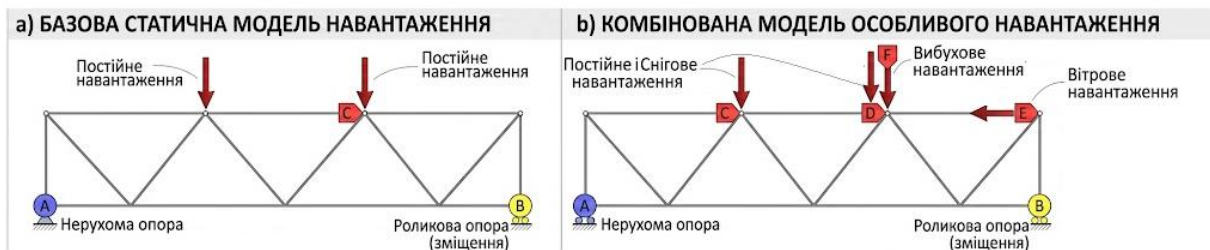


Рисунок 1. Схеми навантажень для експлуатаційного навантаження (а) та комбінації навантажень (б)

Моделювання виконано для сценаріїв статичного експлуатаційного навантаження і суми випадкових значень експлуатаційного, снігового, вітрового та вибухового впливів, як еквівалентного одночасного статичного навантаження.

Такий підхід відповідає ідеї EN 1990, згідно з якою розрахунковий ефект дій визначається сумарним впливом постійних і змінних навантажень із використанням часткових коефіцієнтів надійності та коефіцієнтів комбінування.

Для спроектованої балкової моделі конструкції 18000 x 3600 мм задано експлуатаційне навантаження 175000 N (постійне), а випадкові комбінації згенеровано в близьких до реальних діапазонах та для візуалізації вибрано одну з комбінацій, де снігове навантаження – 38000 N, боковий вітер – 12000 N, вибуховий вплив – 86000 N.

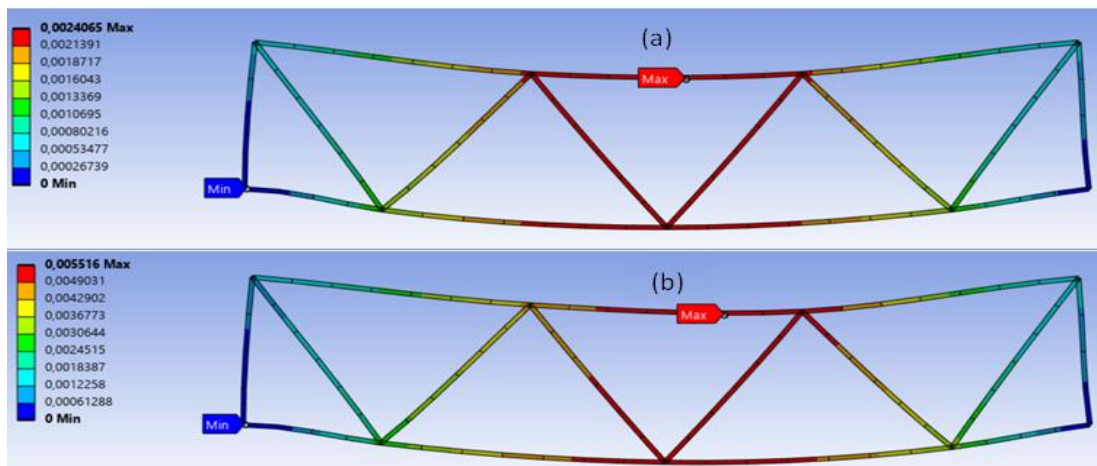


Рисунок 2. Результати моделювання деформацій під час експлуатаційного навантаження (a) та одного з випадкових сценаріїв комбінації факторів (b)

Результати моделювання деформацій на спрощеній моделі вказують, що проектування лише з розрахунком статичного експлуатаційного навантаження (рис. 2a) здійснює прогин 2.4 мм, а зі сценарієм найбільшої випадкової комбінації з вибуховим навантаженням на один вузол відображає майже вдвічі більший прогин 5.516 мм і підтверджує доцільність використання коефіцієнтів надійності та необхідність врахування більшої множини факторів для перевірки їх достатності.

Оскільки розрахунок на спрощеній моделі не враховує геометрію вузлів, імпульсного різносилового впливу вибуху на сусідні вузли, а лише відображає необхідність багатокритеріального підходу, який може бути узагальнений змінним коефіцієнтом надійності для імпульсних впливів, то в подальших дослідженнях необхідно збільшити кількість реальних факторів, використовуючи системний підхід [2], дослідити їх вплив на вузли з врахуванням нерівномірного розподілення імпульсних навантажень, верифікувати модель з результатами натурного силового експерименту та виділити діапазон значень додаткового коефіцієнта.

Перелік посилань

1. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 81 с. (Національний стандарт України).
2. Семенюк В. В., Ковальчук Я. О. Особливості формування стохастичних входних параметрів при циклічних навантаженнях на зварні ферми. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIV міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, Тернопіль, Україна, 11–12 груд. 2025. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2025. С. 38–39.

УДК 669.295:621.793:620.178.162.4

Петро Соловей м.н.с., аспірант, Галина Кречковська, д.т.н., старший дослідник, Олександра Студент, проф., д.т.н, Іван Курнат, гол. інж.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 20X13 ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЛОПАТКАХ РОТОРА ПАРОВОЇ ТУРБИНИ

Анотація. Показано, що навіть після $1,2 \times 10^5$ годин високотемпературної експлуатації сталі 20X13 в лопатках ротора парової турбіни всі її властивості на поздовжніх зразках відповідали вимогам, а характеристики пластичні поперечних зразків були занижені.

Ключові слова: сталь 20X13, лопатки ротора парової турбіни, тривала високотемпературна експлуатація, механічні властивості за розтягу і удару.

Petro Solovey, Halyna Krechkovska, Oleksandra Student, Ivan Kurnat

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

MECHANICAL PROPERTIES OF 20X13 STEEL AFTER LONG-TERM HIGH- TEMPERATURE OPERATION IN STEAM TURBINE ROTOR BLADES

Abstract. It was shown that, even after 1.2×10^5 hours of high-temperature operation of 20X13 steel in steam turbine rotor blades, all its tensile properties on longitudinal specimens met regulatory requirements, whereas those of transverse specimens were underestimated.

Keywords: 20X13 steel, steam turbine rotor blades, long-term high-temperature operation, tensile mechanical properties.

Вступ. Незалежно від типу енергогенеруючих установок, такі складні агрегати, як ротори парових турбін (РПТ), значною мірою визначають надійність, економічність, маневреність та безпеку електростанцій. Зокрема, руйнування елементів лопаткового апарату РПТ спричиняє значні економічні збитки і загрожує станційному персоналу та довкіллю. Витрати на виготовлення лопаток (як відповідальних, достатньо дорогих і уразливих елементів РПТ) досягають 17...27 % від загальних витрат на виготовлення ротора. Серед найчастіших причин їх пошкодження називають механічні (високий рівень вібрацій та надмірні відцентрові сили, згинальні та крутні моменти), негативний вплив високотемпературного технологічного середовища з деградацією структури і властивостей металу, що забезпечували їх надійність на початку експлуатації. Це вимагає вироблення чітких критеріїв оцінювання роботоздатності лопаток на будь-якому їх етапі експлуатації. Проте оцінювання поточного технічного стану металу лопаток не є поширеною практикою. Для обґрунтування їх роботоздатності корисними є закономірності зміни структури та механічних властивостей (таких як твердість, міцність та пластичність, ударна в'язкість), встановлені для високохромистих сталей після тривалої експлуатації у РПТ [1, 2]. Разом з тим, це не виключає потреби в атестації експлуатованих сталей на їх відповідність регламентним вимогам після експлуатації. Така інформація важлива для поповнення бази даних про властивості експлуатованих сталей, доповнення і уточнення відомих закономірностей їх зміни внаслідок високотемпературної деградації та для прогнозних оцінок роботоздатності лопаток в конкретних експлуатаційних температурно-силових умовах.

Мета роботи – оцінити відповідність регламентним вимогам механічних властивостей у поздовжньому і поперечному напрямках лопаток РПТ зі сталі 20X13 після $1,2 \times 10^5$ год експлуатації, щоб запобігти їх пошкодженню в майбутньому.

Матеріали та методики досліджень. Досліджено сталь 20X13 робочих лопаток РПТ після $1,2 \cdot 10^5$ год експлуатації за температури 400°C і тиску технологічного середовища 10 МПа. Для атестації технічного стану сталі використали характеристики міцності (границі міцності σ_B та плинності $\sigma_{0,2}$) та пластичності (відносні видовження δ та звуження ψ), які визначали відповідно до чинних рекомендацій. Гладкі циліндричні зразки діаметром 5 мм з п'ятикратною довжиною робочої частини випробовували на розривній машині УМЕ-10Т за температури 22°C у повітрі за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3}$ с. Випробовували на розтяг зразки поздовжньої і поперечної орієнтацій відносно осі пера лопатки. Хімічний склад сталі визначали на іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5. Для металографічного і фрактографічного аналізу використали сканівний електронний мікроскоп Carl Zeiss EVO-40XVP.

Результати досліджень і їх аналіз. За вмістом елементів сталь робочих лопаток РПТ відповідала хімічному складу сталі 20X13 (мас. %: 0,20 C; 0,27 Si; 0,36 Mn; 0,003 S; 0,001 P; 13,50 Cr; 0,21 Ni; до 0,03 кожного з елементів Mo, V, Co, Nb). Відповідно до технології виготовлення лопатки формувалися високотемпературним куванням в діапазоні $850\text{--}1250^\circ\text{C}$ з наступним гартуванням від температури 1050°C в оливі і високим відпуском при 700°C . Внаслідок цього в структурі сталі формувався дрібнодисперсний сорбіт відпуску, основні ознаки якого збереглися і після експлуатації сталі в лопатках РВТ (рис. 1). Відзначили також наявність в структурі сталі значної кількості великих (до 10 мкм) неметалевих включень, сліди яких чітко виділялись на травлених шліфах у поздовжньому і поперечному перерізах відносно пера лопатки. Температура плавлення включень (сульфіди, оксиди та силікати), як правило, перевищує пікову температуру кування сталі 20X13 (1250°C), і тому вони залишаються у твердому розчині аустеніту, дещо витягнутими у напрямі деформування (рис. 1а). Після експлуатації сталі зберіглося характерне орієнтування пакетів мартенситу у трьох напрямках, властиве структурі гартованих сталей мартенситного класу. Чіткіше це проявилися у великих первинних зернах аустеніту на поперечному шліфі (рис. 1б).

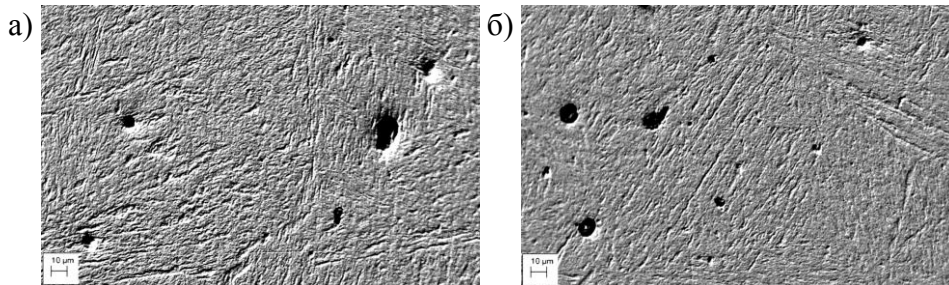


Рисунок 1 – Мікроструктура сталі 20X13 після $1,2 \cdot 10^5$ год експлуатації в робочій лопатці РПТ, виявлена у поздовжньому (а) і в поперечному (б) перерізах її пера.

Макроаналіз реального зламу експлуатованої в РПТ лопатки показав домінування грубого каменеподібного зламу в усьому її перерізі (рис. 2а). За вищої роздільної здатності є очевидним поєднання на зламі фасеток міжзеренного руйнування з значним вторинним розтріскуванням вздовж меж великих за розмірами зерен із слідами в'язкого витягування на переходах між несприятливо розташованими зернами, які суттєво відхиляють напрямок поширення руйнування від нормальної орієнтації стосовно прикладених до лопатки відцентрових сил (рис. 2б). Ямкоподібний рельєф цих ділянок свідчив про збереження експлуатованою сталлю все ще значного запасу пластичності.

За результатами випробувань на розтяг отримали діаграми навантаження поздовжніх і поперечних (стосовно пера лопатки) зразків (рис. 3), з яких визначили механічні властивості сталі в двох ключових для забезпечення роботоздатності лопаток напрямках (таблиця).

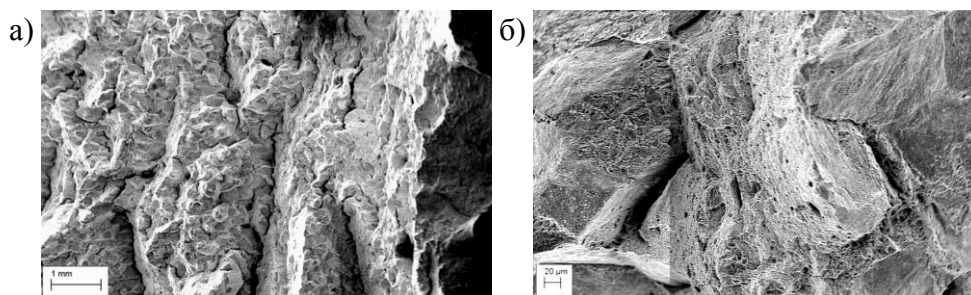


Рисунок 2 – Фрактограми реального експлуатаційного зламу хвостовикової частини робочої лопатки РПТ зі сталі 20X13.

Під час експлуатації на лопатки діють високі відцентрові сили, що розтягують її вздовж осі. Тому відповідність регламентним вимогам властивостей сталі у поздовжньому напрямі є визначальною для забезпечення робоздатності лопаток під час усталеного режиму експлуатації. Перепади тиску пари впливають на тангенціальну складову навантажень на лопатку, і в цьому випадку визначальними стають властивості у поперечному перерізі лопатки. Діаграми навантаження обох варіантів зразків засвідчили збереження запасу пластичності сталі під час деформування лопаток обох орієнтацій. Аналіз визначених характеристик показав, що на поздовжніх зразках вони дещо вищі, ніж на поперечних. Зокрема, значення границі міцності і плинності у двох напрямках відрізнялися на 2 і 7%. Щодо характеристик пластичності, то ефект орієнтації зразків зріс і досяг 14 і 10% (за величиною δ і ψ відповідно). Крім того, всі показники, визначені на поздовжніх зразках, задовольняли вимоги регламенту, а на поперечних – була очевидною втрата запасу пластичності.

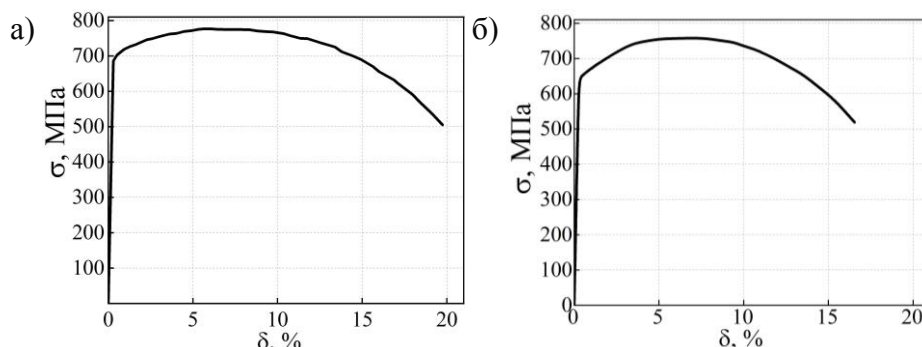


Рисунок 3. Типові діаграми навантаження розтягом в координатах «напруження σ – видовження δ » поздовжнього (а) і поперечного (б) зразків експлуатованої сталі 20X13.

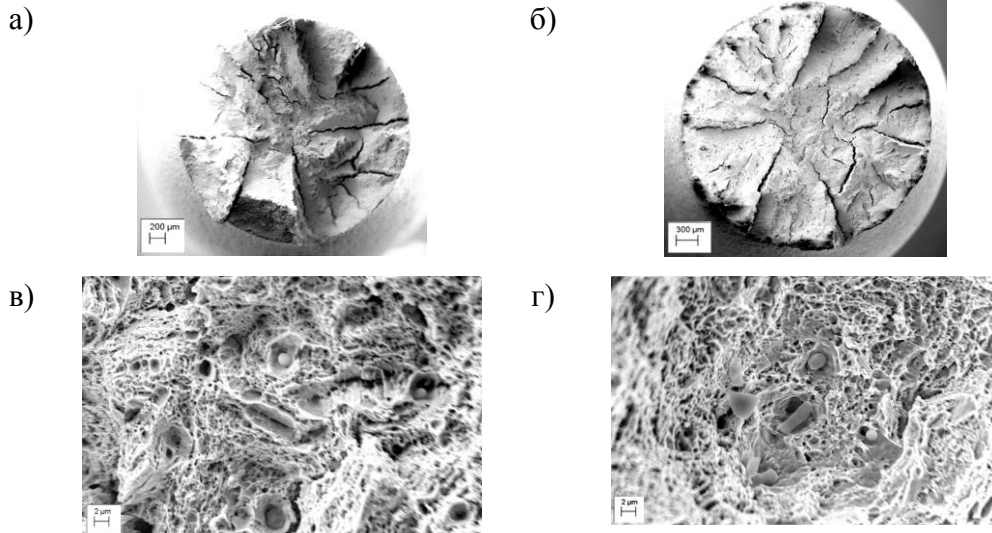
Таблиця – Усереднені значення механічних властивостей за розтягу зразків сталі 20X13 після $1,2 \cdot 10^5$ год експлуатації в РПТ

Орієнтація зразків	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
поздовжня	774	690	19,0	66,0
поперечна	759	640	16,4	59,3
Регламентні вимоги	>670	490–655	>18	>50

Відзначили, що зародження дефектів в центральній частині перерізу (відповідає вихідним ділянкам діаграм навантаження) у зразках обох орієнтацій відбулося подібно. Проте з початком локалізації пластичної деформації (за досягнення максимального рівня навантаження) і на етапі поширення пошкоджень на весь переріз зразків (низхідні частини діаграм навантаження) відмінність між ними стала очевидною. Звідси зробили висновок, що опір поширенню пошкоджень, що утворювалися у центральній частині

перерізу поперечних зразків, на весь їх переріз був значно нижчим, ніж на поздовжніх зразках, руйнування яких відбувалося в площині, орієнтованій поперек пера лопатки.

Аналіз зламів зразків обох орієнтацій підтвердив більшу пластичність поздовжніх зразків над поперечними. На обох макрозламах виявили типові ділянки – центральну, де під час розтягу відбулося зародження дефектів у центрі перерізу зразка, та зіркоподібну, що відповідає етапу їх поширення, коли радіально та нормально орієнтовані ділянки (за механізмом зсуву і відриву відповідно) почергово змінювали одна одну (рис. 4а, б). Конусні частини зламів практично не візуалізувалися, що свідчить про збереження високого опору поширенню руйнування в переважній частині перерізів зразків обох орієнтацій.



Риунок. 4 – Фрактограми поздовжніх (а, в) і поперечних (б, г) зразків сталі 20X13 з пера лопатки після $1,2 \times 10^5$ год її експлуатації в РПТ, випробуваних за одновісного розтягу.

На мікроскопічному рівні в зразках обох орієнтацій руйнування відбувалося за в'язким ямковим механізмом (рис. 4в, г). Але і в цьому випадку вища рельєфність зламу поздовжнього зразка свідчила про більший запас пластичності сталі (об'ємніші гребені витягування між суміжними порожнинами, ініційованими карбідами у її структурі) за розтягу зразків, орієнтованих вздовж пера лопатки, ніж впоперек неї.

Висновки. Проведене оцінювання механічних властивостей сталі 20X13 після її тривалої експлуатації в лопатках РПТ виявило втрату нижче вимог регламенту її пластичності на поперечних зразках. Їх руйнування відбувалося вздовж пера лопатки і виявилось чутливим до передісторії формування структури сталі на етапі операції кування лопаток. Їх подальше термічне оброблення не усунула його вплив, а під час високотемпературної експлуатації у наводнювальному середовищі технологічні дефекти розвивались та ослаблювали зв'язки між волокнами структури, спричиненими різною за інтенсивністю пластичною деформацією за різних температур кування.

Дослідження виконано за фінансової підтримки НАН України у межах НДР № 0124U000911.

Перелік посилань

1. Krechkovska H., Hredil M., Student O., Svirskaya L., Krechkovska S., Tsybailo I., Solovei P. Peculiarities of fatigue fracture of high-alloyed heat-resistant steel after its operation in steam turbine rotor blades // *Int. J. Fatigue.* –2023 – 167, Part B. – Art. No.107341. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107341>
2. Nykyforchyn H. M., Tkachuk Yu. M., Student O. Z. In-service degradation of 20Kh13 steel for blades of steam turbines of thermal power plants // *Materials Science.* – 2011. – 47, 4. – P. 447–456. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9415-z>

УДК 629.3.02:004.94

Василь Антонюк, асп.; Микола Сташків, к.т.н., доц.; Сергій Мариненко, к.т.н., доц.; Іван Брошчак, к.с-г.н, доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НАПІВПРИЧЕПА-ЦИСТЕРНИ З ДІАГНОСТИКОЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ТРІЩИН

Анотація. У роботі досліджено характерні особливості конструкцій та умов експлуатації напівпричепів – цистерн. Розроблено цифрову модель напівпричіпа – цистерни з комбінованою несучою системою (напіврамного типу). Методом скінчених елементів визначено характер розподілу еквівалентних напружень у чотирисекційній цистерні під дією гідростатичного тиску для двох режимів експлуатаційного навантаження. Встановлено критичні зони концентрації напружень, які є потенційними місцями ініціювання експлуатаційних тріщин.

Ключові слова: напівпричіп-цистерна, несуча конструкція, умови експлуатації, метод скінчених елементів, напружено-деформований стан, експлуатаційна тріщина.

Vasyl Antoniuk, Mykola Stashkiv, Serhii Marynenko, Ivan Broshchak
THE SEMI-TRAILER TANKER STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS WITH OPERATIONAL CRACKS DIAGNOSTICS

Abstract. The paper investigates the characteristic features of the structures and operating conditions of semi-trailers tankers. A digital model of a semi-trailer tanker with a half-frame type supporting system has been developed. The finite element method has been used to determine the nature of the distribution of equivalent stresses in a four-section tanker under the action of hydrostatic pressure for two operating load modes. Critical stress concentration zones have been established, which are potential sites of fatigue crack initiation.

Keywords: semi-trailer tanker, supporting structure, operating conditions, finite element method, stress-strain state, operational crack.

Напівпричепи-цистерни відіграють ключову роль у транспортуванні рідких, газоподібних і сипких вантажів практично в усіх галузях виробництва. В умовах зростання вимог до безпеки, економічності та екологічності перевезень питання технічного стану, надійності та довговічності цих транспортних засобів набувають особливої наукової і практичної ваги.

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) несучих конструкцій напівпричепів – цистерн є фундаментальним завданням механіки деформівного твердого тіла та галузевого машинобудування. Проблема ускладнюється тим, що реальні умови навантаження цих об'єктів є суттєво нестационарними, а конструктивна різноманітність типів і виконань напівпричепів – цистерн робить їх аналіз вкрай складним.

Тип несучої конструкції напівпричіпа-цистерн є однією з найбільш важливих класифікаційних ознак. У сучасному виробництві розрізняють наступні типи несучих конструкцій напівпричепів – цистерн.

Рамні (з окремою несучою конструкцією) – у таких цистернах резервуар встановлений на повноцінній металевій рамі, яка сприймає основні експлуатаційні навантаження. Цистерна ж у цьому випадку менш навантажена і виконує роль ємності для вантажу. Така несуча конструкція є дуже міцною та підходить для важких умов

експлуатації. Основний недолік – більша власна вага у порівнянні з іншими типами несучих конструкцій.

Безрамні (без окремої несучої конструкції) – у таких цистернах сам корпус резервуара виконує роль несучої конструкції. Він кріпиться безпосередньо до шасі або підвіски і сприймає всі експлуатаційні навантаження. Така конструкція дозволяє значно зменшити вагу напівпричепа. Такі напівпричепа – цистерни ефективніші за вантажопідйомністю, але більш вимогливі до розрахунків міцності. Застосовуються переважно в сучасних легких та паливних цистернах.

Напіврамні (комбіновані) – поєднують елементи рамної та безрамної конструкції. Частина навантажень передається на раму, а частина – на корпус цистерни. Це компроміс між міцністю, масою та довговічністю. Такі конструкції часто використовуються у спеціалізованих або посиленних моделях напівпричепів – цистерн та забезпечують кращий баланс між жорсткістю та вагою.

Модель типового напівпричепа – цистерни такої конструкції показано на рис. 1.

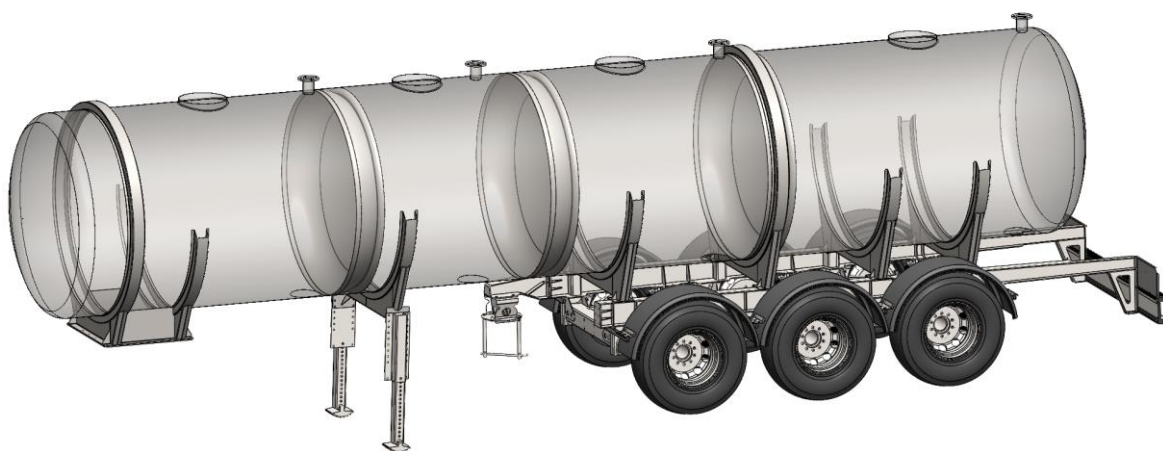


Рисунок 1 – Модель напівпричепа – цистерни з напіврамною несучою конструкцією

Багатосекційні напівпричепа-цистерни характеризуються рядом особливостей, що принципово відрізняють їх від однорідних тонкостінних оболонок як об'єктів механічного аналізу. Внутрішні поперечні перегородки (декелі, баффли, антислошингові перегородки) поділяють корпус на 2–6 відсіків, у кожному з яких можуть перевозитися різні продукти або один продукт у різній кількості. Це породжує асиметричне навантаження, яке суттєво відрізняється від симетричного розподілу тисків у однорідно заповненій цистерні.

З точки зору класичної механіки оболонок, корпус цистерни є тонкостінною циліндричною або еліптичною оболонкою кінцевої довжини, підкріпленою шпангоутами і поздовжніми стрингерами. Для такої системи аналітичне рішення задачі НДС у загальному випадку нерівномірного тиску і зосереджених сил є надзвичайно складним і, як правило, зводиться до чисельного рішення.

Метод скінчених елементів (МСЕ) є на сьогодні домінуючим інструментом аналізу НДС корпусів транспортних цистерн. Типова процедура МСЕ-аналізу напружено-деформованого стану цистерни передбачає такі кроки: параметрична побудова 3D-моделі цистерни; дискретизація моделі (створення сітки скінчених елементів); задання граничних умов та навантажень; лінійний та нелінійний статичний (чи інший) аналіз; аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану; оцінка коефіцієнту запасу міцності конструкції.

На рис. 2 показано розподіл еквівалентних напружень у цистерні для транспортного та стоянкового режимів експлуатації напівпричепа з багатосекційною цистерною об'ємом 30 м^3 під дією гідростатичного тиску від ваги рідкого матеріалу.

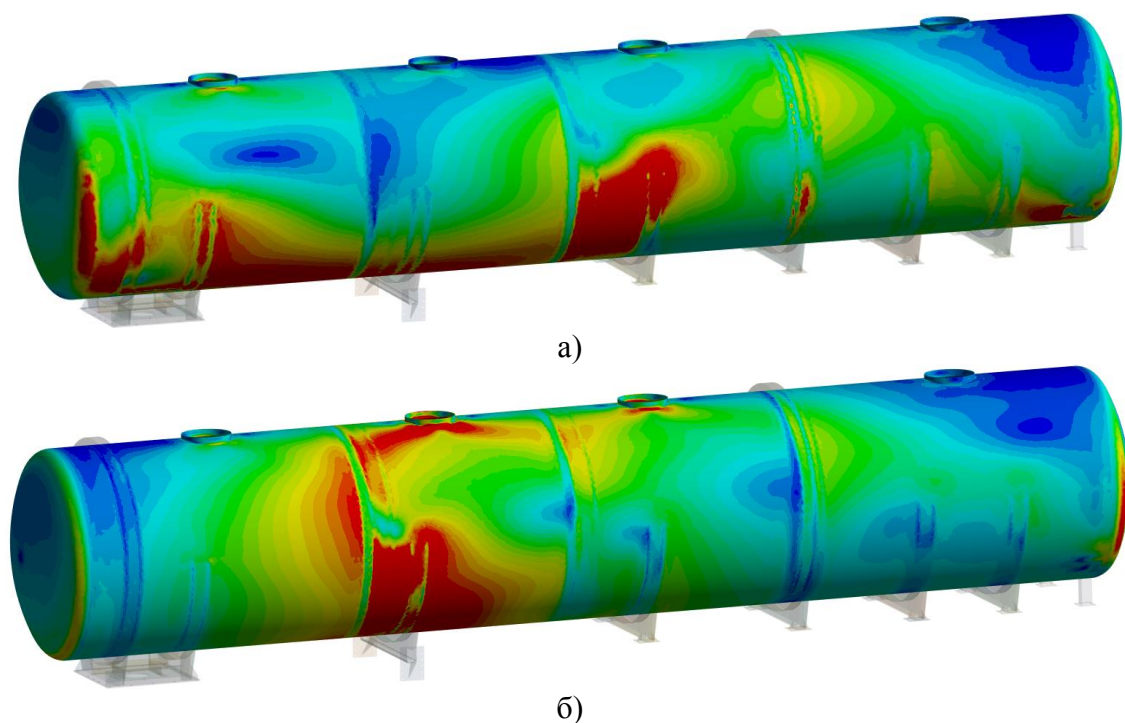


Рисунок 2 – Розподіл еквівалентних напружень у цистерні в транспортному (а) та стоянковому (б) режимах

Аналіз результатів моделювання (рис. 2) показує, що найбільша концентрація напружень на корпусі цистерни спостерігається у зонах опорних ложементів, в місцях кріплення декелів та поблизу заливних горловин. Ці зони є потенційними місцями ініціювання експлуатаційних тріщин. Це підтверджується і результатами експлуатаційних спостережень. Зокрема, на рис. 3 показано експлуатаційні тріщини в зоні кріплення внутрішньої перегородки цистерни та в опорі кріплення цистерни.

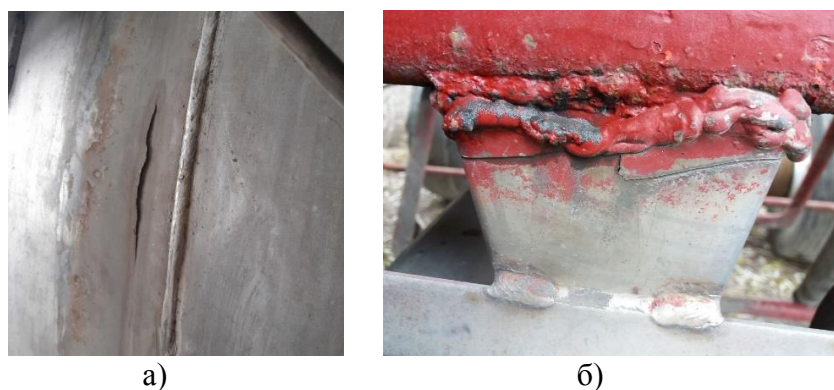


Рисунок 3 – Експлуатаційні тріщини в корпусі (а) та опорі (б) цистерни

Отже, особливості будови напівпричепів – цистерн та умови їх експлуатації безпосередньо визначають характер напружено-деформованого стану та довговічність їх несучої конструкції. Найбільш небезпечними експлуатаційними факторами є гідродинамічне навантаження від ваги вантажу, що зумовлює локальні концентрації напружень, які, в свою чергу, є місцями зародження та розвитку тріщин. Все це зумовлює необхідність застосування чисельного моделювання НДС несучих конструкцій та впровадження систем моніторингу технічного стану напівпричепів-цистерн.

УДК 539.4

Вадим Хворостяний¹, к.т.н., ст. досл.; Микола Долгов¹, д.т.н., проф.; Світлана Тарасовська¹, к.т.н., ст. досл.; Наталія Немерцева², Андрій Кравчук¹, к.т.н., ст. досл.; Максим Цисар¹, к.т.н.; Володимир Бодунов¹

¹Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Україна

²ТОВ «СНОК ЛТД», Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТРИВАЛОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ІОННОГО ОБМІНУ НА ГРАНИЦЮ МІЦНОСТІ ФЛОАТ-СКЛА В УМОВАХ ОСЕСИМЕТРИЧНОГО ЗГИНУ

Анотація. Проведено комплексне експериментальне дослідження закономірностей впливу тривалості технологічної операції іонного обміну на границі міцності листового флоат-скла. Експериментальна частина дослідження була реалізована на зразках у формі квадратних пластин із номінальною товщиною 8,0 мм, які випробували методом осесиметричного згину з використанням подвійного співвісного кільця. Це дозволило забезпечити рівномірний розподіл напружень у центральній зоні зразка та мінімізувати вплив крайових дефектів на кінцевий результат. На основі отриманих експериментальних даних встановлено залежність характеристик міцності матеріалу від тривалості операції іонного обміну. Визначено, що максимальні значення міцності флоат-скла досягаються для тривалості обробки впродовж 24 годин, оскільки саме такий часовий інтервал забезпечує формування оптимального профілю наведених напружень стиску та достатню глибину проникнення модифікованого шару в структуру скла. Одержані результати мають практичну цінність для розробки енергоефективних режимів зміцнення скляних виробів, що працюють в умовах підвищених експлуатаційних навантажень

Ключові слова: флоат-скло, технології зміцнення, іонний обмін, границя міцності, осесиметричний згин.

Vadym Khvorostianyi¹, Ph.D., Senior Researcher; Mykola Dolgov¹, D.Sc., Prof.; Svitlana Tarasovska¹, Ph.D., Senior Researcher; Natalia Nemertseva², Andriy Kravchuk¹, Ph.D., Senior Researcher; Maksym Tsysar¹, Ph.D.; Volodymyr Bodunov

STUDY OF THE EFFECT OF THE DURATION OF THE ION EXCHANGE PROCESS ON THE STRENGTH OF FLOAT GLASS UNDER AXISYMMETRIC BENDING CONDITIONS

Abstract. A complex experimental study was performed to determine the influence of the ion exchange process duration on the strength of float glass sheets. The experimental stage of the research was realised on specimens in the form of square plates with a nominal thickness of 8.0 mm, which were tested by the axisymmetric bending technique using a double coaxial ring. This allowed for a uniform stress distribution in the central zone of the specimen and minimised the influence of edge defects on the final result. Using the experimental data obtained, the dependence of the strength characteristics of the material on the ion exchange duration was established. It was determined that the maximum strength of float glass is achieved for a processing duration of 24 hours, as this time period ensures the creation of an optimal profile of induced compressive stresses and sufficient penetration depth of the modified layer into the glass structure. The results obtained are of practical importance for the development of power-efficient strengthening conditions for glass components that are operated under conditions of increased service loads

Keywords: float glass, strengthening techniques, ion exchange, strength limit, axisymmetric bending.

Сучасним та високоефективним методом хімічного зміцнення скла є іонний обмін, який дозволяє суттєво зменшити негативний вплив наявних у приповерхневому шарі технологічних тріщиноподібних дефектів внаслідок створення напружень стиску, що блокують їх розвиток під дією зовнішнього навантаження. Основними факторами іонного обміну є температура процесу, його тривалість та концентрація іонів у сольовій ванні. Відомо, що збільшення температури та часу іонного обміну зумовлює зростання глибини модифікованого шару скла і зменшення величини напруження стиску [1]. Попри значну кількість досліджень у цій галузі, пошук оптимальних параметрів іонного обміну для флоат-скла різної товщини залишається актуальним. Це необхідно для досягнення таких показників як глибина зміцненого шару та напруження стиску, які забезпечать максимальну міцність матеріалу та довговічність елементів конструкцій із скла.

За літературними даними для зразків скла великих товщин під час іонного обміну застосовують температурний режим в діапазоні від 390...410 до 425...500 °С, а час технологічного процесу може становити від 6 до 24 годин. При цьому зазвичай глибина модифікованого шару скла складає 24...51 мкм, а найбільші значення 56...90 мкм. Рівень залишкових напружень стиску в зміцненому іонним обміном склі може досягати 600 МПа, а середнє значення границі міцності визначається в досить широких межах від 141 до 984 МПа [2]. Водночас відмічається значний розкид експериментальних результатів. В роботах [3, 4] показано, що підвищення тривалості проведення іонного обміну є причиною виникнення неоднорідних профілів напружень в іонно-обмінних шарах скла і наявності максимуму в глибині зразка. Водночас надмірне підвищення температури та подовження тривалості витримки скла в сольовому розплаві стають лімітуючими факторами для зростання його міцності, оскільки інтенсифікують процеси релаксації напружень стиску на поверхні зразків.

Мета даного дослідження полягає у виявленні та аналізі впливу часових параметрів іонообмінного процесу на характеристики міцності листового флоат-скла. Сформовані за результатами роботи висновки слугуватимуть науково-практичною базою для подальшої оптимізації виробництва виробів зі скла. Це дозволить досягти синергетичного ефекту: суттєвого зміцнення модифікованого флоат-скла при одночасному підвищенні економічної ефективності виготовлення продукції із нього.

Експериментальні дослідження виконували на підготовлених зразках розмірами 160 мм × 160 мм × 8,0 мм методом осесиметричного згину з використанням подвійного співвісного кільця [5, 6]. Аналізували три партії зразків скла, що піддавалися іонно-обмінному зміцненню протягом $t = 6, 12$ та 24 години відповідно за постійної температури $T = 420$ °С. Значення цієї температури обиралися з міркувань мінімізації витрат електроенергії та забезпечення проведення ефективного дифузійного іонно-обмінного процесу. Випробування провели на сертифікованій сервогідроліній установці Instron 8802 250 кН у жорсткому режимі навантаження із контрольованою швидкістю переміщення траверси 1 мм/хв. Дослідження виконані за температури $T = 15...17$ °С та відносної вологості повітря RH = 40...60 %.

Метод випробувань передбачав розміщення зразків у вигляді плоских квадратних пластин на опорному кільці радіусом a ($a = 32$ мм). Прикладення зусилля аж до моменту руйнування скла відбувалося за допомогою співвісно розташованого навантажувального кільця радіусом r_0 ($r_0 = 16$ мм). За таких співвідношень між товщиною зразка, довжиною його сторони та розмірами коаксіальних випробувальних кілець у робочій зоні зразка з площею, що окреслена розміром навантажувального кільця, створюється однорідний двовісний напружений стан. Це забезпечує розвиток усіх наявних мікротріщин чи інших дефектів тріщинуватого приповерхневого шару

скла незалежно від їх напрямку та орієнтації відносно осей зразка. Напруження, що виникають на кромках та крайовій області зразка за своєю величиною є значно меншими за ті, що діють у центральній зоні розтягу, які є визначальними за цих експериментальних умов. Визначена границя міцності скла залежить передусім саме від стану поверхні зразка. Тому цю механічну характеристику називають поверхневою міцністю плоского скла і визначають відповідно до наступного виразу [7]:

$$\sigma = \frac{3P}{2\pi \cdot h^2} \left[(1 - \mu) \frac{a^2 - r_0^2}{2a^2} \cdot \frac{a^2}{b^2} + (1 + \mu) \ln \left(\frac{a}{r_0} \right) \right] \quad (1)$$

де P – критичне значення прикладеного зусилля, що спричинило руйнування зразка, Н; h – товщина зразка, мм; μ – коефіцієнт Пуассона; b – радіус круга, який відповідає характеристичному розміру квадратної пластини, мм.

Загальна вибірка становила 30 зразків флоат-скла, розділених на три партії (8, 11 та 11 зразків відповідно), які піддавали іонообмінному зміцненню впродовж 6, 12 та 24 годин. Після завершення випробувань проводили аналіз характеру руйнування кожної пластини зруйнованого скла для ідентифікації джерела руйнування та підтвердження його локалізації в зоні під навантажувальним кільцем. На основі аналізу локалізації центрів руйнування було виключено два результати з вибірки зразків, що пройшли іонообмінну обробку впродовж $t = 6$ годин, оскільки початок руйнування відбувся за межами зони навантаження. Аналогічно, із вибірки з часом витримки $t = 24$ години вилучено один викид, який суттєво відхилявся від загального масиву даних і не враховувався у подальших розрахунках. Характер утвореної сітки радіальних тріщин з ознаками вторинного розтріскування та відповідний ступінь фрагментації зразків чітко корелюють із визначеними значеннями границі міцності скла на розтяг в умовах згину (рис. 1).



Рисунок 1 – Фотографії зруйнованих пластин флоат-скла з іонно-обмінним зміцненням протягом $t = 12$ годин: a – зразок № 11, $\sigma = 206$ МПа; b – зразок № 4, $\sigma = 601$ МПа.

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що для флоат-скла зразків товщиною 8 мм для отримання найбільшої міцності необхідний час технологічної операції іонного обміну становить $t = 24$ години. Саме такий час витримки зразків призводить до того, що дифузія іонів відбувається глибше в матеріал, приповерхневий модифікований шар скла стає з більш однорідними напруженнями стиску, а це своєю чергою є причиною найбільших значень границі міцності, визначеної методом осесиметричного згину. Встановлено, що середнє значення міцності у порівнянні з часом обробки 6 та 12 годин збільшилося на 18,9% та 7,2% відповідно; максимальне

значення міцності зросло більш суттєво – на 35,9% та 15,3% відповідно; мінімальне значення міцності також значно підвищилося – на 99,3% та 40,3% відповідно. Слід зазначити, що зі збільшенням часу іонного обміну розкид емпіричних результатів визначення границі міцності скла дещо зменшується. Гістограма залежності границі міцності флоат-скла від часу тривалості операції іонного обміну наведено на рис. 2.

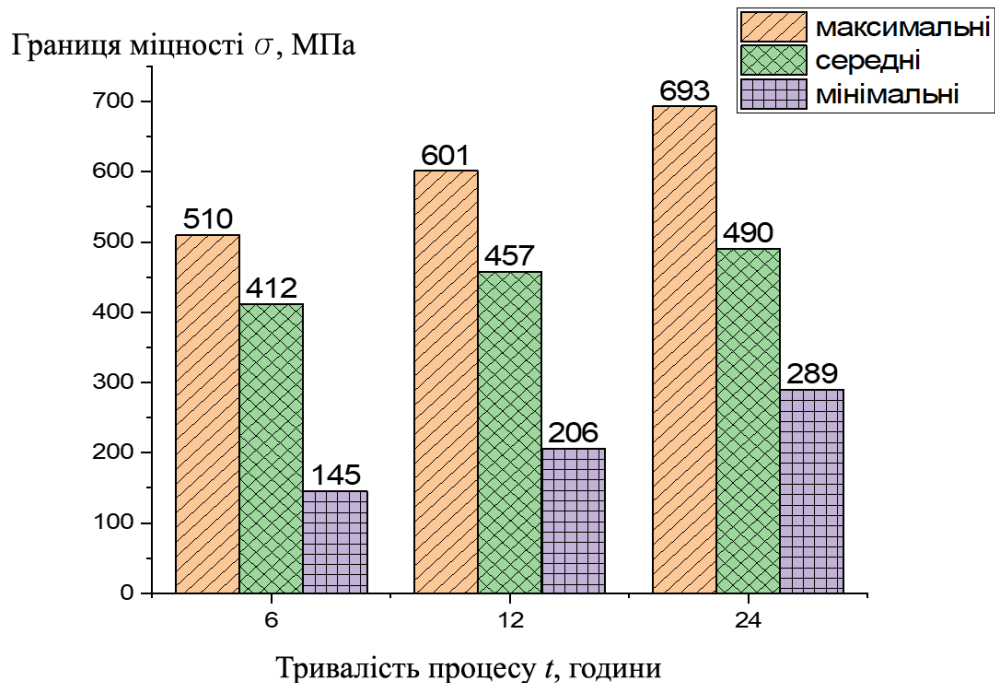


Рисунок 2 – Гістограма залежності границі міцності (максимальні, середні та мінімальні значення) флоат-скла від часу проведення іонно-обмінного процесу

Перелік посилань

1. Mognato E., Schiavonato M., Barbieri A., Pittoni M., Process influences on mechanical strength of chemical strengthened glass. *Glass Structures and Engineering*, Vol. 1, No. 1, P. 247 – 260 (2016).
2. Sglavo V. M., Chemical strengthening of soda lime silicate float glass: effect of small differences in the KNO₃ bath. *International Journal of Applied Glass Science*, Vol. 6, No. 1, P. 73 – 82 (2015).
3. Shen J., Green D. J., Prediction of stress profiles in ion exchanged glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 344, No. 1-2, P. 79 – 87 (2004).
4. Mazzoldi P. et al, Ion exchange process: history, evolution and applications. *Rivista del nuovo cemento*, Vol. 36, No. 9, P. 397 – 450 (2013).
5. Витман Ф. Ф., Пух В. П., О методе определения прочности листовых стекол. *Заводская лаборатория*, №7, С. 863 – 867 (1963).
6. EN ISO 1288-5:2022. Glass in building. Determination of the bending strength of glass – Part 5: Coaxial double-ring test on flat specimens with small test surface areas, BSI, UK (2022).
7. Müller-Braun S., Schneider J., Biaxially curved glass with large radii – determination of strength using the coaxial double ring test. *Glass Struct. Eng.*, Vol. 2, P. 121 – 131 (2017).

УДК 539.3

Вікторія Пастернак¹, к.т.н, доц.; Олег Ясній², д.т.н, проф.; Георгій Сулим³, д.ф.-м.н., проф.

¹Волинський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна

²Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, Україна

³Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

**ЕНЕРГЕТИЧНІ УМОВИ КОНТАКТУ КРИСТАЛІЧНИХ ТА
КВАЗІКРИСТАЛІЧНИХ ТІЛ**

У роботі розглянуто задачу моделювання у парадигмі механіки суцільного середовища контактної взаємодії пружних тіл у системах квазікристал – традиційний матеріал (кристалічний, полікристалічний, аморфний) з урахуванням особливостей фононного та фазонного полів. Запропоновано модель тонкого перехідного шару між матеріалами, що дає можливість описувати контакт таких матеріалів з використанням енергетичного підходу, вважаючи, що поверхнева енергія залежить від стрибків відповідних переміщень на інтерфейсі. На основі варіаційного підходу отримано узагальнені умови контакту, які пов'язують фононні та фазонні напруження зі стрибками цих полів на межі поділу.

Ключові слова: квазікристал, крайові умови, інтерфейс, функції стрибка, міжфазний прошарок.

Vikroriia Pasternak, Oleh Yasniy, Heorhiy Sulym

**ENERGY CONDITIONS FOR CONTACT OF CRYSTALLINE AND
QUASICRYSTALLINE SOLIDS**

Abstract. A model of a thin interfacial transition layer between the materials is proposed, which makes it possible to describe the contact of such materials using an energy-based approach, assuming that the surface energy depends on the jumps of the corresponding displacement fields at the interface.

Key words: quasicrystal, boundary conditions, interface, jump function, interphase layer.

Незважаючи на створені протягом останніх десятиліть основи теорії пружності квазікристалів, вивчення контакту квазікристалічних тіл стосуються лише поодинокі роботи. Однак навіть у них крайові умови задають лише формально, без розгляду відповідних фізичних підстав. Адже досі не з'ясовано, чи таке задання є виправданим, оскільки при описі деформування квазікристалів поряд із класичним фононним полем переміщень враховують появу додаткового специфічного фазонного поля, яке відображає не властиве жодному традиційному матеріалу перегрупування атомів квазіперіодичної структури та його вплив на фононні структури. Це стосується не тільки умов контакту матеріалів різного типу, а й формулювання натуральних фазонних крайових умов на поверхні вільного квазікристалічного тіла. Про проблему математичного опису фазонного поля та умов контакту свідчать спроби залучення до його рівнянь руху чи рівноваги факторів, що відповідають за фазонний власний вплив (phason self-action).

Важливо також зазначити, що фазонні та фонон-фазонні пружні сталі квазікристалічних матеріалів визначають не безпосередньо з експериментів суто механічного характеру (фазонні поля для них неспостережувані), а шляхом їхнього сумісного проведення разом з іншими фізичними дослідженнями, наприклад, рентгенівською дифрактометриєю. Через це вивчення контактної взаємодії традиційних

матеріалів із квазікристалічними може також дати змогу створити додаткові підходи обчислення матеріальних сталих квазікристалів.

З огляду на це у даній роботі із загальних припущень континуальної за суттю теорії пружності квазікристалів розглядаються умови їхнього ідеального нерозривного контакту із кристалічними та аморфними матеріалами з урахуванням тонкого проміжного перехідного шару, наявного у таких кусково-однорідних структурах.

Густина вільної енергії деформації квазікристала дорівнює

$$\begin{aligned} W(\varepsilon_{ij}, w_{i,j}) &= \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} + \frac{1}{2} H_{ij} w_{i,j} = \frac{1}{2} \sigma_{ij} u_{i,j} + \frac{1}{2} H_{ij} w_{i,j} = \\ &= \frac{1}{2} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} + \frac{1}{2} K_{ijkl} w_{i,j} w_{k,m} + R_{ijkl} \varepsilon_{ij} w_{k,m}, \end{aligned} \quad (1)$$

де σ_{ij} – фононні напруження; H_{ij} – фазонні напруження; $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ – компоненти фононного тензора деформацій; $w_{i,j}$ – фазонні деформації; u_i, w_i – відповідно фононні (класичні) та фазонні (в ортогональному просторі) переміщення; C_{ijkl} – компоненти тензора фононних пружних сталих; K_{ijkl} – компоненти тензора фазонних пружних сталих; R_{ijkl} – компоненти тензора фононно-фазонної взаємодії.

Розглянемо тіло, що складається із нерозривно поєднаних між собою двох тіл: з традиційного пружного (кристалічного, полікристалічного, аморфного) та з квазікристалічного матеріалу. Зайняту традиційним матеріалом область позначимо Ω_{tr} , а квазікристалічним – Ω_{qc} . На межі зчеплення матеріалів розташований перехідний шар S завтовшки $2h$.

Повна енергія тіла дорівнюватиме сумі енергій матеріалів традиційного, квазікристалічного та перехідного шару

$$\Pi = \iint_{\Omega^{tm}} W^{tm} d\Omega + \iint_{\Omega^{qc}} W^{qc} d\Omega + \int_S \Psi dS, \quad (2)$$

де через Ψ позначено зведену до серединної поверхні інтерфейсову густину енергії деформації шару S . Виходячи із принципу мінімуму потенціальної енергії $\delta\Pi = 0$ отримано умови контакту між кристалічним та квазікристалічним матеріалами за наявності тонкого перехідного шару.

Зокрема, за ідеального контакту

$$\sigma_{ij}^{tm} n_j^{tm} = -\sigma_{ij}^{qc} n_j^{qc}, \quad u_i^{tm} = u_i^{qc}. \quad (3)$$

Однак у цьому випадку для фазонного поля на межі поділу матеріалів з боку квазікристалу маємо таке співвідношення:

$$H_{ij}^{qc} n_j^{qc} = -k_{ik}^w w_k^{qc}, \quad (4)$$

де k_{ik}^w – зведена фазонна жорсткість проміжного шару. Тобто, за наявності ідеального фононного контакту між матеріалами внаслідок наявності когезійного шару виникають також і фазонні напруження.

Врахування такої поведінки важливе при розгляді структурно неоднорідних матеріалів із квазікристалічним наповненням, адже їхнє деформування буде пов'язане не тільки зі зміною фононної і фазонної складових енергії деформації компонент, а й зі зміною поверхневої енергії на межі контакту, що необхідно враховувати при оцінюванні тріщиновитримності інтерфейсів та ефективних характеристик таких композицій.

УДК 539.42, 004.89,

Олег Ясній, д.т.н., проф.; Павло Марушак, д.т.н., проф.; Ірина Дідич, д-р філософії, доц.; Дмитро Тимошук; Любов Цимбалюк, к.ф.-м.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна.

АНАЛІЗ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ В ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ ЗА РІЗНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ НАВАНТАЖЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПОЯСНЮВАЛЬНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Анотація. У роботі досліджено застосування алгоритму Extra Trees Regressor для прогнозування росту втомної тріщини в титановому сплаві за різних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження. Отримані результати підтвердили високу точність та ефективність моделі у задачах механіки руйнування.

Ключові слова: ріст втомної тріщини, штучний інтелект, методи машинного навчання, Extra Trees Regressor

Oleh Yasniy, Pavlo Maruschak, Iryna Didych, Dmytro Tymoshchuk, Liubov Tsymbaliuk
ANALYSIS OF FATIGUE CRACK GROWTH IN TITANIUM ALLOY UNDER
VARIOUS STRESS RATIOS USING EXPLAINABLE MACHINE LEARNING

Abstract. The paper investigates the application of the Extra Trees Regressor algorithm for predicting fatigue crack growth in a titanium alloy under different stress ratio conditions. The obtained results confirmed the high accuracy and efficiency of the model in fracture mechanics problems.

Keywords: fatigue crack growth, artificial intelligence, machine learning methods, Extra Trees Regressor

Втомне руйнування конструкційних матеріалів є однією з основних причин виходу з ладу відповідальних елементів конструкцій, транспортних систем, авіаційної техніки та енергетичного обладнання. Важливою проблемою є процес росту втомних тріщин (РВТ), який характеризується поступовим накопиченням пошкоджень у матеріалі під дією циклічних навантажень і призводить до раптового руйнування конструкцій. Тому прогнозування РВТ є важливою задачею механіки руйнування.

Експериментальні методи дослідження втомного руйнування характеризуються значною трудомісткістю, високою вартістю та тривалістю випробувань. У зв'язку з цим останніми роками активно розвиваються підходи, засновані на застосуванні методів машинного навчання для аналізу експериментальних даних і прогнозування процесів руйнування. У роботах [1-4] продемонстровано ефективність методів машинного навчання та ансамблевих моделей для прогнозування росту втомних тріщин, оцінювання довговічності матеріалів і аналізу впливу параметрів циклічного навантаження. Зокрема, у працях [1-2] досліджено можливості застосування методів машинного навчання для прогнозування розвитку втомних пошкоджень у титанових сплавах, а у роботі [3] проведено порівняльний аналіз ансамблевих алгоритмів для задач прогнозування втомної довговічності. Водночас актуальним напрямом розвитку штучного інтелекту є Explainable machine learning, що дозволяє не лише отримувати точні прогнози, але й аналізувати вплив окремих вхідних параметрів на результати моделювання [5]. У даній роботі досліджено можливість застосування ансамблевого алгоритму Extra Trees Regressor для аналізу росту втомної тріщини в титановому сплаві за різних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження. Особливу увагу приділено інтерпретації результатів моделювання та оцінюванню важливості вхідних параметрів із використанням підходів Explainable machine learning.

Для дослідження процесу росту втомної тріщини (РВТ) в титановому сплаві застосовано експериментальні дані [6], що описують залежність довжини тріщини a від кількості циклів навантаження N за коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження $R=0.03, 0.1$ та 0.3 . Вибірка містила 154 експериментальних даних. Вхідними параметрами моделі були N та R , а вихідним параметром - довжина тріщини a .

Для побудови моделі застосовано ансамблевий алгоритм Extra Trees Regressor, реалізований у програмному середовищі Python із використанням бібліотеки PyCaret. Попередньо було виконано автоматизоване порівняння декількох алгоритмів машинного навчання, серед яких Random Forest, Gradient Boosting, Extra Trees та інші регресійні моделі, за результатами якого алгоритм Extra Trees Regressor продемонстрував найкращі показники точності прогнозування. Алгоритм ґрунтується на побудові ансамблю дерев рішень із випадковим вибором ознак та порогів розщеплення, що дозволяє підвищити узагальнювальну здатність моделі та зменшити ризик перенавчання. Попередня обробка даних включала нормалізацію параметрів із використанням StandardScaler. Для забезпечення відтворюваності результатів використано фіксоване значення random state = 42. Налаштування моделі здійснювалося автоматизовано засобами PyCaret із подальшим вибором найкращої конфігурації гіперпараметрів. Оптимальна модель містила 100 дерев рішень із використанням критерію squared error для оцінювання якості розщеплення вузлів. Вибірку поділено на тренувальну та тестову частини у співвідношенні 80/20. Для інтерпретації результатів прогнозування використано підхід Explainable Machine Learning. Аналіз важливості вхідних параметрів здійснювали методом permutation importance, який дозволяє оцінити ступінь впливу кожної ознаки на точність моделі.

На рис. 1 показано порівняння прогнозованих та експериментальних значень довжини втомної тріщини, отриманих за допомогою моделі Extra Trees Regressor. Висока концентрація точок уздовж лінії прогнозу свідчить про високу точність побудованої моделі та її здатність адекватно відтворювати закономірності росту втомної тріщини в титановому сплаві за різних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження. Незначне розсіювання точок відносно бісектриси підтверджує добру узгодженість між експериментальними та прогнозованими значеннями.

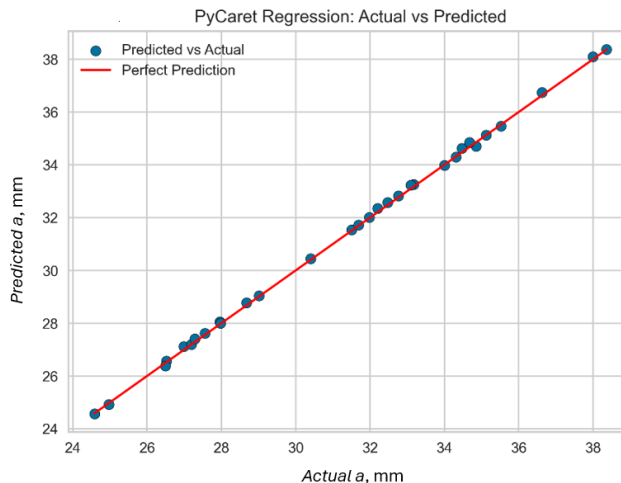


Рисунок 1. Порівняння експериментальних та прогнозованих значень довжини втомної тріщини для моделі Extra Trees Regressor

Аналіз важливості параметрів показав, що найбільший вплив на прогноз росту втомної тріщини має кількість циклів навантаження N , тоді як коефіцієнт асиметрії

циклу навантаження R також має помітний вплив на результати прогнозування. Це підтверджує фізичну узгодженість отриманої моделі.

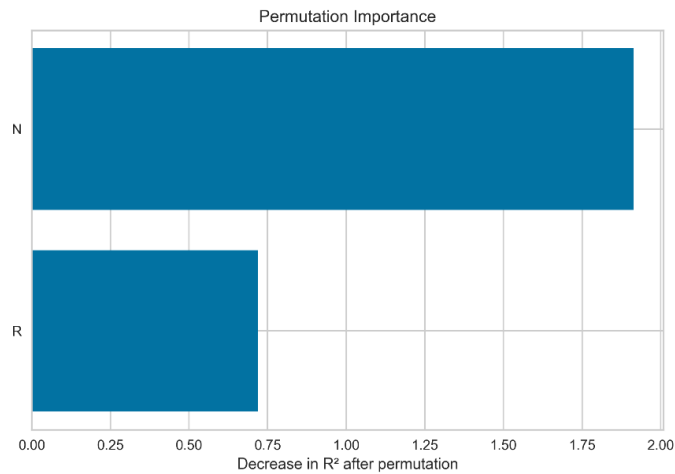


Рисунок 2. Важливість вхідних параметрів моделі, визначена методом Permutation Importance

На рис. 3 представлено криву навчання моделі. Зі збільшенням кількості навчальних прикладів значення коефіцієнта детермінації R^2 для тестової вибірки зростає та наближається до значення для навчальної вибірки, що свідчить про хорошу узагальнювальну здатність моделі та відсутність суттєвого перенавчання.

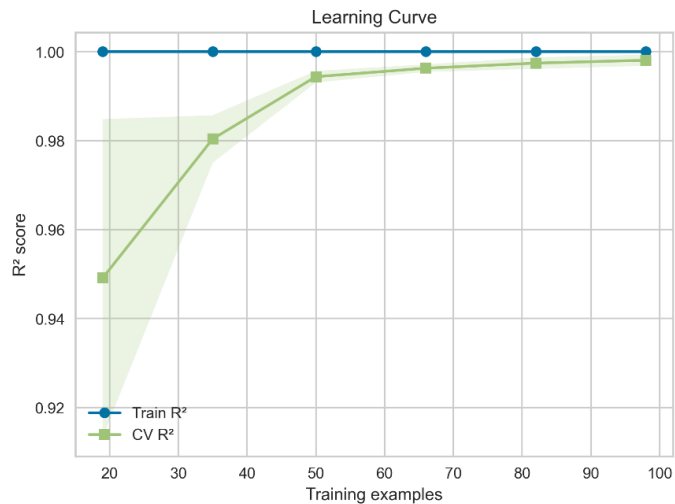


Рисунок 3. Крива навчання моделі Extra Trees Regressor

На рисунку 4 наведено порівняння експериментальних та прогнозованих значень довжини втомної тріщини a залежно від кількості циклів навантаження N для різних значень коефіцієнта асиметрії циклу навантаження $R=0.03, 0.1$ та 0.3 . Отримані результати демонструють високу узгодженість між експериментальними даними та прогнозами моделі. Із зростанням параметра R спостерігається прискорення росту тріщини, що відповідає фізичним закономірностям процесу втомного руйнування титанових сплавів. Якість моделі оцінено за допомогою стандартних метрик регресійного аналізу: середньоквадратичної похибки (MSE), середньої абсолютної похибки (MAE), середньої абсолютної відносної похибки (MAPE) та коефіцієнта детермінації R^2 . Отримані результати свідчать про високу точність побудованої моделі, зокрема, $R^2=0.9994$, MAPE=0.23%, MAE=0.073, MSE=0.0079.

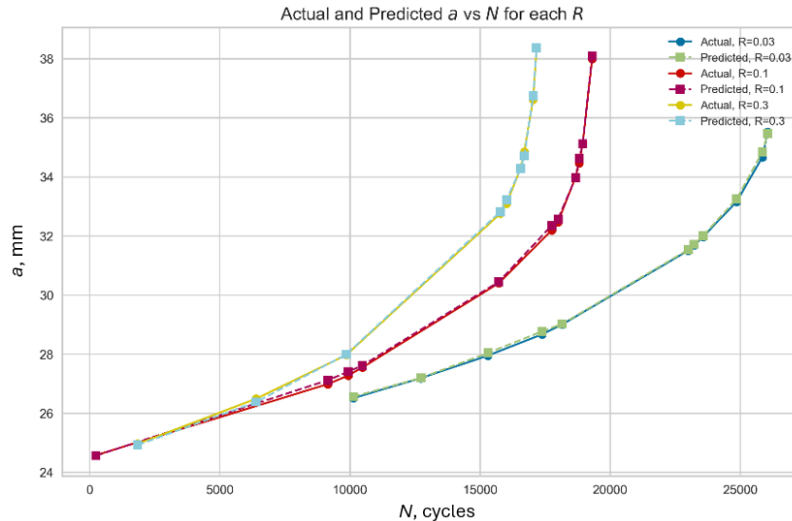


Рисунок 4. Порівняння експериментальних та прогнозованих залежностей довжини втомної тріщини від кількості циклів навантаження для різних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження

Таким чином, результати дослідження підтвердили ефективність застосування алгоритму Extra Trees Regressor для прогнозування РВТ в титановому сплаві за різних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження. Побудована модель забезпечує високу точність прогнозування та адекватно відтворює закономірності росту тріщини. Аналіз важливості параметрів показав домінуючий вплив кількості циклів навантаження N на процес розвитку втомного пошкодження. Отримані результати свідчать про перспективність використання методів пояснювального машинного навчання для задач механіки руйнування та прогнозування довговічності конструкційних матеріалів.

Перелік посилань

1. Shen Z., Lv G., Fu D. et al. A machine learning study on the fatigue crack path of short crack on an α titanium alloy // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2023. – Vol. 381(2260). – 20220391. <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0391>.
2. Zhu S., Zhang Y., Zhu B. et al. High cycle fatigue life prediction of titanium alloys based on a novel deep learning approach // International Journal of Fatigue. – 2024. – Vol. 182. – 108206. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108206>.
3. Farhadi S., et al. Comparative analysis of ensemble learning techniques for fatigue life prediction // Scientific Reports. – 2025 – 15, 11136. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79476-y>.
4. Renzo D.A. et al. Methodologies developed for dataset preparation and the machine learning-based prediction of fatigue crack growth in alloys // Materials Today Communications. – 2025 – 28, 107516. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107516>.
5. Liu J., Chen J., Sun Z., Zhang H., Yuan Q., A study on fatigue crack closure associated with the growth of long crack in a new titanium alloy // Metals. – 2023. – 13(8), 1377. <https://doi.org/10.3390/met13081377>.
6. Yasniy O., Didych I., Tymoshchuk D., Maruschak P., & Demchyk V. Prediction of structural elements lifetime of titanium alloy using neural network // Procedia Structural Integrity. – 2025. – 72. – P. 181-187. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.090>.

Секція: НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН

УДК 621.867.42

І.В. Бельмас, докт. техн. наук, проф.; Д.П. Часов канд. техн. наук, доц.; В.О. Бейгул, канд. техн. наук, доц.; Н.О. Захаров, аспірант; Д.Л. Серілко², канд. техн. наук, доц.

¹Дніпровський державний технічний університет

²Національний університет водного господарства та природокористування

ДО ПИТАННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ЕЛЕНТІВ ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ (ДВОШАРОВІ КОМПОЗИТИ)

Анотація. Робота спрямована на формулювання та розв'язання загальної математичної моделі деформації гнучкого елемента конструкції з двошаровою структурою, що складається з шарів довільної товщини та матеріалів з різними механічними властивостями.

Ключові слова: допоміжне обладнання, двошарові елементи, деформація.

I. Belmas, D. Chasov, V. Beihul, N. Zakharov, D. Serilko ON THE ISSUE OF DEFORMATION OF AUXILIARY EQUIPMENT ELEMENTS (TWO-LAYER COMPOSITES)

Abstract. The work is aimed at formulating and solving a general mathematical model of the deformation of a flexible structural element with a two-layer structure consisting of layers of arbitrary thickness and materials with different mechanical properties.

Keywords: auxiliary equipment, two-layer elements, deformation.

У межах дослідження обидва шари двошарового гнучкого елемента конструкцій розглядаються як такі, що мають рівномірну ширину, є лінійно пружними та ізотропними; механічні властивості армованого шару попередньо узагальнені. Модель кожного шару сформульована з використанням методів лінійної теорії пружності із застосуванням функцій напружень Ері. Врахування сумісності деформації шарів та навантаження їх поверхонь дозволило сформулювати та розв'язати математичну модель, як єдиної двошарової системи.

Сформульовано граничні умови для зовнішніх поверхонь шарів $z=H_1$ та $z=-H_2$:

$$\begin{aligned} \text{за } z=-H_1 \quad Z_z^{(1)} &= P(x), \quad Z_x^{(1)} = 0, \\ \text{за } z=H_2 \quad Z_z^{(2)} &= P_2(x), \quad Z_x^{(2)} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де Z_z , X_x , Z_x – нормальні та дотичні напруження в матеріалах шарів.

Складено умови сумісного та нерозривного деформування шарів за $z=0$.

$$u_x^{(1)} = u_x^{(2)}, \quad u_z^{(1)} = u_z^{(2)}, \quad Z_z^{(1)} = Z_z^{(2)}, \quad Z_x^{(1)} = Z_x^{(2)}, \quad (2)$$

де u_x - переміщення вздовж осі x .

Врахуємо форму умов (1, 2). Показники НДС шарів гнучкого елемента задамо скориставшись функцією напружень Ері. Переміщення та напруження в шарах гнучкого елемента запишемо без урахування рівномірно розподілених складових напружень та деформації ним спричинених.

$$u_x^{(k)} = -\frac{1}{2G_k} \frac{\partial^2 \varphi^{(k)}(x, z)}{\partial x \partial z},$$

$$\begin{aligned}
 u_z^{(k)} &= \frac{1}{2G_k} \left(2(1-\mu_k) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi^{(k)}(x, z), \\
 X_x^{(k)} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_k \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \varphi^{(k)}(x, z), \\
 Z_z^{(k)} &= \frac{\partial}{\partial z} \left((2-\mu_k) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi^{(k)}(x, z), \\
 Z_x^{(k)} &= \frac{\partial}{\partial x} \left((1-\mu_k) \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi^{(k)}(x, z),
 \end{aligned} \tag{3}$$

де $k=1, 2$ – номери шарів; $\nabla^2(\dots) = \frac{\partial^2 \dots}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dots}{\partial z^2}$; $\rho_m = \pi \frac{m}{a}$; G_k – модулі зсуву матеріалу шарів; $\varphi^{(k)}(x, z)$ – функції напружень Ері обрані для шарів гнучкого елемента.

Встановлено, що характер деформацій гнучкого елемента близький до параболічного. Абсолютні значення прогинів суттєво залежить від механічних властивостей матеріалу шарів. Зростання модулю зсуву, значень коефіцієнтів Пуассона матеріалу шарів призводить до зростання жорсткості елемента на згин під впливом надлишкового тиску в ємності.

Перелік посилань

1. Бельмас І.В., Білоус О.І., Танцура Г.І. Визначення напружено-деформованого стану багат шарового композиту. Опір матеріалів та теорія споруд. Київський національний університет будівництва і архітектури. 2022, № 109. с.426 – 440. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.426-440>
2. Serilko L. S., Lyashuk O. L., Chasov D. P., Serilko D. L., Ihnatiuk R. M. (2025). Body movement along the surface of an inertial conveyor chute under combined friction. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 12(1), pp. D1–D8. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).d1](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).d1)

УДК: 539.3

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

Борис Шелестовський, к.ф.-м.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПЛАСТИНІ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВАННІ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ

Анотація. У роботі розглянуто аналітичний підхід до оцінювання залишкових напружень у пластині при локальному нагріванні під час зварювання. Запропоновано модель пружного ізотропного шару з полем залишкових пластичних деформацій, що дозволяє визначати радіальні, кільцеві, нормальні та дотичні напруження. Проведено чисельний аналіз розподілу напружень залежно від товщини пластини та параметрів зони нагрівання. Показано, що для тонких пластин результати тривимірної та двовимірної теорій добре узгоджуються, тоді як зі збільшенням товщини суттєво проявляється об'ємний характер напруженого стану.

Ключові слова: залишкові напруження, локальне нагрівання, зварювання, пластичні деформації, напружений стан, пружний шар.

Hryhorii Habrusiev; Iryna Habrusieva; Borys Shelestovskyi.

ASSESSMENT AND PREDICTION OF RESIDUAL STRESSES IN A PLATE UNDER LOCALIZED HEATING DURING WELDING

Abstract. The paper presents an analytical approach for assessing residual stresses in a plate under localized heating during welding. The proposed model enables determination of radial, hoop, normal and shear stresses and reveals the influence of plate thickness on the three-dimensional stress state.

Keywords: residual stresses, welding, localized heating, stress state, plastic strains

Зварювання є одним із найбільш поширених способів з'єднання елементів конструкцій у машинобудуванні, енергетиці, транспортній та авіакосмічній галузях. Воно широко застосовується під час виготовлення корпусних конструкцій, трубопроводів, резервуарів, елементів силових установок та інших відповідальних деталей, що працюють в умовах значних механічних і температурних навантажень. Однією з основних проблем під час виконання зварних з'єднань є виникнення залишкових напружень, спричинених нерівномірним нагріванням і охолодженням матеріалу. Такі напруження можуть призводити до локальних деформацій, втрати геометричної точності конструкцій, появи тріщин та зниження втомної міцності елементів. При цьому характерним є складний просторовий напружено-деформований стан, що суттєво ускладнює прогнозування залишкових напружень та оцінювання довговічності конструкцій. У зв'язку з цим розроблення аналітичних моделей, які дозволяють оперативно оцінювати вплив параметрів зварювання та геометричних характеристик конструкції на розподіл залишкових напружень, є актуальною науково-прикладною задачею. У проведеному дослідженні пластина моделюється як пружний ізотропний шар товщиною h . Циліндричну систему координат r, φ, z обрано з початком на верхній поверхні пластини. Базові співвідношення для складових тензорів напружень і переміщень отримано вираженнями тензора повної деформації ε_{ij} у вигляді суми тензора пружної деформації ε_{ij}^e та тензора вільної (пластичної) деформації ε_{ij}^0 .

Аналітично поле залишкових пластичних деформацій, що виникає в пластині за рахунок локалізованого нагрівання при зварюванні, можна описати наступним чином:

$$\varepsilon_{rr}^0 = -\varepsilon_0^* (1 - \omega p^2 r^2) e^{-p^2 r^2}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi}^0 = -\varepsilon_0^* (1 + \omega p^2 r^2) e^{-p^2 r^2}, \quad \varepsilon_{zz}^0 = -(\varepsilon_{rr}^0 + \varepsilon_{\varphi\varphi}^0), \quad (1)$$

параметри ε_0^* , ω , p – отримуються експериментально [1].

Для опису напружено-деформованого стану використано рівняння тривимірної теорії пружності та осесиметричні припущення. Це дозволило отримати аналітичні вирази для визначення радіальних, кільцевих, нормальних і дотичних напружень, а також різниці головних напружень за товщиною пластини.

Проведено чисельний аналіз з використанням експериментально визначених параметрів поля залишкової пластичної деформації $\varepsilon_0^* = 1.2\%$, $p^2 = 0.4$, $\omega = 2/3$, $\omega = 5/3$ та коефіцієнта Пуассона $\nu = 0.3$. На Рис. 1 показано розподіл пластичних деформацій уздовж радіальної координати.

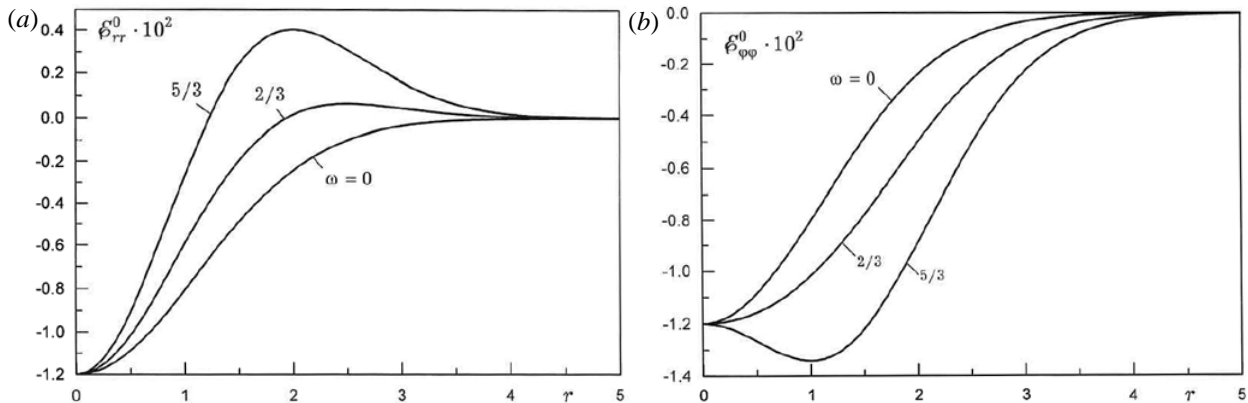


Рисунок 1. Розподіл (а) пластичних радіальних деформацій і (б) пластичних колових деформацій вздовж радіальної координати для різних значень параметра ω .

На Рис. 2-6 продемонстровано отримані розподіли залишкових напружень по радіальній координаті пластини та через її товщину для різних товщин пластини та параметрів поля пластичної деформації. Пунктирні лінії на Рис. 3 і 4 показують залежність радіальних та колових напружень, розрахованих за формулами, що відповідають розв'язанню задачі про тонку пластину за припущення нульових нормальних σ_{zz} і дотичних напружень σ_{rz} , тобто відповідно до плоского напруженого стану (ПНС). Графіки побудовані для безрозмірних напружень, нормалізованих за $G\varepsilon_0^*$ (позначених на малюнках 2-6 символом "~" над відповідним параметром).

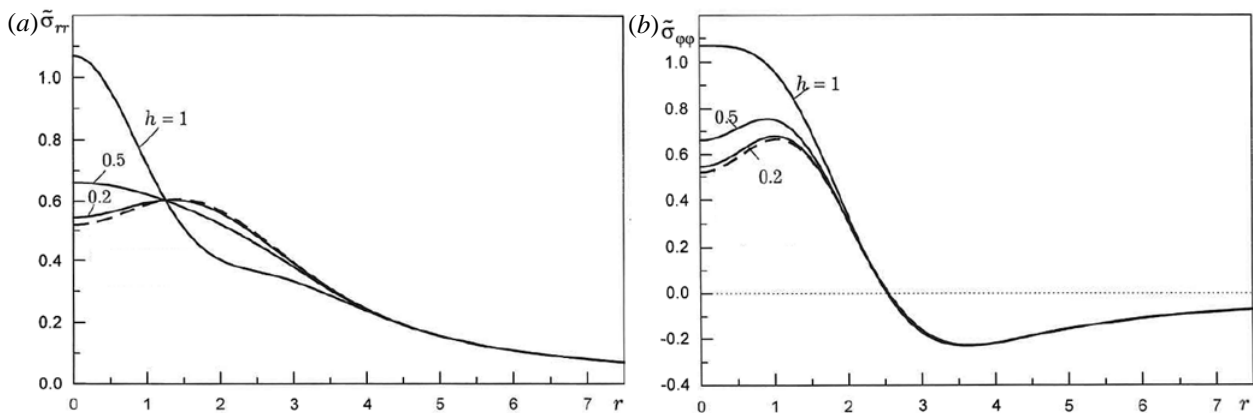


Рисунок 2. Залежність залишкових радіальних (а) і колових (б) напружень на поверхні пластини від радіальної координати для різних значень товщини пластини при $\omega = 2/3$.

Результати, показані на Рис. 2, свідчать про те, що залишкові напруження, викликані процесами зварювання для яких поле пластичної деформації можна описати виразами

(1), обчислені на основі тривимірної та двовимірної теорій пластин добре узгоджується для пластин товщиною близько 2 мм. Якісний характер варіації залишкових напружень уздовж радіальної координати, отриманий з обох теоретичних підходів, подібний до товщини приблизно 5 мм.

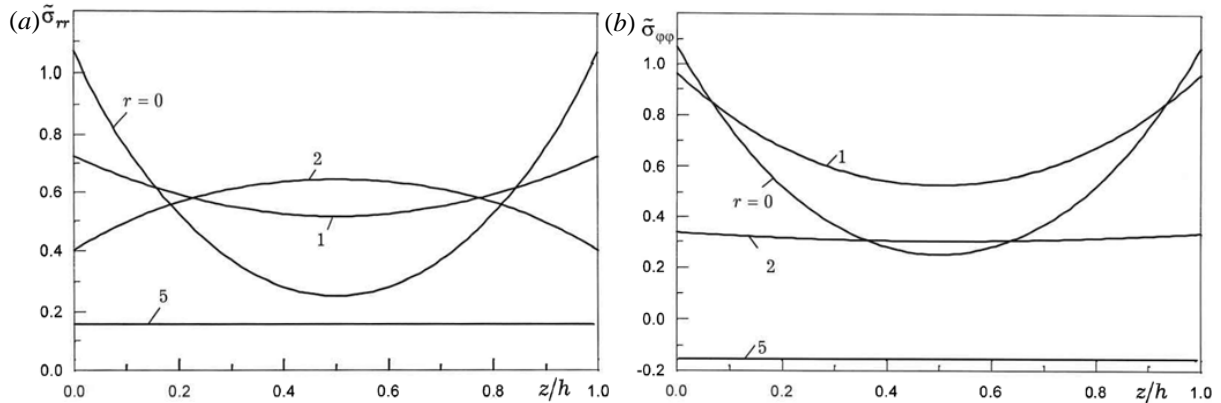


Рисунок 3. Залежність залишкових радіальних (a) та колових (b) напружень від нормалізованої координати товщини вздовж нормалі до поверхні пластини для різних значень радіальної координати.

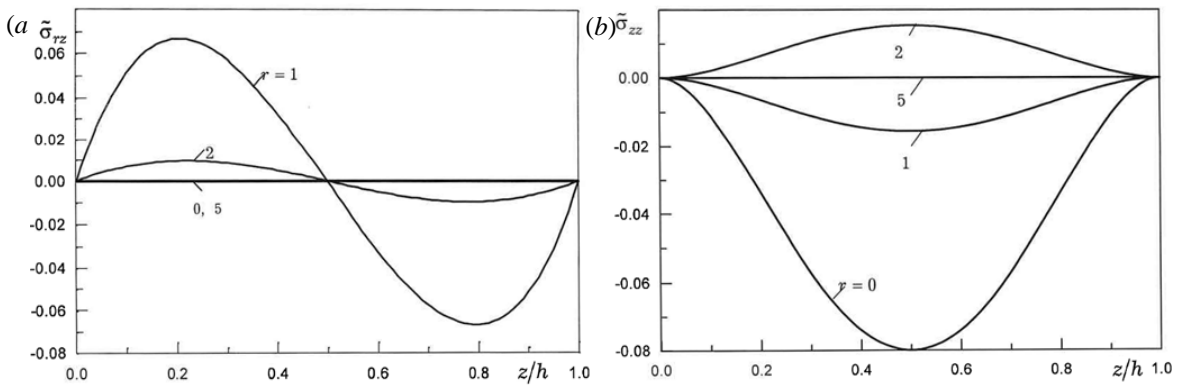


Рисунок 4. Залежність залишкових дотичних (a) та нормальних напружень (b) від нормалізованої координати товщини вздовж нормалі до поверхні пластини для різних значень радіальної координати.

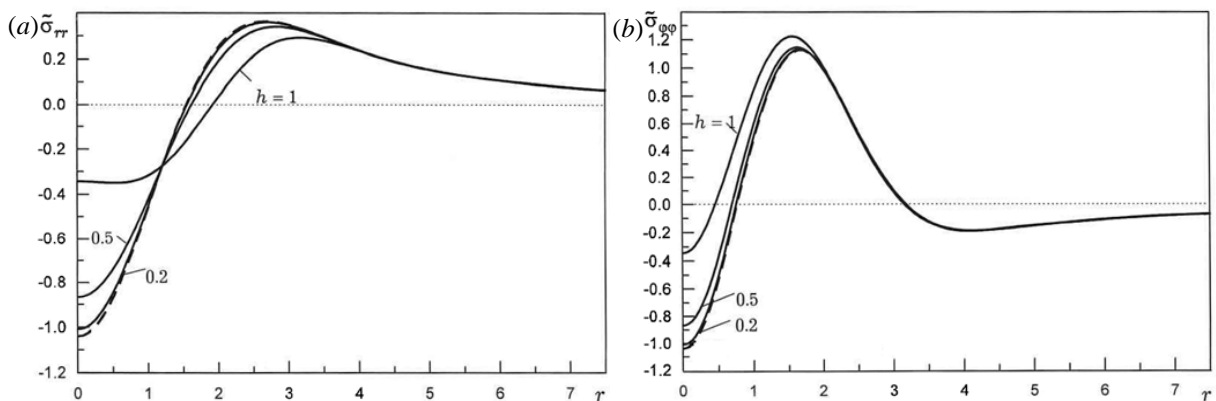


Рисунок 5. Залежність залишкових радіальних (a) і колових (b) напружень на поверхні пластини від радіальної координати для різних значень товщини пластини при $\omega = 5/3$.

Зі збільшенням товщини об'ємний характер розподілу залишкової напруги стає більш помітним (Рис. 4). У цьому випадку нормальні напруження досягають максимальних значень в середній площині пластини (Рис. 4b), тоді як дотичні напруження максимальні на відстанях приблизно 0.2 товщини пластини від її поверхонь (Рис. 4a). Ці результати подібні до отриманих раніше за допомогою теорії тривимірної пластини з використанням додаткових припущень щодо розподілу напружень [1] при аналізі розподілу залишкових напружень поблизу зварного шва, а також до чисельних та експериментальних результатів [2].

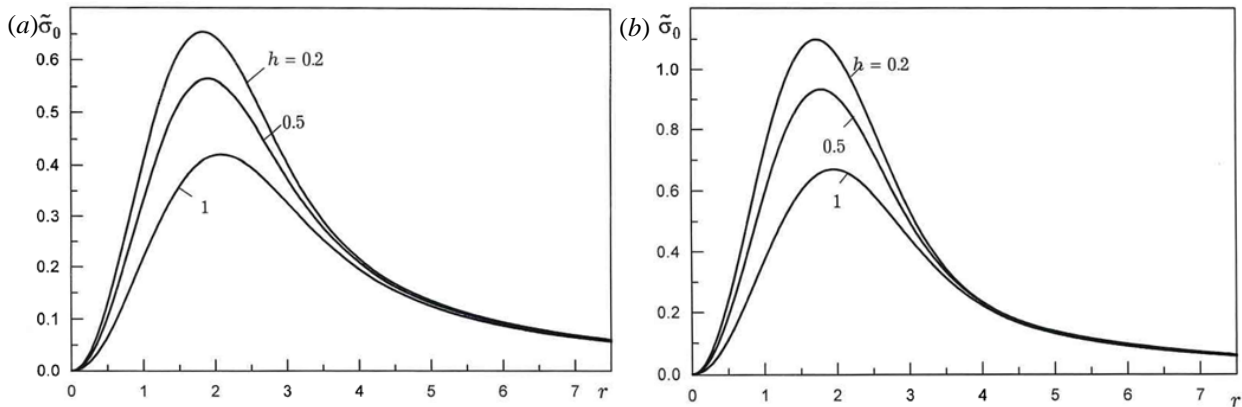


Рисунок 6. Розподіл усередненої по товщині різниці головних напружень уздовж радіальної координати для різних значень товщини пластини при $\omega = 2/3$ (a) та $\omega = 5/3$ (b).

Отримані результати підтверджують локалізований характер об'ємного напруженого стану поблизу зони зварювання та поступовий перехід до плоского напруженого стану на віддаленні від неї. Встановлено, що зі збільшенням товщини пластини суттєво зростає вплив просторового розподілу напружень, зокрема нормальних і дотичних компонент, які не враховуються у межах класичної плоскої моделі. Показано, що максимальні нормальні напруження локалізуються у серединній площині пластини, тоді як максимуми дотичних напружень зміщуються до поверхневих шарів матеріалу. Запропонований аналітичний підхід дозволяє виконувати оцінювання залишкових напружень без застосування складних чисельних методів, забезпечуючи при цьому достатню точність для інженерних розрахунків. Отримані залежності можуть бути використані для прогнозування напружено-деформованого стану зварних конструкцій, оптимізації режимів зварювання, вибору геометричних параметрів елементів та підвищення довговічності і надійності конструкцій, що працюють в умовах циклічних і термосилових навантажень.

Перелік посилань

1. Недосека А. Я. Основи розрахунку та діагностики зварних конструкцій. Київ : ІНДПРОМ, 2008. 816 с.
2. Лобанов Л. М., Махненко В. І., Труфяков В. І. Зварні будівельні конструкції. Київ : Наукова думка, 2005. 416 с.
3. Rosenthal D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments // Transactions of the ASME. 1946. Vol. 68. P. 849–866.
4. Шелестовський Б., Габрусев Г. Контактна взаємодія штампа з шаром, що містить залишкові деформації, спричинені кільцевим зварним швом // машинознавство. 2003. № 2. С. 9–12.
5. Habrusiev H. The effect of initial deformations of the thick plate on its contact interaction with the ring punch / Hryhorii Habrusiev, Iryna Habrusieva, Boris Shelestovs'kyi // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2018. — Vol 90. — No 2. — P. 50–59.

УДК 621.891

Андрій Гупка, к.т.н., доц.; Олег Цьонь, к.т.н., доц.; Олег Ляшук, д.т.н., проф.; Тетяна Пиндус; Степан Остапчук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

Анотація. У роботі розглянуто закономірності структурно-енергетичної пристосовуваності трибоспрямижень у процесах тертя та зношування. Запропоновано критерії оцінювання стану вторинних структур на основі параметрів контактного електроопору. Досліджено процеси переходу від режиму нормального зношування до об'ємної деструкції поверхневих шарів. Встановлено кореляцію між параметрами контактного електроопору, інтенсивністю зношування та коефіцієнтом тертя.

Ключові слова: трибоспрямиження, контактний електроопір, вторинні структури, структурно-енергетична пристосовуваність, зношування, руйнування.

Andrii Gypka, PhD, Associate Professor; Oleh Tson, PhD, Associate Professor; Oleh Liashyk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tetiana Pyndus, Assistant; Stepan Ostapchuk, Postgraduate Student.

STRUCTURAL-ENERGY CRITERIA FOR EVALUATING FRICTION AND WEAR PROCESSES

Abstract. The paper considers the regularities of structural-energy adaptability of tribosystems during friction and wear processes. Criteria for evaluating the state of secondary structures based on contact electrical resistance parameters are proposed. The transition processes from normal wear to volumetric destruction of surface layers are investigated. Correlations between contact electrical resistance, wear intensity, and friction coefficient are established.

Keywords: tribosystems, contact electrical resistance, secondary structures, structural-energy adaptability, wear, destruction.

На сучасному етапі розвитку трибології актуальним є дослідження процесів, що відбуваються у зоні фрикційного контакту, а також розроблення матеріалів і конструкцій із підвищеною зносостійкістю. Одним із ключових напрямів є вивчення феномену самоорганізації матеріалів, який у режимі граничного тертя проявляється як структурно-енергетична пристосовуваність (СЕП). Вона супроводжується утворенням вторинних структур (ВС), що запобігають прямому контакту поверхонь, зменшують інтенсивність зношування та перешкоджають розвитку об'ємної деструкції [1].

Встановлено, що в діапазоні СЕП процеси утворення та руйнування вторинних структур перебувають у динамічній рівновазі, що забезпечує мінімальні значення інтенсивності зношування (I) та коефіцієнта тертя (μ). Однак традиційні методи оцінювання зношування потребують значного часу досліджень і характеризуються високим розсіюванням результатів. Тому важливим є розроблення експресних методів контролю процесів тертя та руйнування поверхневих шарів.

Одним із найбільш чутливих методів є визначення контактного електроопору (КЕО) пари тертя. Метод КЕО дозволяє у реальному часі контролювати інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя та кінетику структурних змін у зоні контакту. Високі значення КЕО відповідають формуванню оптимальних вторинних структур, що характеризуються підвищеною зносостійкістю та стабільністю [2].

Експериментальні дослідження проводилися на серійній та спеціально розробленій машині тертя за схемою контакту «диск – торець пальця» при швидкостях ковзання $V = 0,12\text{--}11$ м/с та питомих навантаженнях $P = 0,3\text{--}35$ МПа. Конструкція вузла тертя забезпечувала мінімізацію динамічних навантажень у перехідних режимах, а автоматизована система змащування дозволяла використовувати рідкі та пластичні мастильні матеріали.

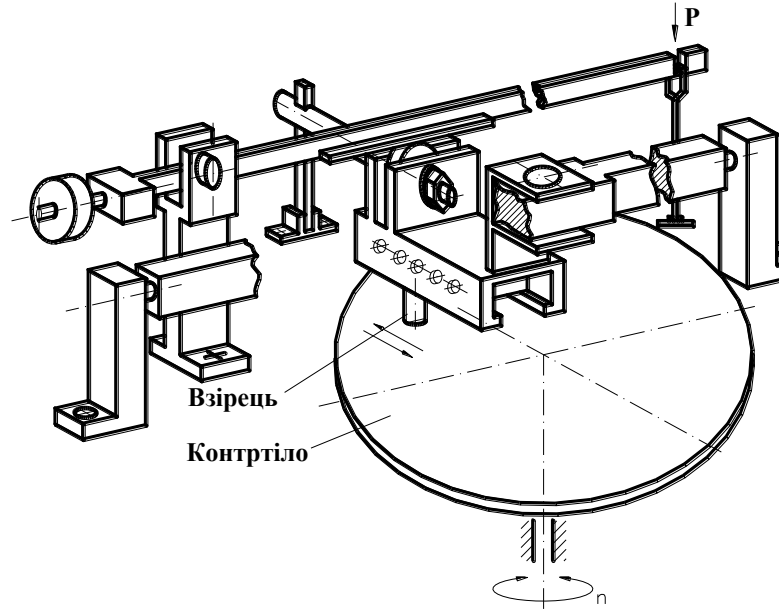


Рисунок 1. Схема вузла тертя та механізму навантаження машини тертя

Для досліджень використовували зразки зі сталі 45 (42–45 HRC, $R_a = 0,125$ мкм) та бронзи ОЦС 5-5-5 діаметром 6 мм і довжиною 25 мм. Як мастильні матеріали застосовували вазелінове масло та вазелінове масло з додаванням 2 % присадки Англамол 99.

Інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя визначали традиційними методами, а контактний електроопір (КЕО) — за спеціально розробленою методикою. Структуру поверхонь тертя та вторинних структур досліджували за допомогою електронного мікроскопа CamScan 44DV з приставкою Linc 860.

Результати досліджень показали існування діапазону навантажень, у межах якого інтенсивність зношування (I) та коефіцієнт тертя (μ) мають мінімальні й стабільні значення, а КЕО — максимальні. Це свідчить про динамічну рівновагу процесів утворення та руйнування вторинних структур.

Встановлено кореляцію між параметрами I , μ , КЕО та типом вторинних структур, що дозволило експериментально визначити діапазон структурно-енергетичної пристосовуваності (СЕР), який відповідає області максимальних і стабільних значень КЕО.

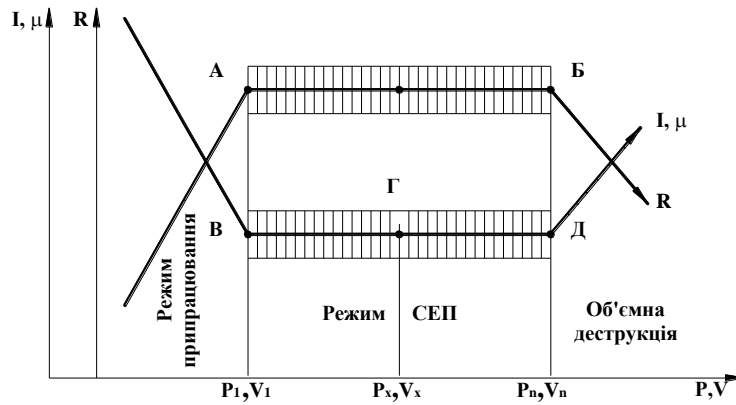


Рисунок 2. Спосіб визначення діапазону та рівня нормального тертя та зношування.

В діапазоні СЕП властивості ВС змінюються в широких границях під впливом зовнішніх параметрів, що свідчить про можливість їх внутрішньої перебудови. Для оцінки структурно-енергетичного стану ВС запропоновано наступні критерії: $\frac{\Delta R}{R_{\text{вих}}}, \Delta t$ (рис. 3).

де ΔR - величина падіння КЕО після кожного етапу навантаження, $(\Delta P, \Delta V)$,
 - вихідне (стабільне) значення КЕО,

Δt - час стабілізації КЕО після кожного етапу навантаження.

В діапазоні СЕП критерії $\frac{\Delta R}{R_{\text{вих}}}, \Delta t$ стабільні і мінімальні (оптимальні властивості ВС), в діапазоні припрацювання і об'ємної деструкції значення даних параметрів максимальні. Після кожного етапу навантаження $(\Delta P, \Delta V)$ відбувається падіння вихідного значення КЕО ($R_{\text{вих}}$) на певну величину ΔR з подальшою його стабілізацією на іншому рівні ($R_{\text{ст}}$) через певний період часу (Δt).

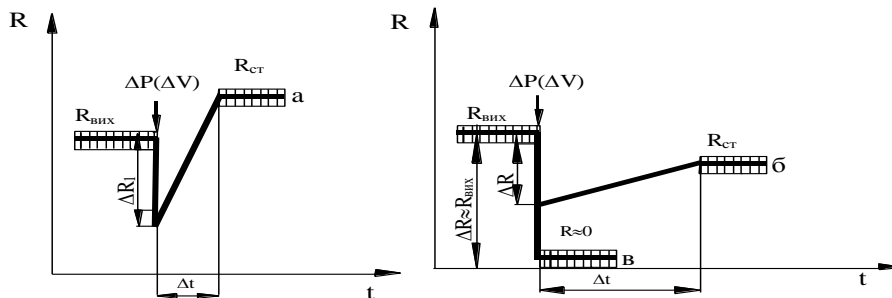


Рисунок 3. Залежність параметрів $\frac{\Delta R}{R_{\text{вих}}}, \Delta t$ від режимів тертя та зношування: а – режим припрацювання, б – режим структурно-енергетичної пристосовуваності (СЕП), в – режим об'ємної деструкції.

Дослідження, спрямовані на вибір ефективних мастильних матеріалів у поєднанні з конструктивними та технологічними рішеннями, залишаються актуальними, оскільки вони спрямовані на вирішення проблеми підвищення експлуатаційної надійності транспортних засобів шляхом оптимізації трибологічної ефективності важконавантажених вузлів деталей, систем і агрегатів.

Для досліджуваних пар тертя визначено такі параметри: режим СЕП -; режим припрацювання -; режим об'ємної деструкції $\frac{\Delta R}{R_{\text{вих}}} \approx 1$, Існування діапазону СЕП зумовлено наявністю оптимальних ВС завдяки динамічній рівновазі процесів їх утворення ($V_{\text{в}}$) та руйнування ($V_{\text{д}}$) (рис. 4). В режимі СЕП $V_{\text{в}} = (t_{\text{в}} =)$, в режимі об'ємної деструкції $V_{\text{в}} < (t_{\text{в}} >)$.

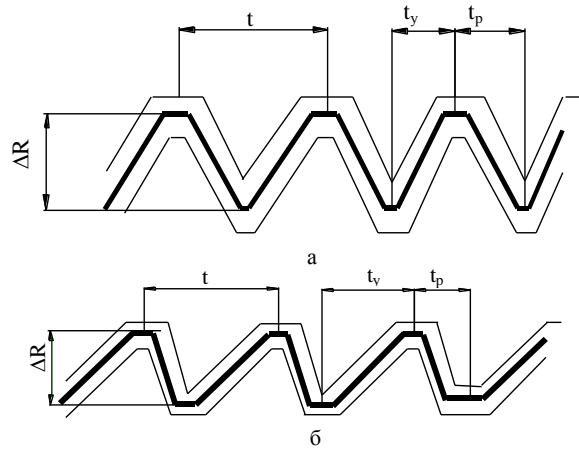


Рисунок 4. Циклограми змін параметрів вторинних структур (ВС) при різних режимах тертя та зношування

а – режим структурно-енергетичної пристосовуваності (СЕП); б – режим об'ємної деструкції; $t_{\text{в}}$ - час утворення ВС; $t_{\text{д}}$ - час руйнування ВС; t - час існування новоутворених ВС.

Як показали проведені дослідження в режимі СЕП параметр ΔR являється залежним від товщини (h) та площі (S) ВС:

$$\Delta R = f(h, S(\text{BC})).$$

Швидкості процесів утворення та руйнування ВС:

$$V_{\text{в}} =; \frac{h_{\text{BC}}}{t_{\text{y}}} = \frac{h_{\text{BC}}}{t_{\text{p}}} \text{ - режим СЕП;}$$

$$V_{\text{в}} <; \frac{h_{\text{BC}}}{t_{\text{y}}} < \frac{h_{\text{BC}}}{t_{\text{p}}} \text{ - режим об'ємної деструкції.}$$

Запропоновані критерії дають можливість здійснювати безперервний контроль процесів тертя та зношування, а також досліджувати кінетику утворення, трансформації й руйнування вторинних структур. Їх використання у поєднанні з металографічним аналізом поверхонь тертя дозволяє більш повно розкрити фізичні закономірності трибологічних взаємодій у зоні контакту.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що керування трибологічною ефективністю важконавантажених спряжень деталей транспортних засобів є складним багатофакторним завданням. Розроблення сучасних методів дослідження та контролю процесів тертя і зношування створює передумови для суттєвого підвищення експлуатаційної надійності вузлів, механізмів та агрегатів транспортної техніки.

Експериментально встановлено, що в межах діапазону структурно-енергетичної пристосовуваності (СЕП) вторинні структури характеризуються оптимальними фізико-механічними властивостями. Такий стан забезпечується динамічною рівновагою між

процесами формування та руйнування вторинних структур, що супроводжується мінімальними значеннями інтенсивності зношування (I) та коефіцієнта тертя (μ) при одночасному максимальному значенні контактного електроопору (КЕО).

Запропонований метод визначення контактного електроопору показав високу чутливість та ефективність під час контролю процесів тертя й зношування. Метод дозволяє оцінювати кінетику формування, зміни та руйнування вторинних структур у режимі реального часу, що має важливе значення для виявлення критичних моментів переходу від нормального режиму зношування до процесів пошкоджуваності та руйнування поверхневих шарів.

Розроблені критерії оцінювання стану вторинних структур, зокрема стабільність параметрів КЕО та кінетика структурних змін, можуть бути використані для організації безперервного моніторингу стану поверхонь тертя. Це створює основу для розроблення систем адаптивного керування процесами тертя і зношування з метою підвищення ефективності функціонування вузлів транспортних засобів.

Подальше вдосконалення методів дослідження, зокрема металографічного аналізу та комп'ютерного моделювання, дозволить глибше дослідити фізичну природу трибологічних процесів. Це відкриває перспективи для оптимізації конструкцій пар тертя, вибору матеріалів та створення високоефективних мастильних середовищ із покращеними експлуатаційними властивостями.

Таким чином, запропоновані методичні підходи та отримані результати досліджень можуть стати основою для розроблення нових рекомендацій і стандартів у галузі триботехніки, спрямованих на підвищення надійності, довговічності та ефективності транспортних систем і машин.

Перелік посилань

1. Aulin, V., Gupka, 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 621.791.927.93

А.В. Нетяга, н.с., к.т.н., Ю.М. Кусков, ст.н.м., д.т.н.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ У СТРУМОПРОВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ФУТЕРОВОК ЩОКОВОЇ ДРОБАРКИ СМД-111

У роботі розглянуто особливості електрошлакового наплавлення у струмопровідному кристалізаторі при виготовленні біметалевих футеровок щокової дробарки СМД-111. Для зменшення деформацій футеровочних листів запропоновано технологію їх наплавлення у вигляді пакета з частковим покриттям поверхні локально розташованими зносостійкими «шайбами» з високохромистого чавуну. Досліджено вплив схеми нанесення наплавлених ділянок на тепловий стан листів та їх деформацію. Встановлено, що запропонована технологія дозволяє знизити теплові напруження, мінімізувати деформацію футеровок та виключити необхідність подальшого правлення. Отримані біметалеві футеровки продемонстрували підвищену зносостійкість: їх ресурс при переробці базальтової маси зріс більш ніж у 5 разів порівняно з футеровками зі сталі 110Г13Л.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопровідний кристалізатор, біметалева футеровка, щокова дробарка, високохромистий чавун, зносостійкість, теплові деформації, наплавлення «шайбами»

A. Netyaga, Yu. Kuskov

OPTIMIZATION OF ELECTROSLAG SURFACING TECHNOLOGY IN A CURRENT-CONDUCTING MOULD FOR LINERS OF THE SMD-111 JAW CRUSHER

The paper considers the features of electroslag surfacing in a current-conducting mould during the production of bimetallic liners for the SMD-111 jaw crusher. To reduce deformation of the liner plates, a surfacing technology was proposed in which the plates were assembled into a package with partial surface coverage by locally arranged wear-resistant pads made of high-chromium cast iron. The influence of the arrangement scheme of the surfaced areas on the thermal condition and deformation of the plates was investigated. It was established that the proposed technology makes it possible to reduce thermal stresses, minimize deformation of the liners, and eliminate the need for subsequent straightening. The obtained bimetallic liners demonstrated increased wear resistance: their service life during basalt crushing increased more than fivefold compared to liners made of 110G13L steel.

Key words: electroslag surfacing, current-conducting mould, bimetallic liner, jaw crusher, high-chromium cast iron, wear resistance, thermal deformation, pad surfacing.

Серед відомих способів електрошлакового наплавлення (ЕШН), заснованих на плавленні у шлаковій ванні різних видів наплавних матеріалів (дроту, прутків, стрижнів тощо), які одночасно є елементами електричного кола та забезпечують перебіг електрошлакового процесу, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено спосіб наплавлення у струмопровідному кристалізаторі (СПК), що базується на іншому принципі здійснення електрошлакового процесу.

СПК являє собою водоохолоджуванний секційний пристрій, до однієї із секцій якого підводиться напруга від джерела живлення, унаслідок чого вона виконує функцію нерозхідного електрода. Формування ж наплавленого металу відбувається в

іншій секції, яка безпосередньо є кристалізатором, де рідка металева ванна наплавленого металу перетворюється на закристалізований метал наплавленого шару.

Незалежно від режиму наплавлення введення у шлакову ванну наплавних матеріалів дає змогу використовувати для наплавлення не лише компактні, а й дискретні матеріали (дріб, порошки, стружку), а також у широких межах регулювати тепловий стан шлакової ванни і, відповідно, нагрівання та проплавлення основного металу. Проте таке регулювання має певні обмеження, пов'язані з необхідністю підтримання стабільного електрошлакового процесу. Тому, як і при будь-якому іншому способі наплавлення, у цьому випадку необхідно вживати заходів для створення в основному металі відносно рівномірного теплового поля з метою запобігання виникненню підвищених термічних напружень. Тим більше, що будь-який електрошлаковий процес характеризується значним тепловкладенням в основний метал.

Це завдання вирішували під час виконання виготовлювального ЕШН при отриманні біметалевих футеровок шокової дробарки СМД-111.

Футеровка має форму зрізаного прямокутника з розмірами в площині 1230×725×300 мм, товщиною 30 мм і масою близько 140 кг, виготовленого зі сталі марки Ст3. Наплавлення здійснювали у СПК Ø 152 мм. Як наплавний матеріал використовували високохромистий чавун (2,8 % С та 26 % Cr) у вигляді електродів великого перерізу або присадкового дробу Ø 0,8–1,6 мм.

У зв'язку з тим, що для експлуатації дробарки необхідно мати дві футеровки, для зменшення деформацій футеровочних листів було прийнято рішення з'єднати їх у пакет із отриманням загальної товщини 60 мм. З'єднання виконували за допомогою зварювальних прихваток довжиною по 40 мм із кроком 80 мм.

Тій самій меті слугувало застосування технології неповного покриття поверхні, що наплавляється, наплавленим металом, а створення локально розподілених по поверхні листів зносостійких «шайб» товщиною близько 15 мм. Передбачалося, що площа покриття листів, які наплавляються, у межах 35...40 % забезпечить їхній захист від зношування. Решта поверхні, не захищена наплавленим металом, повинна була чинити опір зношуванню завдяки масі сировини, що переробляється, розташовуючись між «шайбами» та створюючи природний бар'єр для проникнення абразиву до поверхні листів.

На кожен лист футеровки було наплавлено по 12 «шайб» (рис. 1). Після кожного наплавлення оптичним пірометром вимірювали температуру листа в радіусі приблизно 50...80 мм від бічної поверхні «шайби».

Зазвичай вона не перевищувала 300...400 °С. Знання теплової обстановки на поверхні листів дозволяло раціонально розташовувати на них наплавлені «шайби». Порядок їх розташування показано на рис. 2. Деформація листів після їх роз'єднання не перевищувала 2 мм, що дозволило виключити операцію подальшого правлення наплавлених листів.



Рисунок 1. Наплавлена «шайбами» футеровка
Вільна зона

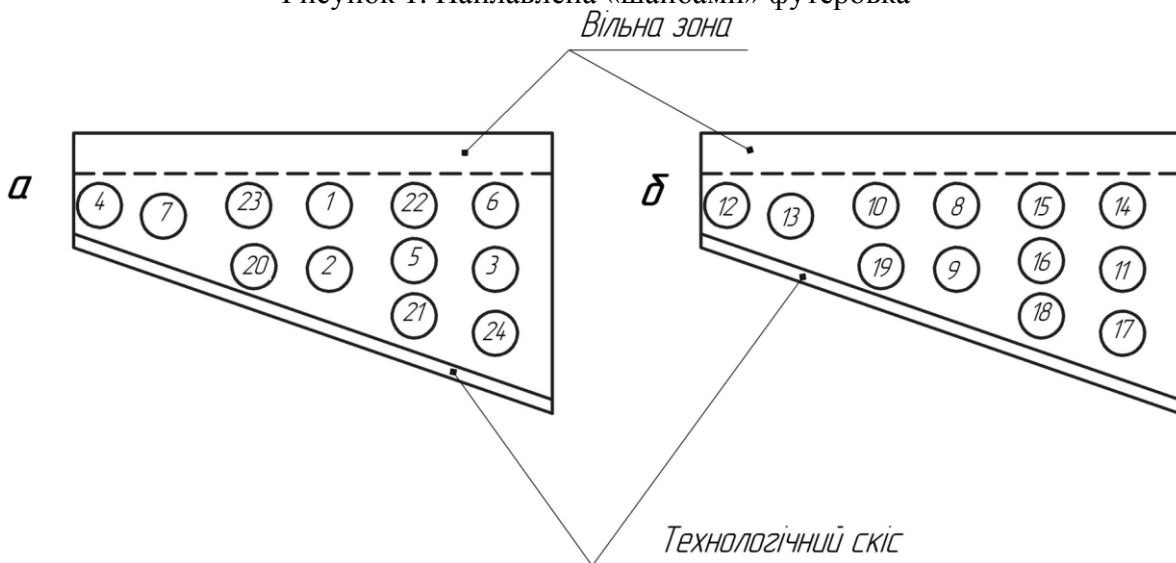


Рисунок 2. Схема розташування «шайб» на першій (а) і другій (б) поверхнях й порядок їхнього нанесення

Таким чином, внесені до стандартної технології наплавлення зміни (наплавлення не окремих листів, а листів, з'єднаних у пакет; лише часткове заповнення поверхні листів наплавленим металом; раціональне розташування наплавлених «шайб») дозволили отримати біметалеві футеровки підвищеної працездатності. Стійкість наплавлених футеровок при переробці дробаркою базальтової маси (коефіцієнт міцності за шкалою М.М. Протодьяконова — найвищий) зросла більш ніж у 5 разів порівняно з футеровками, виготовленими зі сталі 110Г13Л.

УДК 621.326

Сергій Попов, докт. філ. наук, проф.; Михайло Гребешков, аспірант
Національний університет «Запорізька політехніка», Україна

НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ І КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ЗНОШУВАННІ В СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ІНЖЕНЕРНИХ КАДРІВ

Анотація: У роботі сформульовано науково-методологічні засади забезпечення надійності деталей і конструкцій при зношуванні. Запропоновано інтегрований підхід, що поєднує трибоматеріалознавство, імовірно-статистичні методи та FEM-моделювання. Розроблено структуру навчального курсу для формування компетентностей прогнозування ресурсу та довговічності.

Ключові слова: надійність, зношування, трибосистема, технологічна спадковість, розподіл Вейбулла, FEM-моделювання.

Serhii Popov, Mykhailo Hrebieshkov

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR ENSURING THE RELIABILITY OF COMPONENTS AND STRUCTURES UNDER WEAR IN ENGINEERING EDUCATION

Abstract: The paper presents methodological foundations for ensuring reliability of components under wear. An integrated approach combining tribomaterials science, probabilistic methods, and FEM modeling is proposed. A course structure for lifetime prediction and durability assessment is developed.

Keywords: reliability, wear, tribosystem, technological heredity, Weibull distribution, FEM modeling.

Вступ. Сучасний етап розвитку глобальної економіки характеризується зміною парадигми промислового виробництва. На перший план виходять вимоги ресурсозбереження, екологічності та мінімізації життєвого циклу виробів при одночасному підвищенні їхньої експлуатаційної надійності. Проблема підготовки вищих інженерних кадрів механічного профілю стає більш нагальною, оскільки сучасний інженер має враховувати складні процеси руйнування та зношування ще на стадії концептуального проектування.

Актуальність даного дослідження зумовлена тим, що в умовах широкого впровадження технологій вторинної переробки (рециклінгу) та використання новітніх методів виготовлення, таких як адитивні технології, традиційні методи розрахунку надійності потребують суттєвого доопрацювання. Виходячи з цього, задача науково-технічних проєктів сьогодні нерозривно пов'язана з надійністю деталей і конструкцій, особливо в умовах тривалого спрацьовування. Це диктує необхідність формування нових методологій освітянського простору для всіх рівнів підготовки - бакалаврів, магістрів, аспірантів, докторантів.

Основні наукові методології аналізу надійності деталей і конструкцій при зношуванні. Наукова методологія аналізу надійності в умовах зношування базується на міждисциплінарному підході, що поєднує класичну механіку деформації твердого тіла, фізичне матеріалознавство, математичну теорію надійності, триботехніку та теорію зношування. У межах дослідження доцільно виокремити такі ключові методологічні напрями:

1. Імовірно-статистична методологія.

Оскільки процес зношування має випадковий характер, зумовлений неоднорідністю структури матеріалу та варіативністю зовнішніх навантажень, надійність $P(t)$ визначається як ймовірність того, що визначальний параметр зносу $U(t)$ не перевищує граничне значення U_{lim} протягом часу t :

$$P(t) = P(U(t) < U_{lim}) = \int_0^{U_{lim}} f(u, t) du$$

де $f(u, t)$ - щільність розподілу величини зносу в момент часу t .

Методологія передбачає використання складних розподілів, таких як розподіл Вейбулла-Гніденка, який дозволяє моделювати різні стадії життя деталі [2,3]: припрацювання, нормальну експлуатацію та період інтенсивного виходу з ладу. Ймовірність безвідмовної роботи за цим законом описується виразом [12]:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$$

де β - параметр форми, що характеризує фізику процесу (при $\beta < 1$ - припрацювання, при $\beta \approx 1$ - сталий знос, при $\beta > 1$ - деградація); η - параметр масштабу.

Функції прогнозованого розподілу зносостійкості є розроблено проф. Поповим С.М. зі співавторами [1,6]. Вони базуються на багатокритеріальних моделях вигляду:

$$\epsilon = F(K[(X)^\alpha; (Y)^\gamma; (Z)^\beta])$$

де X, Y, Z - параметри, що враховують фізико-механічні властивості металу, характеристики абразиву та умови зовнішнього навантаження. Такий підхід дозволяє переходити від детермінованих розрахунків до ймовірнісного прогнозування ресурсу трибосистем на стадії концептуального проектування.

2. Трибоматеріалознавство

Дана методологія розглядає зношування як результат дисипації (розсіювання) механічної енергії, що підводиться до зони фрикційного контакту. Надійність трибосистеми при цьому аналізується через призму формування захисних вторинних структур на поверхнях тертя.

Відповідно до положень синергетики, за умови досягнення критичних параметрів навантаження, поверхневий шар може переходити у стан самоорганізації. Цей процес супроводжується утворенням дисипативних структур, що характеризуються мінімальним виробництвом ентропії та різким зниженням інтенсивності зношування [4,5,7].

Науковий аналіз у цьому випадку спрямований на виявлення умов реалізації «квазібеззношувального» режиму відповідно до енергетичного принципу Шарпі, який пов'язує зносостійкість зі здатністю матеріалу поглинати енергію без макроскопічного руйнування.

Загальний баланс енергії в зоні тертя описується рівнянням:

$$W = Q + \Delta U_{cmp} + \Delta U_{nos}$$

де W - робота сил тертя; Q - теплові втрати; ΔU_{cmp} - прихована енергія деформації (зміна структури); ΔU_{nos} - енергія руйнування (утворення нових поверхонь).

Питома енергія зношування e^* , що визначає триботехнічну ефективність системи, розраховується як:

$$e^* = \frac{W}{\Delta V} \rightarrow \max$$

де ΔV - об'єм зношеного матеріалу.

Здатність матеріалів опиратися руйнуванню в узагальненому форматі багатокритеріальної трибосистеми описується функцією:

$$\epsilon = F(K[X^\alpha; Y^\gamma; Z^\beta])$$

де X, Y, Z - параметри, що враховують фізико-механічні властивості металу (зокрема твердість та ударну в'язкість), характеристики абразиву та умов навантаження.

Впровадження енергетичного підходу дозволяє пояснити варіацію інтенсивності зношування в межах одного матеріалу до 10-12 разів залежно від умов експлуатації та здатності системи до формування вторинних структур.

3. Методологія скінченно-елементного моделювання (FEM).

Сучасний аналіз надійності складних трибосистем неможливий без застосування чисельних методів [9]. Моделювання дозволяє спрогнозувати розподіл контактних напружень та температурних полів, які є першопричиною інтенсифікації втомного зношування. Це дає змогу оптимізувати геометрію конструкції ще до виготовлення дослідного зразка, що відповідає стратегічним завданням сучасної прикладної механіки.

Згідно з науковими підходами Попова С. М. та Антонюка Д. А., чисельне моделювання напружено-деформованого стану (НДС) поверхневих шарів дозволяє врахувати реальну мікрогеометрію контакту та фізичну нелінійність властивостей матеріалів.

Для реалізації алгоритмів прогнозування зносу в CAE-системах найчастіше використовується дискретна форма закону Арчарда [10,11], інтегрована в ітераційний цикл перерахунку сітки:

$$\Delta h_i = k \cdot p_i \cdot \Delta s$$

де Δh_i - локальне лінійне зношування в i -му вузлі скінченно-елементної сітки; k - експериментально визначений коефіцієнт зношування; p_i - контактний тиск у вузлі, отриманий у результаті FEM-розрахунку; Δs - елементарний шлях тертя.

Загальне рівняння рівноваги системи в матричній формі, що розв'язується FEM-процесором, має вигляд:

$$[K]\{d\} = \{F_{ext}\} + \{F_{fric}\}$$

де $[K]$ - глобальна матриця жорсткості; $\{d\}$ - вектор вузлових переміщень; $\{F_{ext}\}$ - вектор зовнішніх навантажень; $\{F_{fric}\}$ - вектор сил тертя, що залежить від коефіцієнта тертя та локального тиску.

Використання FEM дозволяє ідентифікувати зони концентрації напружень, де ймовірність зародження втомних тріщин є максимальною, та впроваджувати конструктивні зміни для вирівнювання епюри контактного тиску, що підвищує загальну надійність виробу.

Концептуальні положення основ надійності деталей і конструкцій.

Концепція надійності трибосистеми базується на розумінні того, що зношування є не лише зміною геометричних параметрів, а й процесом поступової втрати працездатності та функціонального призначення системи. Основними положеннями цієї концепції є:

1. Концепція граничного стану.

Кожна конструкція має певний «ресурсний об'єм» матеріалу, який може бути втрачений без порушення геометричних параметрів деталей, вузлів і механізмів, а також без зниження їхньої кінематичної та конструкційної міцності і точності забезпечення зазорів Δ .

Радіальний зазор Δ чинить визначальний вплив на параметри частинок зношування: критичний розмір продуктів зносу d_p не повинен перевищувати величину зазору для запобігання переходу системи у режим прискореного абразивного руйнування.

Концептуально надійність забезпечується через баланс між середньою швидкістю зношування v та гранично допустимим зносом U_{lim} .

Детермінована модель ресурсу T :

$$T = \frac{U_{lim}}{v}$$

де U_{lim} - сумарний допустимий знос за технічними умовами; v - інтенсивність (швидкість) зношування.

Такий підхід дозволяє розглядати надійність не як статичну величину, а як функцію часу, що залежить від початкового «ресурсного об'єму» та стабільності триботехнічних характеристик системи протягом експлуатації.

2. Положення про технологічну спадковість.

Це фундаментальне положення стверджує, що надійність деталі закладається не лише на стадії конструювання, а й у процесі її технологічного виготовлення. Методи обробки металів різанням, технології зварювання, наплавлення та напилення, а також методи підвищення зносостійкості шляхом зміцнення поверхні й нанесення функціональних покриттів формують параметричний стан і трибоматеріалознавчі характеристики деталі [8,14].

Наприклад, залишкові напруження стиску σ_{pez} , сформовані внаслідок пластичної деформації (зокрема, обробки тиском або поверхневого зміцнення), можуть суттєво підвищувати опір втомному руйнуванню та зношуванню [13] за рахунок створення енергетичного бар'єру для зародження мікротріщин.

Формування в структурі надлишкових твердих фаз (карбідів, боридів, інтерметалідів, нітридів, карбонітридів та інших сполук) сприяє підвищенню зносостійкості від 3 до 10 разів залежно від їх морфології та розподілу. Інтегральна твердість HV такої гетерогенної структури може бути оцінена за правилом суміші:

$$HV_{сплаву} = \sum_{i=1}^n \frac{HV_{\mu i} \cdot F_i}{F}$$

де $HV_{\mu i}$ - мікротвердість i -ї фази (матриці або зміцнювача); F_i - площа, займана цією фазою на поверхні тертя; F - загальна площа контакту.

Крім того, утворення мартенситу деформації ($\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення), а також розвиток дисипативних (самоорганізованих) структур у поверхневих шарах під дією енергетичного впливу тертя можуть додатково підвищувати зносостійкість системи у 10-20 разів. Це явище базується на здатності поверхневого шару до інтенсивної дисипації підведеної механічної енергії без макроскопічного руйнування, що відповідає синергетичному підходу до надійності трибосистем.

3. Ресурсозбереження та циклічна економіка.

Сучасна концепція надійності передбачає врахування вимог ремонтпридатності та відновлюваності деталей ще на стадії проектування. Використання технологій вторинної переробки матеріалів і відновлення зношених елементів вимагає від інженера розуміння закономірностей зміни структури та властивостей матеріалу в процесі експлуатації і ремонту. У цьому контексті надійність розглядається як здатність конструкції зберігати функціональні та експлуатаційні параметри за умов багаторазових циклів відновлення.

Оптимізація строку служби деталей на основі технологій відновлювального наплавлення, сумарний ресурс виробу T_{Σ} з урахуванням n циклів відновлення визначається як:

$$T_{\Sigma} = T_n + \sum_{i=1}^n T_{e,i} \cdot K_i$$

де T_n - напрацювання нової деталі до першого граничного стану; $T_{e,i}$ - напрацювання після i -го відновлення; K_i - коефіцієнт збереження ресурсу ($0 < K_i \leq 1$), який

враховує деградацію структури основного металу та якість сформованого зносостійкого шару.

Ефективність стратегії відновлення за критерієм надійності оцінюється через коефіцієнт технічного використання $K_{то}$:

$$K_{то} = \frac{T_{\Sigma}}{T_{\Sigma} + \sum t_{рем} + \sum t_{обс}}$$

де $t_{рем}$ - час на проведення відновлювальних робіт; $t_{обс}$ - час на технічне обслуговування.

Використання методів зносостійкого наплавлення та зміцнення поверхонь тертя при відновленні дозволяє не лише повернути геометричні розміри, а й сформувати в робочому шарі гетерогенні структури (карбіди, бориди), що забезпечують підвищення експлуатаційної стійкості у 1.5-2.5 рази порівняно з базовими показниками нових деталей.

Висновки. Проблема підготовки інженерних кадрів у галузі механіки вимагає переходу від вивчення окремих технологічних операцій до системного розуміння надійності як комплексної властивості виробу.

Наукова методологія аналізу надійності в умовах зношування має базуватися на інтеграції стохастичних моделей із фізико-механічними закономірностями трибоматеріалознавчої взаємодії.

Розробка та впровадження дисципліни «Основи надійності деталей машин при зношуванні» дозволить підготувати спеціалістів, здатних вирішувати задачі економії ресурсів та забезпечувати безаварійну роботу складних технічних систем у сучасних економічних умовах.

Перелік посилань

1. Попов С. М., Антонюк Д. А., Нетребко В. В. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні: Навчальний посібник. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. - 368 с. (Стор. 9, 11, 12, 104, 156, 161, 162, 164, 368).
2. Frolov, M.; Tanchenko, S.; Ohluzdina, L. Parameter estimation of the Weibull distribution in modeling the reliability of technical objects // Journal of Engineering Sciences (Ukraine), 2024, 11(1), A1-A10. DOI: 10.21272/jes.2024.11(1).a1.
3. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods: Weibull Distribution.
4. Malinovskiy, Yu. O.; Iina, O. A.; et al. Self-organization of the tribosystem under non-stationary conditions of friction // Problems of Tribology, 2024, 29(3/113), 15-23. DOI: 10.31891/2079-1372-2024-113-3-15-23.
5. Iina, O. A.; Mikosianchuk, O. O.; et al. Mechanisms of formation of wear-resistant dissipative structures in non-stationary lubrication conditions // Problems of Tribology, 2023, 28(3/109), 49-55. DOI: 10.31891/2079-1372-2023-109-3-49-55.
6. Попов С.М., Лаптева Г.М., Гребешков М.О., Капустян О.Є. Наукові задачі трибоматеріалознавства при аналізі трибосистем // Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 30 / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, ПДТУ, 2025. – С. 45-54 DOI: 10.31498/2522-9990302025347048.
7. Al-Quraan, T. M. A.; et al. Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction // Advances in Tribology, 2023, Article ID 6676706. DOI: 10.1155/2023/6676706.
8. Wang, X.; et al. A Review on Tribological Wear and Corrosion Resistance of Surface Coatings on Steel Substrates // Coatings, 2025, 15, 1314. DOI: 10.3390/coatings15111314.

УДК 621.867.42

Роман Рогатинський, д.т.н., проф.; Олена Дмитрів, к.т.н., доц.; Лілія Рогатинська;
Ігор Головач; Андрій Скоропляс

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

КОЛИВАННЯ БЕЗВАЛЬНИХ СПІРАЛЬНИХ ШНЕКІВ

Анотація. Розглянуто навантаження консольно закріпленого безвального спірального шнека. Побудовано модель його коливань на основі відомих рівнянь коливань криволінійного стержня. Побудовано відповідну модель коливань консолі з приведеними параметрами, зокрема приведеним моментом інерції, що змінюється в часі, для випадку дії лише згинальних навантажень.

Ключові слова. Безвальний спіральний шнек, коливання криволінійного стержня, приведений перемінний момент інерції, надійність конвеєрів.

Roman Rogatynskyi, Dr., Prof.; Olena Dmytriv, Ph.D., Assoc.prof.; Liliya Rogatynska,
Igor Holavach, Andrii Skoroplyas.

VIBRATIONS OF SHAFTLESS SCREW CONVEYORS

Abstract: The loading of a cantilevered shaftless screw conveyor is considered. A model of its vibration is constructed based on the well-known vibration equations of a curved rod. A corresponding vibration model of a cantilever with reduced parameters, specifically a time-varying reduced moment of inertia, is developed for bending vibrations only.

Keywords: Shaftless screw conveyor, vibrations of a curved rod, reduced time-varying moment of inertia, conveyor reliability .

На відміну від класичного шнека, де гвинтова стрічка наварена на центральний вал, безвальний шнек складається лише з масивної спіралі, яка обертається всередині жолоба (чи труби) і розміщується консольно чи спирається на спеціальний вкладиш у жолобі. Відсутність центрального валу дозволяє транспортувати продукти, що схильні до налипання, волокнисті матеріали, або матеріали, які можуть забивати центральну частину звичайного шнека. Попри такі переваги у безвальних спіральних шнеків, зокрема із консольним розміщенням спіралі, є низка недоліків. Зокрема вони чутливі до нерівномірної подачі вантажу, коли консоль зазнає динамічних ударів. Крім того асиметрія при закріпленні спіралі у приводі та асиметрія геометрії спіралі при виготовленні викликають значне биття при обертанні. Це призводить до складних коливних хвильових процесів, які призводять до зниження надійності і довговічності шнека, через високу ймовірність втомного зламу у кріпленні, пластичному прогину спіралі при перевантаженні та входженні вільного кінця консолі у резонанс з різким збільшенням амплітуди коливань та можливим руйнуванням корпусу. Спіраль при цьому працює в режимі втомного навантаження, а її ресурс у великій мірі залежить від циклічності роботи та коливних процесів під час роботи. А тому дослідження коливних процесів з метою підвищення динамічної стабільності та, відповідно, надійності та довговічності безвальних спіральних шнеків, є актуальними.

Метою дослідження є підвищення надійності роботи безвальних спіральних шнеків шляхом розробки динамічної моделі їх функціонування при змінному навантаженні та визначення параметрів коливного процесу і запобігання резонансу та перевантаження..

Розглянемо процес коливання спіралей безвального шнека, виконаного у вигляді гвинтового пружного стрижня кроком T , відповідно зовнішнім D та внутрішнім d діаметрами із прямокутним перерізом висотою $H = D - d$ та шириною B , $B < H$, які

установлені консольно. За розрахункове значення радіального параметру спіралі приймаємо середній радіус витка $R = (D - d)/2$, при якому вплив кривини спіралі на перерозподіл напружень буде мінімальний. Відповідно, рівняння гвинтової лінії, що проходить через центри прямокутних перерізів витків, в інерційній системі координат $Oxyz$, де вісь Oz спрямована по осі конвеєра, прийме вид [1]:

$$x = R \cos(\psi + \omega t + \psi_0); \quad y = R \sin(\psi + \omega t + \psi_0); \quad z = \frac{T \psi}{2\pi}, \quad (1)$$

де ψ - незалежний кутовий параметр спіралі; ψ_0 - початковий монтажний кут спіралі, що визначає напрямок розміщення перерізу витка в момент часу $t = 0$.

Довжина стрижня зв'язана з параметром ψ залежністю

$$l = \int_0^{\psi} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} d\psi = \psi \sqrt{R^2 + \frac{T^2}{4\pi^2}}. \quad (2)$$

Потенціальна енергія деформації та кінетична енергія коливних переміщень для випадку згину криволінійного стрижня, [2]

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l EF \left(\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{w}{R_k} \right)^2 ds + \frac{1}{2} \int_0^l EI \left[\frac{\partial^2 w}{\partial s^2} - \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{u}{R_k} \right) \right]^2 ds; \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{2} \int_0^l \rho F \left[\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] ds,$$

де E та ρ - модуль пружності та густина матеріалу гвинтового стрижня; I та F - осьовий момент інерції та площа перерізу спіралі, R_k - радіус кривизни гвинтового стрижня $R_k = [R^2 + T^2 / (4\pi^2)] / R$; u та w відповідно, поперечні та радіальні прогини спіралі; ds - малий приріст (диференціал) довжини l витків спіралі.

Площа гвинтового стрижня буде $F = B \cdot H$. Центральні осьові моменти інерції відносно нормалі I_n , бінормалі I_b , а також умовний полярний момент інерції відносно центру I_t будуть, відповідно:

$$I_n = B^3 H / 12; \quad I_b = BH^3 / 12; \quad I_t = \beta B^3 H. \quad (4)$$

Тут β - коефіцієнт Сен-Венана, який залежить від співвідношення висоти профілю до ширини. Так для $\eta = H / B = 6 \dots 8$ можна прийняти $\beta \approx 0,3$.

Рівняння коливань криволінійного стрижня будуть такими, [3]:

$$-\frac{\partial}{\partial \ell} \left[EF \left(\frac{\partial u}{\partial \ell} + \frac{w}{n} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \ell} \left\{ \frac{EI}{R_k} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial \ell^2} - \frac{\partial}{\partial \ell} \left(\frac{u}{R_k} \right) \right] \right\} + \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = q_1(\ell, t); \quad (5)$$

$$\frac{EF}{R} \left(\frac{\partial u}{\partial \ell} + \frac{w}{R_k} \right) + \frac{\partial^2}{\partial \ell^2} \left\{ EI \left[\frac{\partial^2 w}{\partial \ell^2} - \frac{\partial}{\partial \ell} \left(\frac{u}{R_k} \right) \right] \right\} + \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q_2(\ell, t),$$

де $q_1(\ell, t)$ та $q_2(\ell, t)$ - відповідно закони розподілу осьового та поперечного навантаження на спіральний елемент в часі;

З метою спрощення, враховуючи суттєву жорсткість спіралі і незначні прогини осі шнека, замінимо криволінійний стержень консоллю з приведеними параметрами.

Нехай в загальному випадку в довільному січенні консолі будуть діяти крутний момент M_z , згинальні моменти M_x та M_y , а також осьова P_z сила, що задаються зовнішнім навантаженням.

Розглянемо розкладання складових результуючого моменту \bar{M} та осі супроводжуючого тригранника природньої системи координат, а саме нормаль \mathbf{n} , дотичну \mathbf{t} та бінормаль \mathbf{b} . Нехай зовнішнє навантаження на елемент витка створює згинальний момент M_x тільки відносно осі Ox та крутний момент M_z . Момент M_z на осі тригранника природньої системи координат, суміщеного з елементом витка, розкладається, як $\bar{M}_z = M_z(-\cos \alpha \cdot \bar{\mathbf{b}} + \sin \alpha \cdot \bar{\mathbf{t}})$, а осьова сила P_z створює момент $\bar{M}_p = -PR(\sin \alpha \cdot \bar{\mathbf{b}} + \cos \alpha \cdot \bar{\mathbf{t}})$.

Відповідно, складові рівнодійного моменту мають вид:

$$\begin{aligned} M_b &= -M_z \cos \alpha - M_p \sin \alpha - M_x \sin \psi \sin \alpha ; \\ M_n &= M_x \cos \psi ; \\ M_t &= M_z \sin \alpha - M_p \cos \alpha - M_x \sin \psi \cos \alpha . \end{aligned} \quad (6)$$

Вважаємо, що на згинальні коливання домінуючим буде вплив моменту згину. Елементарна накопичена енергія по кожній із осей природньої системи координат тільки від згинального моменту M_x для елемента приведенної консолі довжиною $d\ell$, без врахування M_p та M_z , буде рівна:

$$\begin{aligned} dU_b &= \frac{M_b^2 d\ell}{2EI_b} = \frac{6M_x^2 \sin^2 \psi \sin^2 \alpha}{EBH^3} d\ell ; \\ dU_n &= \frac{M_n^2}{2EI_n} d\ell = \frac{6M_x^2 \cos^2 \psi}{EB^3 H} d\ell ; \\ dU_t &= \frac{M_t^2}{2GI_t} d\ell = \frac{M_x^2 \sin^2 \psi \cos^2 \alpha}{2\beta GB^3 H} d\ell. \end{aligned} \quad (7)$$

Робота зовнішнього моменту M_x при згині спіралі довжиною $dz = \sin \alpha d\ell$:

$$dA = \frac{M_x d\varphi}{2} = \frac{M_x \sin \alpha}{2} \frac{d\varphi}{dz} d\ell, \quad (8)$$

де $\frac{d\varphi}{dz} = k$ – кривизна осі пружної консолі.

Приврівнюючи dU та dA отримуємо

$$\frac{M_z dz}{Ed\varphi} = \frac{H^4 \sin \alpha}{6 \sin^2 \psi \sin^2 \alpha + 2 \sin^2 \psi \cos^2 \alpha \frac{E}{2\beta G} + 6 \cos^2 \psi}. \quad (9)$$

Враховуючи те що $\frac{E}{2G} = 1 + \nu$, де ν - коефіцієнт Пуансона, а $\frac{M_x dz}{Ed\psi} = I_K$, де I_K - приведений осьовий момент інерції консолі, то для обертової спіралі $\psi = 2\pi z/T + \omega t$ і приведений осьовий момент інерції пружної спіральної консолі буде

$$I_K = \frac{B^4 \sin \alpha}{\sin^2(\psi + \omega t) \left[\frac{6 \sin^2 \alpha}{\eta^3} + \frac{2(1 - \nu) \cos^2 \alpha}{\beta \eta} \right] + \frac{6 \cos^2(\psi + \omega t)}{\eta}}. \quad (10)$$

Отже, осьовий момент інерції пружної консолі буде функцією і довжини і часу $I_K = I_K(z, t)$. Перемінний у часі момент інерції, створює циклічні напруження, що є головною причиною появи тріщин у металі та зменшення довговічності спіралі.

При поперечних згинальних коливаннях пружної консолі, потенціальна U і кінетична T енергія з прогином консолі w , із врахуванням (10) зв'язана залежностями

$$U = \frac{1}{2} \int_0^z EI_K \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dz; \quad (12)$$

$$T = \frac{1}{2} \int_0^\ell \rho F \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dz, \quad (13)$$

а згинальні коливання стрижня описуються рівнянням

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(EI_K \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = q(z, t), \quad (14)$$

де $q(z, t)$ – розподілене, змінне в часі, навантаження спіральних елементів при транспортуванні вантажів. Оскільки безвальний спіральний шнек призначений для роботи у важких умовах, то спрогнозувати характер зміни його навантаження не завжди можливо. В цьому випадку використовують ймовірнісні методи для моделювання його динаміки за умови випадкового розподілу навантаження.

Після розкриття (14), залежність для визначення згинальних коливань приведеної пружинної консолі будуть описуватись рівнянням

$$E \left(\frac{\partial^4 w}{\partial z^4} I_K + 2 \frac{\partial^3 w}{\partial z^3} \frac{\partial I_K}{\partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \frac{\partial^2 I_K}{\partial z^2} \right) + \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q(z, t). \quad (15)$$

Граничну умовами (при $z = 0$) будуть $w = 0$; $\frac{\partial w}{\partial z} = 0$. Дослідження динамічної системи, що описується рівнянням (19) проводиться числовими методами за відомими алгоритмами.

Висновок. Виведене диференціальне рівняння коливання пружної консолі при змінному навантаженні $q = (z, t)$, враховує зміну моменту інерції січення пружної консолі по довжині та в часі і дозволяє моделювати динаміку консольних спіральних елементів безвальних конвеєрів в процесі їх роботи. Аналіз коливного процесу за залежністю (15) дозволяє визначити параметри циклічного процесу та оцінити накопичення пошкоджень від циклічних згинальних напружень і прогнозувати ймовірність відмови конвеєра внаслідок руйнування спіралі. Через високу динамічність конвеєра із консольною спіраллю, робочі частоти обертання можуть збігатися з власними частотами коливань, що призводить до резонансу та передчасного руйнування спіралі безвального конвеєра. Розроблена модель дозволяє на етапі проектування уникнути небажаних коливних процесів шляхом відповідних конструктивних рішень. Зменшення інтенсивності коливання спіралі та уникнення резонансу дозволить також зменшити інтенсивність биття спіралі об стінки жолоба (футеровку) та збільшити строк служби безвального спірального конвеєра.

Перелік посилань

1. Гевко Б.М. Механізми з гвинтовими пристроями / Б.М. Гевко, М.Г. Данильченко, Р.М. Рогатинський та ін.- Львів.- Світ.- 1993.- 208 с.
2. Булгаков В.М. Моделювання коливання робочих органів спіральних сепараторів при робочому навантаженні/ В.М. Булгаков, Р.М. Рогатинський, С.В. Смолінський// Збірник наукових праць НАУ "Механізація сільськогосподарського виробництва" том VIII.- Київ.- НАУ.-2001.- С.289-293.

УДК 539.3

Наталія Сметанкіна¹, д.т.н., проф.; Сергій Моргун², к.т.н., доц.

¹Інститут енергетичних машин і систем імені А.М. Підгорного, НАН України, Україна

²Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

КОНТАКТНІ НАПРУЖЕННЯ В РОТОРІ СУДНОВОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Викладено основні положення удосконаленої моделі напружено-деформованого стану ротора компактного одновального газотурбінного двигуна з урахуванням контактної взаємодії між лопатками та диском у лопатковому вінці, а також між самими лопатками. Модель враховує комплексний вплив механічної та температурної контактної взаємодії між частинами ротора на рівень динамічних напружень в ньому. Від існуючих запропонована математична модель відрізняється використанням варіаційного принципу Лагранжа для врахування контактної взаємодії між частинами лопаткового вінця, пов'язавши потенційну енергію деформації при контактній взаємодії твердих тіл із роботою зовнішніх сил у зоні контакту. За допомогою двовузлових скінчених контактних елементів вдалося виконати моделювання зон контакту елементів лопаткового вінця.

Ключові слова: контактні напруження, ротор, контактні скінчені елементи, контактний тиск, вимушені коливання

Natalia Smetankina, Serhii Morhun

CONTACT STRESSES IN THE ROTOR OF A MARINE GAS TURBINE ENGINE

The main provisions of a compact single-shaft gas turbine engine rotor contact stress-strain state mathematical model are presented, taking into account the contact interaction between the blades and the disk in the impeller. The model takes into account the complex influence of mechanical and temperature contact interaction between the rotor parts on the level of dynamic stresses in it. The proposed mathematical model differs from the existing ones in using the Lagrange variational principle to take into account the contact interaction between the parts of the blade crown, linking the potential energy of deformation during the contact interaction of solids with the work of external forces in the contact zone. Using two-node finite contact elements, it was possible to simulate the contact zones of the blade crown elements.

Key words: contact stresses, rotor, contact finite elements, contact pressure, forced vibration

При вирішенні контактної задачі для елементів ротора турбіни використовувався принцип стаціонарності або мінімуму зміни віртуальної роботи. Тобто сума потенційної енергії деформації зони контакту та роботи зовнішніх сил в зоні контакту дорівнюють нулю. Відповідно до варіаційного принципу Лагранжа [1]:

$$\delta L = 0$$

$$L = \Pi + W \quad (1)$$

де L – функція Лагранжа; Π – потенційна енергія деформації зони контакту; W – робота зовнішніх сил в зоні контакту.

Скориставшись методом енергетичного балансу замінемо (2) наступним варіаційним рівнянням:

$$\delta L = \delta(\Pi - W) = 0 \quad (2)$$

та проведемо мінімізацію енергетичного функціоналу зони контакту L на узагальненому переміщенні δ :

$$\frac{\partial L}{\partial \delta} = 0 \quad (3)$$

де $\{\delta\}$ – вектор узагальнених переміщень.

Для коректного моделювання зон контакту твердих тіл елементів лопаткових вінців вважатимемо, що між контактуючими поверхнями лопаток і дисків, а також бандажними полицями сусідніх лопаток розташовано шар спеціальних двовузлових контактних скінчених елементів (рис. 1) [2].

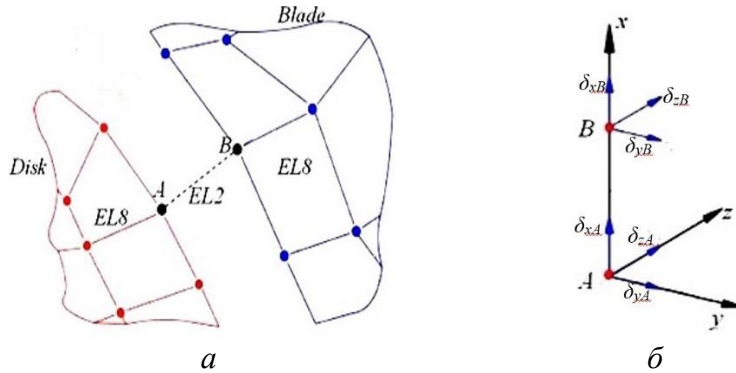


Рисунок 1. Контактна зона між елементами лопаткового вінця:

a – скінченоелементна апроксимація зони контакту лопатки і диску; *б* – скінчений контактний елемент в локальній декартовій системі координат; *Blade* – лопатка; *Disk* – диск

Розроблена математична модель враховує комплексний вплив механічної та температурної контактної взаємодії між частинами ротора на рівень динамічних напружень в ньому. рівняння енергетичного балансу контактного скінченого елемента в матричному вигляді матиме вигляд [3]:

$$\begin{aligned} [K]\{\delta\} &= \{F\} \\ [\Lambda]\{T\} &= \{Q\} \end{aligned} \quad (4)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості контактного скінченого елемента; $\{\delta\}$ – вектор узагальнених переміщень вузлів контактного скінченого елемента; $\{F\}$ – вектор контактних сил; $[\Lambda]$ – матриця теплопроводності контактного скінченого елемента; $\{T\}$ – вектор температур контактного скінченого елемента; $\{Q\}$ – вектор теплового потоку.

Розглянуто вплив контактного тиску на величину контактної теплопередачі стику в зоні контакту елементів лопаткового вінця (рис. 2).

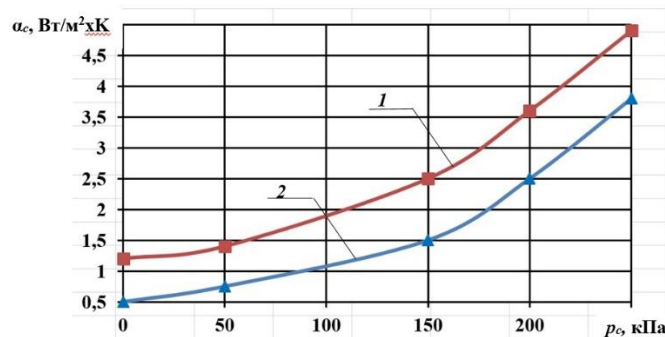


Рисунок 2. Вплив контактного тиску на коефіцієнт теплопередачі стику в зоні контакту елементів лопаткового вінця:

1 – зона контакту лопаток та диску; *2* – зона контакту лопаток

Враховуючи наявність конструкційного демпфірування в бандажних полицях лопаток та незначну шорсткість контактуючих поверхонь відповідно до технологічної документації механічної обробки лопаток, була визначена залежність контактного тиску від частоти вимушених коливань лопаткового вінця (табл. 1).

Таблиця 1. Залежність контактного тиску від частот вимушених коливань першого лопаткового вінця

Номер гармоніки моди коливань, k	Частота вимушених коливань f , Гц	Контактний тиск p , кПа
1*	821,43	250,2
1	868,27	214,1
2	1876,70	176,7
3	2090,82	150,8
4	3175,40	139,6

* позначає зонтичну форму коливань лопаткового вінця

Аналіз наведених в табл. 1 даних свідчить про оберненопропорційну залежність між контактним тиском та частотою вимушених коливань вінця. Зі збільшенням частоти величина контактного тиску зменшується. Тобто зі зростанням частоти вимушених коливань вінця збільшується і величина проковзування по бандажним полицям, що, в свою чергу, приводить до зменшення контактного тиску. Але відповідно до розділу 3 величина проковзування, що залежить від геометричних параметрів бандажних полиць, також впливає і на частоту вимушених коливань вінця. Особливу увагу при проведенні дослідження треба приділити моді з коефіцієнтом гармоніки $k = 4$, яка відповідає найбільш небезпечній з точки зору входу в резонанс частоті вимушених коливань вінця $f = 3175,40$ Гц.

Визначено, що контактна теплопередача стику зростає зі збільшенням контактного тиску як в зоні контакту лопаток з диском, так і в зоні контакту бандажних полиць сусідніх лопаток. Враховуючи наявність конструкційного демпфірування в бандажних полицях лопаток та незначну шорсткість контактуючих поверхонь відповідно до технологічної документації механічної обробки лопаток, була визначена залежність контактного тиску від частоти вимушених коливань найбільш навантаженого першого лопаткового вінця. Отримані результати розрахунків можуть бути використані в подальшому при формуванні технологічної документації для проведення операцій монтажу лопаткових вінців.

Література

1. Smetankina N., Morhun S. The modern single-shaft gas turbine rotor stress-strain state determination taking into account the contact thermoelasticity problem. *Tehnicki vjesnik*. 2024. Is. 31. P. 551-556. <https://doi.org/10.17559/TV-20230628000770>
2. Smetankina N., Morhun S., Melnychenko O. Influence on creep on the modern single shaft gas turbine rotor blades durability. 2026. Vol. 43. Is. 1. P. 41-48. <https://doi.org/10.1515/tjj-2025-0069>
3. Smetankina N., Morhun S., Melnychenko O. Influence of contact stresses in impellers joints on the marine gas turbine rotor stress-strain state. *International Journal of Turbo and Jet Engines*. 2026. <https://doi.org/10.1515/tjj-2026-0018>

Секція: ПОКРИТТЯ, НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ

УДК: 621.793

Володимир Гвоздецький¹, д.т.н., ст. досл., Нестор Мозола, аспірант; Назар Остапчук², аспірант; Михайло Студент¹, д.т.н., проф.; Христина Задорожна¹ к.т.н., ст.н.с.; Олександр Гасій², д.т.н., проф.; Іван Гончар² к.т.н., доц., Галина Веселівська, к.т.н., ст. досл.

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

²Національний лісотехнічний університет України

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ НАДЗВУКОВИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ НАПИЛЕНИХ НА ПІДКЛАДКИ ІЗ СТАЛІ ТА АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ.

Досліджено структуру надзвуків електродугових покриттів (ЕДП) із порошкових дротів (ПД) системи легування Fe-Cr-Ti-Si-Mn-B-C напилених на підкладки із сталі та алюмінієвого сплаву Д16. За використання надзвукового повітряного струменю ЕДП характеризуються більш дисперсною структурою та меншою кількістю мікротріщин та пор, аніж за використання дозвукового повітряного струменю. Екзотермічні реакції, які відбуваються між компонентами шихти ПД в процесі напилення ЕДП та підвищення кінетичної енергії розплавлених краплин за надзвукового режиму напилення, зумовлюють підвищення їх температури на 300...500 °С, та формування зон сплавлення покриття і алюмінієвої основи. Ключові слова: порошкові дроти, електродугові покриття, структура, екзотермічні реакції

V. Hvozdettskyi¹, N. Mozola, N. Ostapchuk², M. Student¹, Kh. Zadorozhna¹ O. Hasiy², I. Honchar², H. Veseliv's'ka¹

CHARACTERISTICS OF THE STRUCTURE OF SUPERSONIC ELECTRIC ARC COATINGS FORMED FROM POWDER WIRES DEPOSITED ONTO STEEL AND ALUMINIUM ALLOY SUBSTRATES.

The structure of supersonic electric arc coatings (EACs) from flux cored wires (CW) of the Fe-Cr-Ti-Si-Mn-B-C alloying system sprayed onto steel and aluminum alloy D16 substrates was investigated. When using a supersonic air jet, EACs are characterized by a more dispersed structure and a smaller number of microcracks and pores than when using a subsonic air jet.

Keywords: cored wires, arc coatings, structure, exothermic reactions.

Електродугові покриття (ЕДП) наносили за допомогою електрометалізатора, оснащеного соплом Лавалю з двома вертикальними каналами. Цей пристрій генерував надзвуковий повітряний потік (Мах 2). Під час напилення ЕДП системи легування Fe-Cr-Ti-Si-Mn-B-C компоненти шихти ПД плавилася, утворюючи покриття з гетерогенним хімічним складом. Хром і титан реагували з карбідом бору, утворюючи бориди або карбід (залежно від реакцій, показаних у таблиці 1), які рівномірно розподілялися по всьому об'єму ламелей у вигляді нанометричних включень, надаючи їм високу мікротвердість. Реакції (1, 2, 3) вивільняли значну кількість тепла (табл. 1).

Усі частинки в шихті ПД були оточені тугоплавкою оксидною плівкою. Так $t_{пл}(Cr_2O_3) = 2435^{\circ}C$, $t_{пл}(Al_2O_3) = 2050^{\circ}C$, $t_{пл}(SiO_2) = 1700^{\circ}C$, $t_{пл}(Fe_2O_3) = 1566^{\circ}C$, $t_{пл}(Fe_3O_4) = 1538^{\circ}C$, $t_{пл}(FeO) = 1377^{\circ}C$. Всі ці оксиди запобігали плавленню компонентів шихти ПД між собою та разом з оболонкою. Аналіз фазових діаграм Fe-Mn, Fe-Si, Fe-B, Fe-C показав, що для інтенсифікації взаємодії компонентів шихти один з одним та зі

сталевою оболонкою необхідно додавати такі компоненти, як феросиліцій, феромарганець або феротитан, які утворюватимуть із залізом оболонки (або один з одним) низькоплавкі евтектики та сприятимуть взаємодії Cr та V_4C один з одним та зі сталевою оболонкою.

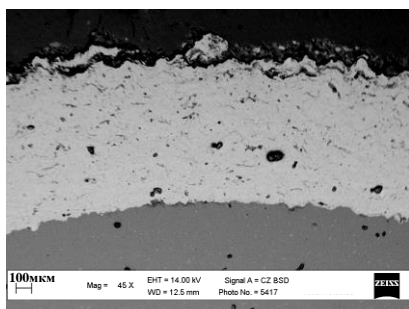
Таблиця 1. Тепловий ефект реалізації реакцій утворення карбідів та боридів та їх мікротвердість

Реакції утворення карбідів та боридів	Ентальпія ΔH_{298}° шихти ПД, кДж/г шихти	Мікротвердість боридів, ГПа
$7Cr + 2V_4C = 4CrV_2 + Cr_3C_2$ (1)	1,0	1600
$Ti + V_4C = TiV_2 + TiC$ (2)	3,3	2000
$Fe + 1/7 V_4C = 4/7 FeV + 1/7 Fe_3C$ (3)	1,2	1400

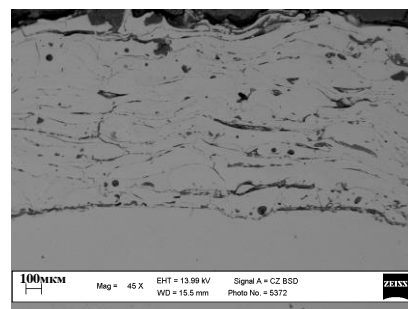
Для зменшення температури плавлення природніх оксидних плівок на компонентах шихти ПД до неї додавали буру ($Na_2B_4O_7$) або борний ангідрид (B_2O_3). Під час напилювання покриттів бура плавилась ($t_{пл}(Na_2B_4O_7) = 741^{\circ}C$) і розкладалась з утворенням метаборату натрію та борного ангідриду ($Na_2B_4O_7 \rightarrow 2NaBO_2 + B_2O_3$). Останній взаємодіє з оксидами Cr_2O_3 та Fe_2O_3 з утворенням метаборатів $FeBO_3$ та $CrBO_3$ ($B_2O_3 + Fe_2O_3 = 2FeBO_3$; $B_2O_3 + Cr_2O_3 = 2CrBO_3$) з низькою температурою плавлення: $t_{пл}(FeBO_3) = 800^{\circ}C$, $t_{пл}(CrBO_3) = 780^{\circ}C$. Бурі властива висока здатність розчиняти оксидні плівки на поверхні сталевій оболонки та часточках порошку Cr у шихті ПД. При цьому карбід бору повністю взаємодіє з Cr та сталевою оболонкою, сприяючи формуванню однорідніших покриттів з нанорозмірними виділеннями боридів. Це забезпечило зростання мікротвердості, абразивної зносостійкості та корозійної тривкості покриттів.

Евтектичні складові шихти ПД Fe-B, Fe-Si, Mn-Si та Fe-Ti, які мають низьку температуру плавлення ($740-800^{\circ}C$), призводить до утворення розплавленої ванни з низькою температурою плавлення в процесі ЕДП, що забезпечує плавлення тугоплавких компонентів шихти ПД (хром, V_4C , ферохром, ферохромбор). Наявність евтектик у розплавленій ванні шихти ПД гарантує повне її сплавлення з оболонкою, утворення однорідного розплаву з якого утворюються краплини металу, що формують покриття.

Особливості структури ЕДП із ПД Fe-Cr-Si-Mn-B-C на сталевих та алюмінієвих підкладках. Незалежно від підкладки (алюміній чи сталь), покриття мало типову ламелярну структуру (рис. 1). У покритті на сталевій підкладці спостерігалися окремі мікротріщини, ймовірно, через вищі залишкові напруження розтягу I роду в цьому випадку порівняно з тими, що характерні для покриття на алюмінієвій підкладці.



а

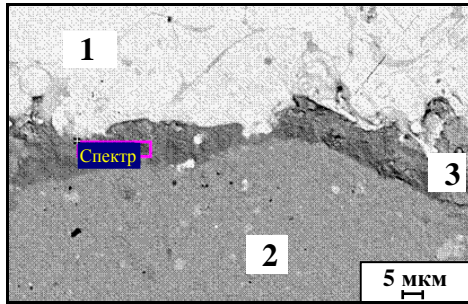


б

Рисунок 1. Типова структура покриттів, напилених ПД Fe-Cr-Si-Mn-B-C на алюмінієву (а) та сталеву(б) основи

Поверхня алюмінієвих сплавів завжди має природній оксидний шар з температурою плавлення $2050^{\circ}C$. Цей шар запобігає сплавленню (ЕДП) з підкладкою. Екзотермічні реакції, що відбуваються між компонентами шихти ПД під час ЕДП,

призводять до підвищення температури в їх розплавлених краплях на 300–500 °С. Це сприяє плавленню природного оксидного шару на алюмінієвому сплаві та утворенню зони розплаву, яка може досягати 10 мкм завтовшки між ЕДП та алюмінієвою підкладкою. Спектральний аналіз зони розплаву підтвердив наявність у її складі алюмінію (з підкладки) та заліза, хрому, марганцю та кремнію (з ЕДП) (рис. 2). Адгезійна міцність нанесених покриттів збільшилася з 36 до 55 МПа. На сталевій підкладці ці зони плавлення були значно меншими через значно вищу температуру плавлення сталі порівняно з алюмінієвим сплавом.



Елемент	Ваговий %	Атомний %
O	6.20	13.15
Al	44.04	55.44
Si	1.68	2.04
Cr	2.42	1.58
Mn	1.65	1.02
Fe	44.01	26.77
Всього	100.00	

Рисунок 2. Зона сплавлення ЕДП із ПД 90Х6РГС з алюмінієвою основою.

1 – ЕДП 90Х6РГС; 2 – алюмінієвий сплав Д16; 3 – зона сплавлення.

Порівняння структури покриттів із ПД, напилених використанням до- та надзвукового повітряного струменів. Коли використовується надзвуковий струмінь повітря під тиском 1,2 МПа, порівняно з дозвуковим струменем під тиском 0,6 МПа, ЕДП нанесені на сталеві та алюмінієві підкладки, демонструють більш дисперсну структуру та зменшену пористість (рис. 3). Ламелі покриттів, нанесених надзвуковим напиленням, є більш плоскими та мають більше точок зварювання. Загалом, покриття, нанесені дозвуковим напиленням, мають більше мікротріщин, ніж покриття, нанесені надзвуковим напиленням (рис. 3а). Це пов'язано з вищою кінетичною енергією крапель розплавленого металу у надзвуковому струмені, а також з нижчими залишковими напруженнями розтягу I роду в покриттях.

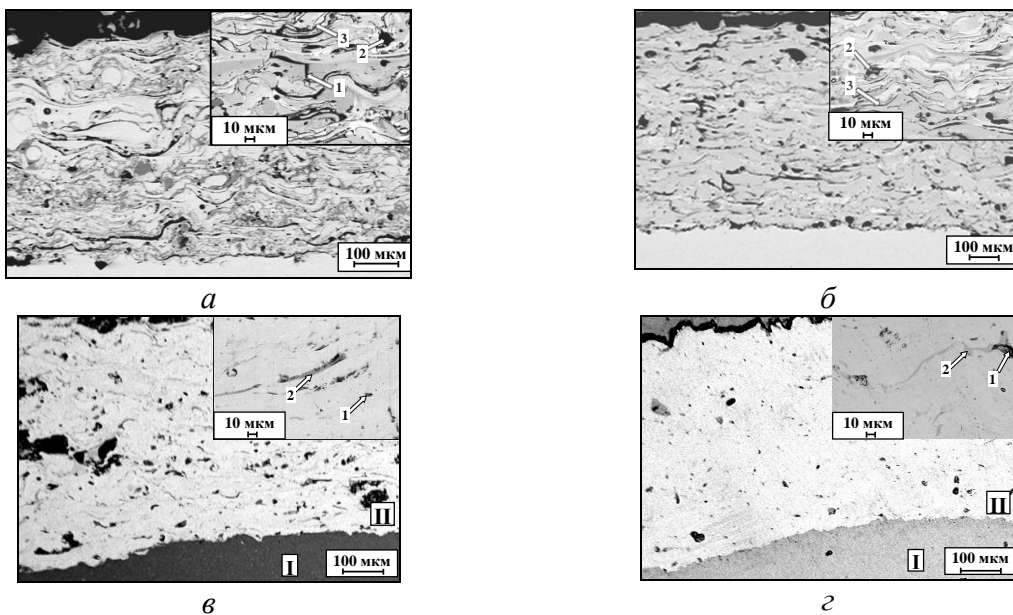


Рисунок 3. Структура ЕДП з ПД 90Х6Р2ГС, напилених за тиску повітряного струменя 0,6 (а, в) та 1,2 (б, г) МПа на сталеву (а, б) та алюмінієву (в, г) підкладки, 1 – мікротріщини; 2 – пори; 3 – оксидні плівки; I – основа; II – покриття.

Потужніший надзвуковий струмінь повітря інтенсивніше диспергував розплавлений метал ПД під час нанесення покриття. Одночасно утворювалася більша кількість дрібніших крапель розплавленого металу ПД з вищою кінетичною енергією. Таким чином, зі збільшенням тиску струменя повітря з 0,6 до 1,2 МПа максимальний діаметр крапель зменшився зі 150 до 30 мкм, а їхня швидкість на дистанції нанесення збільшилася зі 130 до 250 м/с (рис. 4). Однак вміст кисню в структурі покриття не перевищував 3% ні при дозвуковому, ні при надзвуковому варіанті струменя повітря.

Збільшення вмісту Cr від 6 до 17 мас.% у покритті з ПД, що містив 2 мас.% бору, практично не змінило його структури. У цих покриттях утворювалися мікротріщини, пори та оксидні плівки, однак застосування надзвукового режиму напилювання істотно зменшило їх кількість у структурі ЕДП.

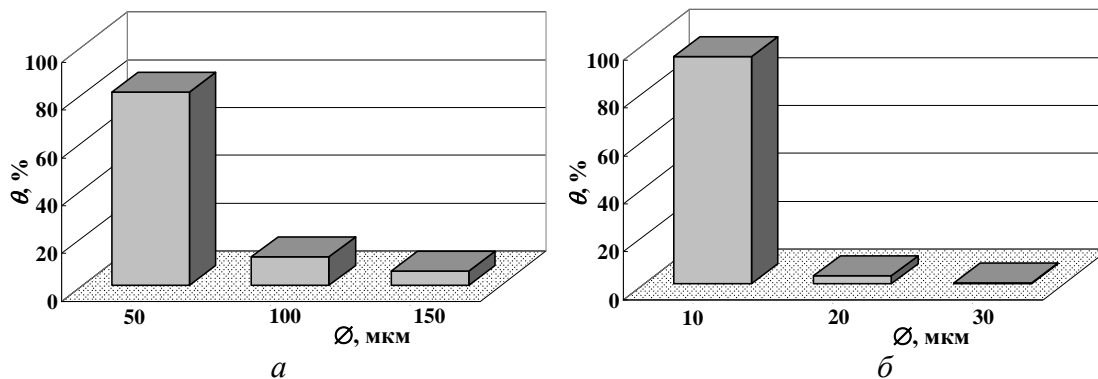


Рисунок 4. Розподіл крапель розплаву ПД 90X6ГC за розмірами залежно від тиску повітряного струменя: *a* – 0,6 ; *б* – 1,2 МПа

Застосування для напилювання покриттів із ПД надзвукового повітряного струменя дало змогу зменшити розміри лемелей із краплин розплаву ПД, і як наслідок, пришвидшити їх кристалізацію на поверхні напилювання. При цьому бориди $Fe(Cr)_2V$ у структурі покриттів диспергувалися від 500 до 200 нм (рис. 5).

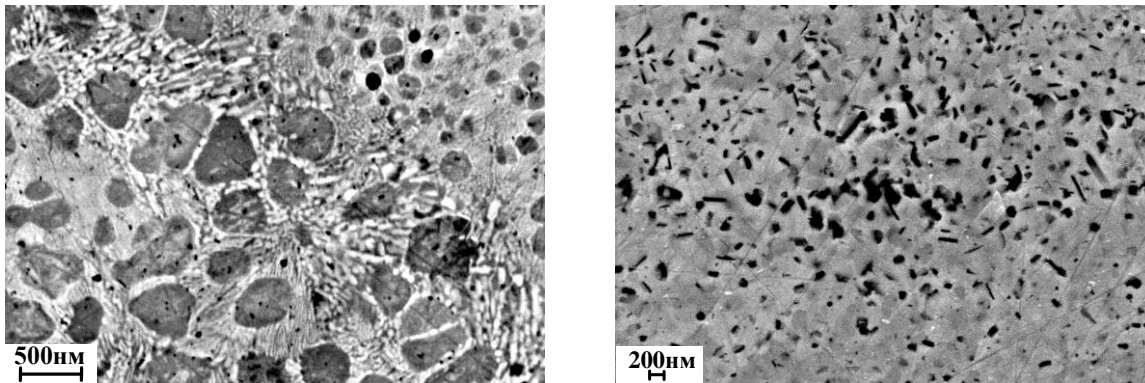


Рисунок 5. Виділення дрібнодисперсних боридів $Fe(Cr)_2V$ у структурі покриття з ПД 90X17P2ГC, напиленого за дозвукового (0,6 МПа) (*a*) та надзвукового (1,2 МПа) (*б*) тиску повітряного струменя.

Висновки: використання надзвукового повітряного струменя в процесі електродугового напилювання покриттів зумовлює формування більш дисперсної структури та меншу кількість мікротріщин та пор. Екзотермічні реакції, які відбуваються між компонентами шихти ПД в процесі напилення ЕДП та підвищення кінетичної енергії розплавлених краплин за надзвукового режиму напилення, зумовлюють підвищення їх температури на 300...500 °C, та формування зон сплавлення покриття і алюмінієвої основи.

УДК:669.056.91

Володимир Гвоздецький¹, д.т.н., ст. досл., Дмитро Яремчук, аспірант, Михайло Студент¹, д.т.н., проф, Христина Задорожна¹ к.т.н., ст.н.с. Олександр Гасій² д.т.н., проф., Іван Гончар² к.т.н., доц., Галина Веселівська¹ к.т.н., ст. досл.

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

²Національний лісотехнічний університет України

ВИБІР ЕЛЕКТРОЛІТУ ДЛЯ ІМПУЛЬСНОГО АНОДУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Анотація. В процесі імпульсного анодування у оксалатній кислоті оксалат-аніони вбудовуються в структуру анодованого шару а за високої напруги процесу при 150 В відбувається часткова деструкція оксалат-аніонів з виділенням вуглецю (карбонізація), що зміцнює стінки пор та забезпечує високі трибологічні характеристики анодованих шарів.

Ключові слова: алюмінієві сплави, імпульсне анодування, трибологічні характеристики

Volodymyr Hvozdettskyi¹, Dmytro Yaremchuk², Mykhailo Student¹, Khrystyna Zadorozhna¹ Oleksandr Hasiy², Ivan Honchar², Halyna Veseliv'ska¹

SELECTION OF ELECTROLYTE FOR PULSE ANODIZING OF ALUMINUM ALLOYS

During the process of pulsed anodizing in oxalic acid, oxalate anions are incorporated into the structure of the anodized layer, and at a high process voltage of 150 V, partial destruction of oxalate anions occurs with the release of carbon (carbonization), which strengthens the pore walls and ensures high tribological characteristics of the anodized layers.

Keywords: aluminum alloys, pulse anodizing, tribological characteristics

Алюмінієві сплави є критичними для аерокосмічної та автомобільної галузей, але їхня низька зносостійкість обмежує застосування в парах тертя. Класичне сульфатне анодування ((Hard Anodizing, тип III) - ТА) цих сплавів формує пористі, гідратовані шари ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$), які втрачають твердість при нагріванні вище 100°C. Перехід до оксалатних електролітів та високовольтного імпульсного режиму (150 В) дозволяє змінити механізм росту плівки. Імпульсне тверде анодування (ІТА) – це технологія, де замість постійного струму використовуються переривчасті електричні імпульси. Це дає кілька суттєвих переваг порівняно з класичним методом. Завдяки контрольованим імпульсам структура оксидного шару стає щільнішою. Це ідеально для деталей, які постійно труться або працюють під навантаженням. Оскільки струм подається порціями, електроліт і сама деталь менше нагріваються. Це дозволяє уникнути «підпалів» металу та отримати рівномірне покриття на деталях складної форми. Процес ІТА зазвичай іде швидше (до 30-50% приросту швидкості нарощування шару), оскільки можна використовувати вищу щільність струму без ризику зіпсувати деталь. Імпульсний режим дозволяє якісно анодувати ливарні сплави з високим вмістом кремнію (наприклад, силуміни) або міді, які важко піддаються звичайному анодуванню. Покриття виходить менш пористим і більш гладким, що покращує як зовнішній вигляд, так і антикорозійні властивості.

ТА часто використовується в конструкції БПЛА для захисту алюмінієвих компонентів, які піддаються високим механічним або термічним навантаженням. Основними сферами застосування ТА є:

- картер двигуна – ТА створює захисний шар проти корозії від агресивних продуктів згоряння палива;
- гільзи циліндрів та поршні – ТА забезпечує низький коефіцієнт тертя та стійкість до високих температур;

- напрямні та замки – ТА запобігає «закушуванню» металевих деталей при механічному терті та захищає від піску чи бруду в польових умовах;
- рами та кронштейни – ТА підвищує жорсткість конструкції без значного збільшення ваги, що важливо для точного маневрування на високих швидкостях;
- радіатори охолодження – ТА допомагає ефективніше відводити тепло від потужних відеопередавачів (VTX) та регуляторів швидкості (ESC), які сильно нагріваються під час тривалого баражування;
- корпуси камер та підвісів – ТА захищає високоточні деталі від подряпин та атмосферного впливу (вологи, солі), забезпечуючи працездатність сенсорів до моменту влучання в ціль.

Однак класичне сульфатне анодування – ТА дає пористі, гідратовані шари, які втрачають твердість при нагріванні вище 100°C.

Перехід до оксалатних електролітів та високовольтного (~150 В) імпульсного режиму анодування (ІТА) дозволяє змінити механізм росту плівки. Висока енергія імпульсу сприяє формуванню маловодних фаз (беміту – $Al_2O_3 \cdot nH_2O$), що забезпечує термічну стабільність та високу трибологічну стійкість таблиця 1.

Таблиця 1. Характеристики електролітів для імпульсного анодування

Характеристика	Сульфатний електроліт	Оксалатний електроліт
Формуюча напруга	Формуюча напруга процесу твердого анодування – 15–25 В. При збільшенні напруги до 150 В виникає ризик пробую та розчинення анодованого шару.	Процес анодування за формуючої напруги 100–160 В відбувається без пробую анодованого шару (високовольтне анодування).
Структура	В процесі анодування формується фаза гібситу ($Al_2O_3 \cdot n3H_2O$) через високу агресивність електроліту	Формує щільний беміт завдяки низькій розчинній здатності ($Al_2O_3 \cdot H_2O$).
Твердість	Середня (до 400–500 HV).	Максимальна (до 600 – 650 HV).
Трибологічні властивості	Потребує додаткового наповнення мастилами.	Має природні антифрикційні властивості (включення оксалатів).

При однаковій напрузі 150 В енергоспоживання в процесі ІТА залежить від електропровідності електроліту:

- Сульфатний електроліт має дуже високу провідність. При напрузі 150 В струми будуть значними і енерговитрати високі. Більша частина енергії йде не на ріст анодного шару, а на розкладання води (газовиділення) та нагрів ванни. При цьому необхідно потужні холодильні установки, що споживають у 2-3 рази більше електрики, ніж сам процес анодування.

- Оксалатний електроліт має низьку провідність (високий опір), Енерговитрати помірні, а густина струму при напрузі 150 В залишається в межах норми для твердого анодування (2–5 А/дм²). Система охолодження працює в ощадному режимі, оскільки виділяється значно менше джоулевого тепла. За витратами на кВт·год оксалатний процес виграє за рахунок менших затрат на охолодження.

Висновок. Вища ціна закупівлі оксалатної кислоти компенсується низьким відсотком браку та меншими затратами за електрику (охолодження). В оксалатній кислоті оксалат-аніони вбудовуються в структуру анодованого шару а за високої напруги процесу ІТА при ~150 В відбувається часткова деструкція оксалат-аніонів з виділенням вуглецю (карбонізація), що зміцнює стінки пор. Критична напруга 150 В є пороговою для переходу від аморфних гідроксидних структур до термодинамічно стабільних оксидних фаз у оксалатних електролітах. Це пояснює високу твердість та високі трибологічні характеристики анодованих шарів.

УДК 621.793.7

Сергій Калюжний, к.т.н., с.д., Сергій Войнарович, к.т.н., с.н.с.,

Олександр Кислиця к.т.н., с.д., Людмила Малахова

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ДИСПЕРГОВАНИХ ЧАСТИНОК ТАНТАЛОВОГО ДРОТУ В ПРОЦЕСІ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

Анотація. У роботі досліджено формування диспергованих частинок танталового дроту при мікроплазмовому напиленні. Показано, що розмір частинок ($101 \pm 20 - 282 \pm 58$ мкм) визначається насамперед силою струму та швидкістю подачі дроту. Отримано регресійну залежність, яка дозволяє прогнозувати та керувати розміром частинок.

Ключові слова: мікроплазмове напилення, біосумісне покриття, танталовий дріт

**S. Kaliuzhnyi Ph.D., Senior Researcher, S. Voinarovych, Ph.D., Senior Research Fellow,
O. Kyslytsia Ph.D., Senior Researcher, L. Malakhova**

REGULARITIES OF THE FORMATION OF DISPERSED PARTICLES OF TANTALUM WIRE IN THE PROCESS OF MICROPLASMA SPRAYING

Abstract. The study investigates the formation of dispersed tantalum wire particles during microplasma spraying. It is shown that the particle size (101 ± 20 to 282 ± 58 μm) is mainly determined by the arc current and the wire feed rate. A regression relationship was obtained that enables prediction and control of particle size.

Keywords: microplasma spraying, biocompatible coating, tantalum wire

Дефекти кісткової тканини залишаються однією з найпоширеніших і складних клінічних проблем сучасної ортопедії та травматології. У випадках, коли розміри дефекту перевищують природний регенераційний потенціал організму, самовідновлення кісткової тканини є неможливим, що обумовлює необхідність застосування імплантатів.

На сьогодні найбільш поширеними є імплантати із титанових сплавів, що зумовлено їхніми високими механічними характеристиками та задовільною біосумісністю. Водночас у науковій літературі наявні дані щодо потенційного негативного впливу іонів, які можуть вивільнятися з таких матеріалів у фізіологічному середовищі [1]. У зв'язку з цим зростає інтерес до альтернативних матеріалів, зокрема танталу, який характеризується високою корозійною стійкістю, біоінертністю та здатністю до ефективної остеointegraції [2].

Відомо, що ефективність остеointegraції значною мірою визначається характеристиками поверхні імплантату [3]. Використання функціональних покриттів із керованою морфологією та заданими фізико-хімічними властивостями суттєво розширює можливості регулювання взаємодії імплантату з біологічним середовищем порівняно з немодифікованими матеріалами [4]. Ключовими параметрами при цьому є шорсткість, пористість та розмір пор, які безпосередньо впливають на адгезію клітин, їх проліферацію та диференціацію, а також на перебіг процесів остеогенезу [5].

Для досягнення необхідних властивостей широко застосовують модифікування поверхні, зокрема шляхом нанесення функціональних покриттів. Серед методів формування таких покриттів провідне місце займають газотермічні технології завдяки високій продуктивності та відносній простоті реалізації. Зокрема, мікроплазмове напилення (МПН) зарекомендувало себе як перспективний метод отримання біосумісних покриттів на основі титану та цирконію, що дозволяє формувати їх із керованою пористістю та морфологією поверхні [6]. Суттєвий вплив на формування

структури покриттів, отриманих методами газотермічного напилення, мають параметри технологічного процесу, а також характеристики вихідного матеріалу, зокрема розмір диспергованих частинок [7]. Зменшення розміру частинок, як правило, сприяє формуванню більш щільних, однорідних і гладких покриттів, тоді як збільшення їх розміру призводить до зростання пористості, зміни мікроструктури та, відповідно, механічних і біологічних властивостей покриттів [8]. Отже, контроль та прогнозування розміру частинок є важливим інструментом керування структурно-функціональними характеристиками покриттів, зокрема рівнем пористості та геометрією порового простору.

Тому метою даної роботи є дослідження розміру танталових частинок, що утворюються безпосередньо під час диспергування дроту в умовах МПН покриттів, а також аналіз впливу технологічних параметрів процесу на їх формування для подальшого керування структурою та властивостями покриттів.

Розробка методології дослідження була здійснена із застосуванням методу математичного планування експерименту відповідно до дробового факторного плану типу $2^4 - 1$ (табл. 1). Досліджуваними технологічними параметрами режиму МПН, на зміну розміру частинок танталового дроту, були: сили струму (I , А), витрати плазмоутворюючого газу ($Q_{пл}$, л/год), дистанції напилення (H , мм) та швидкості подачі дроту ($V_{др}$, м/с).

Таблиця 1 – Матриця для дослідження впливу параметрів режиму мікроплазмового напилення на розмір часток при диспергуванні дроту танталу.

№ експерименту (режиму напилення)	Сила струму I , А	Витрата плазмоутворюючого газу $Q_{пл}$, л/год	Дистанція напилення H , мм	Швидкість подачі дроту $V_{др}$, м/с
1	40	300	100	0,06
2	40	300	40	0,04
3	40	200	100	0,04
4	40	200	40	0,06
5	20	300	100	0,04
6	20	300	40	0,06
7	20	200	100	0,06
8	20	200	40	0,04

Аналіз зовнішнього вигляду диспергованих частинок Та-дроту показав, що їх переважна кількість має форму подібну сфері з різним розміром в діаметрі (рис. 1).

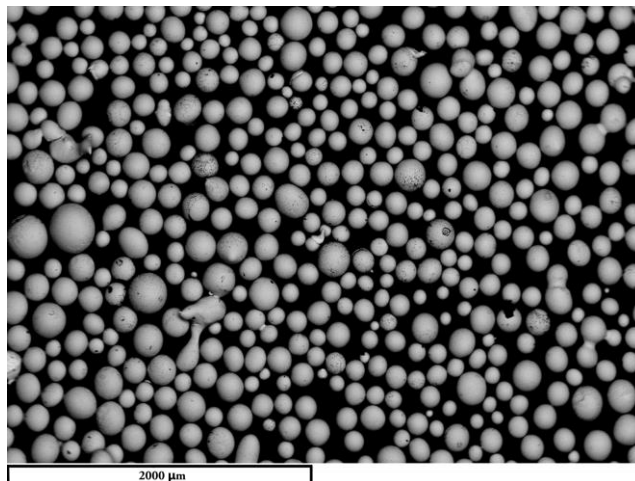


Рисунок 1. Зовнішній вигляд диспергованих частинок Та-дроту

Розрахунок середнього діаметра (d_c) диспергованих частинок Та-дроту показав, що він знаходиться в діапазоні від 101 ± 20 мкм до 282 ± 58 мкм і залежить від режиму МПН (рис. 2).

Мінімальний середній розмір частинок $d_c = 101 \pm 20$ мкм було отримано на режимі МПН №1, який характеризується поєднанням робочих параметрів на максимальних рівнях. За умов підвищеної сили струму зростає температура мікроплазмового струменя, що призводить до зниження поверхневого натягу розплаву металу та полегшує процес його диспергування. Водночас збільшення витрати плазмоутворюючого газу сприяє підвищенню швидкості витоку струменя та зростанню динамічного тиску на краплю розплаву, що інтенсифікує її зрив із торця танталового дроту. За максимальної швидкості подачі дроту відбувається швидше занурення його торця в область дії струменя, зокрема в зону з найбільш інтенсивними тепловими та динамічними потоками. Сукупна дія зазначених факторів забезпечує формування диспергованих частинок мінімального розміру. Додатково цьому сприяє збільшена дистанція напilenня, яка подовжує час перебування частинок у високотемпературному потоці. Цей процес також сприяє додатковому зменшенню розміру сформованих частинок.

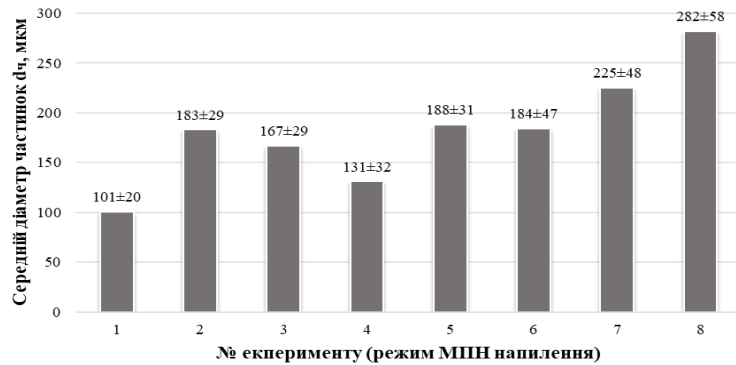


Рисунок 2. Зміна розміру частинок із танталового дроту при мікроплазмовому напilenні в діапазоні досліджуваних значень технологічних параметрів табл. 1

Комбінація мінімальних значень технологічних параметрів МПН сили струму, витрати плазмоутворюючого газу та швидкості подачі дроту зумовлює формування диспергованих частинок танталового дроту з максимальним або близьким до максимального розміру $d_c = 282 \pm 58$ мкм. Це пояснюється зниженням температури мікроплазмового струменя та швидкості його витоку, що, у свою чергу, призводить до зменшення динамічного тиску на краплю розплаву, яка формується на торці дроту, і, відповідно, до менш інтенсивного її диспергування. Мінімальна швидкість подачі дроту забезпечує більш повільне занурення його торця в плазмовий потік і поступове нагрівання. За таких умов плавлення відбувається менш інтенсивно, з переважним впливом периферійних зон струменя, для яких характерні нижчі значення температури та швидкості потоку порівняно з приосьовою областю. Це сприяє формуванню більших за розміром крапель розплаву. Крім того, за малої дистанції напilenня та відносно невисокої швидкості руху частинок вони не зазнають значного прискорення, що знижує інтенсивність їх додаткового дроблення.

На основі проведених експериментальних досліджень та їх статистичного аналізу було встановлено регресійну залежність зміни середнього розміру танталових частинок, що диспергуються з дроту, у межах дослідженого діапазону параметрів технологічного процесу мікроплазмового напilenня (табл. 1). Отримана залежність

адекватно описується лінійною регресійною моделлю (1) в межах варійованих технологічних параметрів.

$$d_{\text{ч}} (\text{мкм}) = k_1 + k_2 \cdot I + k_3 \cdot Q + k_4 \cdot H + k_5 \cdot V_{\text{др}} \quad (1)$$

де, $k_1 = 550,25$ (мкм), $k_2 = -3,71$ (мкм $\cdot \text{A}^{-1}$); $k_3 = -0,37$ (мкм $\cdot (\text{л}/\text{год})^{-1}$); $k_4 = -0,41$ (мкм $\cdot \text{мм}^{-1}$); $k_5 = -0,75$ (мкм $\cdot (\text{м}/\text{с})^{-1}$) – числові значення коефіцієнтів рівняння регресії.

Регресійний аналіз дозволив оцінити вплив основних параметрів процесу МПН на середній розмір частинок. Отримане рівняння регресії (1) показало, що найбільший вплив на формування розміру частинок при МПН мають сила струму (I) та швидкість подачі дроту ($V_{\text{др}}$). Встановлено, що варіювання технологічних параметрів МПН забезпечує можливість цілеспрямованого керування розміром диспергованих частинок танталового дроту, що своєю чергою, дозволяє прогнозувати майбутню структуру покриттів.

Опубліковані результати були отримані в межах реалізації проекту «Інноваційні біосумісні покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками для ортопедичних імплантів, адаптованих до сучасних потреб військової та цивільної медицини, та комплекс технологій їх нанесення», за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в межах конкурсу «Передова наука в Україні 2026-2028» згідно договору № 27.07/0404 від 02.03.2026 року.

Перелік посилань

1. R. V. Badhe, O. Akinfosile, D. Bijukumar, M. Barba, M. T. Mathew. Systemic toxicity eliciting metal ion levels from metallic implants and orthopedic devices. *Toxicology Letters*. 2021. Vol. 350. P. 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2021.07.004>
2. Z. Tang, Y. Xie, F. Yang, Y. Huang, C. Wang, K. Dai, X. Zheng, X. Zhang. Porous tantalum coatings prepared by vacuum plasma spraying enhance bmscs osteogenic differentiation and bone regeneration in vitro and in vivo. *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8, no. 6. P. e66263. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066263>
3. J. Cui, S. Zhang, M. Huang, X. Mu, J. Hei, V. Yau, H. He. Micro-nano porous structured tantalum-coated dental implants promote osteogenic activity in vitro and enhance osseointegration in vivo. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2023. P. 1358-1371. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37538>
4. E. Avcu, Y. Y. Avcu, B. Yavuzyeğit, M. Guney. Advances in surface engineering and biocompatible coatings for biomedical applications. *Coatings*. 2025. Vol. 15, no. 12. P. 1475. <https://doi.org/10.3390/coatings15121475>
5. W. Liu, S. Liu, L. Wang. Surface Modification of biomedical titanium alloy: micromorphology, microstructure evolution and biomedical applications. *Coatings*. 2019. Vol. 9, no. 4. P. 249. <https://doi.org/10.3390/coatings9040249>
6. The influence of plasma-sprayed coatings on surface properties and corrosion resistance of 316L stainless steel for possible implant application. A. Woźniak et al. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 21, no. 4. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00297-1>
7. S. P. Vajapey, V. M. Shah, M. Li, D. M. Estok. Cementless fixation in total joint arthroplasty: factors impacting osseointegration. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 2024. P. 102871. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2024.102871>
8. Z. Yang, D. Liu, C. Luo, K. Zhou, K. Wang, X. Li, X. Li, X. Zhang. The effect of powder particle size on microstructure, mechanical and tribological properties of APS-IN718 coatings for repair applications. *Surface and Coatings Technology*. 2025. Vol. 512. P. 132430. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132430>

УДК 678.026

Кравченко Олег

ТОВ «Технологія», Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЛАМІНУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ

Анотація. У роботі досліджено процес ламінування як ключовий етап формування багатошарових покриттів у промислових умовах. Запропоновано комплексний метод оптимізації режимів ламінування, що базується на системному підході та експериментальному варіюванні параметрів. У результаті визначено оптимальні діапазони технологічних режимів і отримано залежності між параметрами процесу та якісними показниками, що дозволило підвищити адгезійну міцність на 15–25% і зменшити кількість дефектів на 30–40%. Показано, що впровадження оптимізованих режимів забезпечує підвищення стабільності процесу та ефективності виробництва.

Ключові слова: ламінування, багатошарові покриття, адгезія, технологічні параметри.

Oleg Kravchenko

OPTIMIZATION OF LAMINATION PROCESS PARAMETERS TO IMPROVE THE QUALITY OF MULTILAYER COATINGS

Abstract. The paper investigates the lamination process as a key stage in the formation of multilayer coatings in industrial conditions. A comprehensive method for optimizing lamination modes is proposed, based on a systematic approach and experimental variation of parameters. As a result, the optimal ranges of technological modes are determined and the dependences between process parameters and quality indicators are obtained, which allowed to increase the adhesion strength by 15–25% and reduce the number of defects by 30–40%.

Keywords: lamination, multilayer coatings, adhesion, technological parameters.

Вступ

Процес ламінування є одним із ключових етапів виготовлення багатошарових матеріалів у пакувальній, поліграфічній та композитній промисловості. Його сутність полягає у з'єднанні декількох шарів матеріалів за рахунок дії температури, тиску та адгезійних властивостей клею. Якість багатошарових покриттів визначається міцністю адгезійного з'єднання, однорідністю структури та відсутністю дефектів (бульбашок, зморшок, деламінації). Водночас у промислових умовах (зокрема на лініях типу Duplex Combi Linear) забезпечення стабільної якості ускладнюється через багатofакторність процесу. У зв'язку з цим актуальним є завдання оптимізації параметрів процесу ламінування з метою підвищення якості готової продукції та зменшення кількості браку.

Огляд проблематики та існуючих методів вирішення

Процес ламінування багатошарових матеріалів характеризується складною багатofакторною природою, що зумовлює значні труднощі у забезпеченні стабільної якості продукції в промислових умовах [1]. Особливо це актуально для високошвидкісних ліній, де навіть незначні відхилення параметрів можуть призводити до суттєвого погіршення експлуатаційних характеристик покриття.

До основних факторів, що впливають на якість ламінування в технологічному процесі належать: температура нагрівальних валів, тиск у зоні контакту, швидкість руху полотна, товщина та рівномірність нанесення клею, властивості матеріалів (поверхнева енергія, шорсткість, хімічна сумісність). Взаємодія цих факторів є

нелінійною. Наприклад, підвищення температури зменшує в'язкість клею, що покращує змочування поверхні, однак надмірне нагрівання може призвести до деградації полімеру або утворення дефектів. Аналогічно, збільшення тиску підвищує адгезію, але може викликати деформацію тонких плівок.

Причини цих дефектів часто мають комплексний характер, що ускладнює їх усунення шляхом регулювання лише одного параметра. Існуючі методи вирішення включають: регулювання температурних режимів, багатоступеневе пресування, контроль часу витримки, оптимізацію товщини клею та швидкості нанесення. Сучасні підходи також передбачають використання методів статистичної оптимізації (метод Тагучі), що дозволяє визначити найбільш впливові параметри процесу [2].

Запропонований метод вирішення

У даній роботі запропоновано комплексний метод оптимізації параметрів процесу ламінування, який базується на системному підході до узгодження основних технологічних факторів з урахуванням їх взаємного впливу на якість багат шарового покриття.

На відміну від традиційних підходів, де параметри налаштовуються незалежно один від одного, запропонований метод передбачає їх одночасний аналіз та поетапну оптимізацію в умовах реального виробництва. Визначення ключових факторів впливу відіграє важливу роль і тому на першому етапі було визначено основні параметри, що мають найбільший вплив на якість ламінування зазначених вище. Додатково враховувались характеристики матеріалів (тип полімеру, товщина, поверхнева енергія). Для оцінки впливу параметрів було застосовано метод варіювання з побудовою експериментальної матриці. Кожен параметр змінювався у визначеному діапазоні: температура — у межах технологічно допустимих значень; швидкість — від мінімальної робочої до максимально допустимої; тиск — у межах, що не викликають деформації матеріалу; витрата клею — залежно від типу покриття.

Комбінації параметрів підбирались таким чином, щоб виявити як окремий вплив кожного фактору, так і їх взаємодію. Відповідно узгодження параметрів процесу на основі експериментальних даних було встановлено, що найбільш суттєвим є не окремий вплив параметрів, а їх взаємозалежність. Зокрема:

- температура та швидкість (при збільшенні швидкості лінії необхідне підвищення температури для забезпечення достатньої активації клею та змочування поверхні);

- тиск та товщина клею (недостатній тиск при малій товщині клею призводить до неповного контакту між шарами, тоді як надмірний тиск викликає витіснення клею та нерівномірність покриття);

- в'язкість клею та швидкість нанесення (зміна в'язкості впливає на рівномірність розподілу клею, що потребує коригування швидкості нанесення та параметрів дозування).

У зв'язку з цим було сформовано узгоджені режими роботи, які забезпечують стабільну якість при різних умовах, що відобразилось у алгоритмі оптимізації. Запропонований метод реалізується у вигляді послідовного алгоритму:

- 1 - встановлення базових параметрів (середні значення технологічного режиму);
- 2 - поступова зміна одного з параметрів із фіксацією інших;
- 3 - оцінка якості ламінату за показниками:
 - адгезії (міцність з'єднання);
 - наявності візуальних дефектів;
 - рівномірності покриття;
- 4 - коригування суміжних параметрів з урахуванням отриманих результатів;

5 - визначення оптимальної комбінації параметрів.

Запропонований метод був апробований в умовах промислового ламінування рулонних матеріалів на установці Machine Duplex Combi Linear L1300 [3]. Його впровадження не потребує додаткового обладнання, а базується на оптимальному налаштуванні існуючих технологічних параметрів. Практична цінність методу полягає у можливості: швидкої адаптації до зміни матеріалів; зменшення впливу людського фактора; стандартизації режимів роботи обладнання.

Результати дослідження та ефективність

У результаті аналізу встановлено, що підвищення температури ламінування призводить до зростання адгезійної міцності, збільшення тиску в свою чергу покращує контакт між шарами та зменшує кількість дефектів. Встановлено також, що оптимальне поєднання параметрів дозволяє підвищити міцність з'єднання на 15–25%, зменшити кількість дефектів і забезпечити стабільність якості продукції. Отримані результати узгоджуються з сучасними дослідженнями у сфері ламінування, які підтверджують критичний вплив температури, тиску та швидкості на адгезійні властивості матеріалів (рисунок 1).

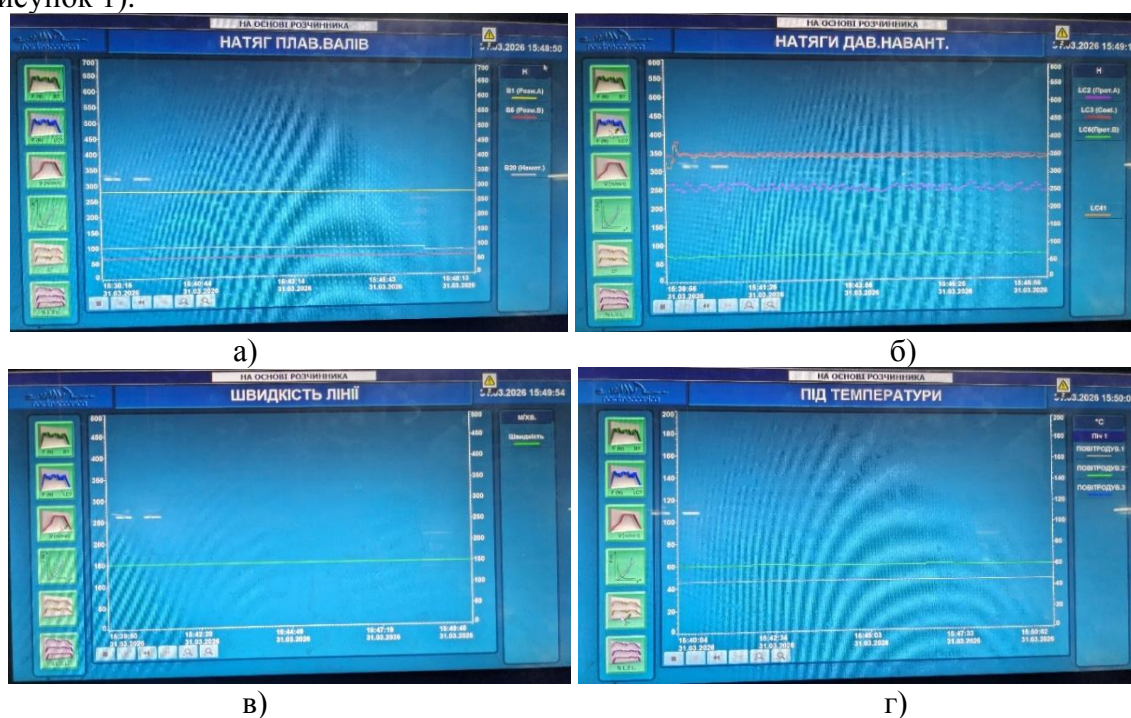


Рис. 1. Графіки залежностей основних технологічних параметрів на лінії Duplex Combi Linear L1300: а), б) – залежність натягу (тиску), в) – залежність швидкості процесу ламінування, г) – залежність температури.

Вплив температури на якість ламінування є досить значною. Було встановлено, що температура ламінувальних валів є одним із визначальних факторів формування адгезійного з'єднання. При температурі нижче 60 °С спостерігалось недостатнє змочування поверхні, що призводило до зниження адгезії та появи локальних зон деламінації. У діапазоні 70–85 °С забезпечувалась оптимальна активація клею, рівномірний розподіл та максимальна міцність з'єднання. При перевищенні 90 °С фіксувались ознаки перегріву: зниження в'язкості клею, його витіснення із зони контакту та поява дефектів типу «сухих зон». У результаті було визначено оптимальний температурний діапазон, який забезпечує стабільну якість покриття без перевитрат енергії.

Вплив швидкості лінії в процесі дослідження показали суттєву залежність якості ламінування від швидкості руху полотна, а саме: при швидкості до 120 м/хв забезпечується достатній час контакту для формування адгезійного зв'язку, проте знижується продуктивність; у діапазоні 130–180 м/хв досягається оптимальний баланс між якістю та продуктивністю; фольга для прикладу (9 – 12 мкр) на швидкості 200 - 350 м/хв формує оптимальне нанесення адгезивів, що напряду впливає на покращення зовнішнього вигляду. Встановлено, що підвищення швидкості потребує відповідного коригування температури та тиску.

Дослідження впливу тиску в зоні ламінування визначає ступінь контакту між шарами матеріалу та рівномірність розподілу клею. При недостатньому тиску (< 2 бар) спостерігається неповне прилягання шарів і наявність повітряних включень. Оптимальний діапазон (2,5–4 бар) забезпечує рівномірне з'єднання без деформації матеріалу. Надмірний тиск (> 5 бар) призводить до витіснення клею та утворення нерівномірного шару.

Експериментально встановлено, що вплив товщини клеєвого шару нанесення суттєво впливає на якість покриття. При недостатній витраті (< 1,5 г/м²) виникають зони неповного склеювання. Оптимальне значення (2–3 г/м²) забезпечує рівномірну адгезію. Надлишок клею (> 3,5 г/м²) сприяє утворенню бульбашок та збільшенню часу полімеризації.

Висновки

У результаті проведеного дослідження процесу ламінування багатошарових покриттів у промислових умовах отримано практичні результати відображенні в даній статті. Підтверджено визначальну роль технологічних параметрів процесу ламінування у формуванні якісних характеристик багатошарових покриттів. Доведено, що температура, тиск, швидкість руху полотна та товщина клеєвого шару безпосередньо впливають на адгезійну міцність, однорідність структури та відсутність дефектів.

Розроблено та апробовано комплексний метод оптимізації параметрів ламінування, що базується на поетапному варіюванні факторів і врахуванні їх взаємного впливу. Запропонований підхід дозволяє системно підбирати режими роботи обладнання без необхідності значних додаткових витрат.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їх застосування для налаштування промислових ламінувальних установок (Machine Duplex Combi Linear L1300), адаптації технології до різних типів матеріалів та підвищення стабільності виробництва.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні узагальнених закономірностей впливу сукупності технологічних параметрів на якість багатошарових покриттів та обґрунтуванні необхідності їх комплексної оптимізації в єдиній системі керування технологічним процесом.

Перелік посилань

1. Мовчан А.П. Навчальний посібник: Методи статичної оптимізації. Навч. посіб. / Мовчан А.П., Степанець О.В. — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — 138 с.
2. Промислова установка ламінування Duplex Combi Linear L1300 [<https://www.nordmeccanica.com/products/combi-solutions/duplex-combi-linear>]. – Режим доступу: URL – Дата звернення: 20.04.2026р.
3. Маджид, И.; Ахмад Найик, Г.; Мохаммад Дар, С.; Нанда, В. Новые технологии упаковки пищевых продуктов: инновации и перспективы на будущее. Журнал Саудовского общества сельскохозяйственных наук, 2018, 17, 454–462.

УДК 539.43; 539.53

Лариса Лопата к.т.н., доц.; Віталій Калініченко к.т.н., с.н.с.; Олександр Лопата, PhD, с.н.с.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЕТАЛЕЙ ТА КОНСТРУКЦІЙ

Анотація. Обмежене використання покриттів обумовлено недостатньою розробкою технологічних методів оптимального нанесення покриттів підвищеної стійкості. Переважна кількість відомих методик нанесення покриттів не містить чітких рекомендацій по вибору їх геометричних параметрів. Особливо це стосується для покриття дискретної структури, що сприяє підвищенню термомеханічної стійкості. Питання розрахунку та оптимізації напружено-деформованого стану системи “основа–дискретне покриття” від експлуатаційних, силових та температурних навантажень недостатньо розкрито внаслідок складності розрахунку схем та параметрів покриттів, які суттєво відрізняються за геометричними розмірами та фізико-механічними властивостями матеріалів. Тому актуальним науковим завданням є раціональне проектування покриттів дискретної структури на основі аналізу їх напружено-деформованого стану.

Ключові слова. Чисельне моделювання, напружено-деформованого стану, покриттів дискретної структури, експлуатаційних, силових та температурних навантажень.

Konstantin Buiskikh, Larysa Lopata, Vitalii Kalinichenko

NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PARTS AND STRUCTURES

Anotation. The vast majority of known coating methods do not contain clear recommendations for the selection of their geometric parameters. This is especially true for coatings with a discrete structure, which contributes to increased thermomechanical stability. Therefore, the current task is the rational design of coatings of a discrete structure based on the analysis of their stress-strain state.

Key words. Numerical modeling of stress-strain state, coatings of discrete structure, operational, force and temperature loads.

Виконання інженерних розрахунків на міцність елементів конструкцій при сучасному розвитку обчислюваної техніки стало більш зручним та надійним (точним), завдяки використанню програмного забезпечення на основі методу скінченних елементів, реалізованих у таких відомих програмах як NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, COSMOS та ін. [1]. Вони дозволяють змоделювати складні геометричні форми деталі або конструкції з урахуванням будь-якого типу експлуатаційного навантаження.

Розповсюдженість цих програм обумовлена використанням їх для розрахунку складних задач механіки деформованого твердого тіла, задач теплопровідності, теорії коливань та інших специфічних розрахунків, таких як розрахунок елементів конструкції на міцність від впливу радіаційного випромінення. Деякі з них дозволяють проводити оптимізацію конструкції за граничними напруженнями та за геометричними розмірами обчислюваної деталі [2].

Як приклад, на рис. 1. показані твердотільні моделі різального інструменту, які можуть бути побудовані шляхом використання однієї з зазначених програм, на основі методу скінченних елементів.

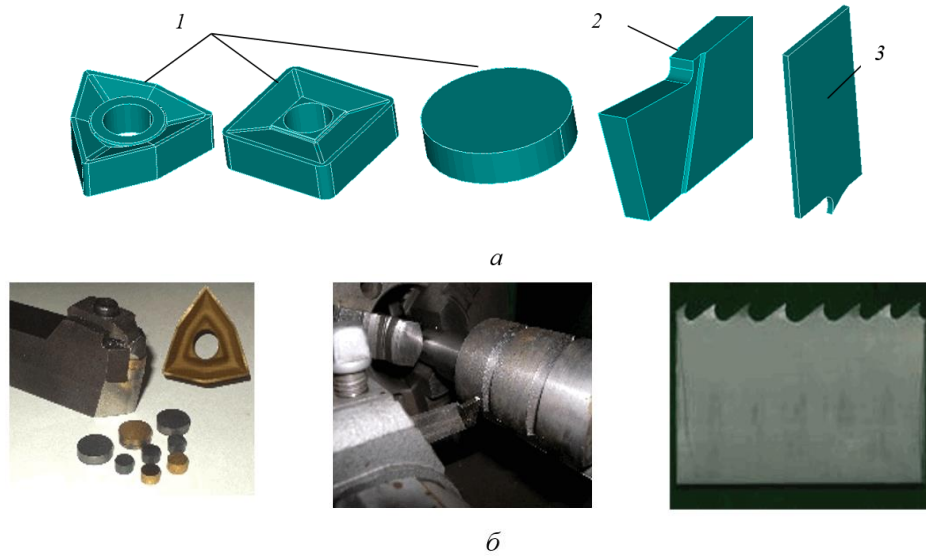


Рисунок 1. Твердотільні моделі різального інструменту побудовані у пакеті NASTRAN (а) на основі натурних об'єктів (б): 1 – твердосплавні різальні пластини; 2 – відрізний різець; 3 – фрагмент стрічкового біметалевого полотна.

Побудова та розрахунок моделей проводився в ліцензійному скінченно-елементному комплексі MSC VisualNastran, вибір якого обумовлювався відносною простотою та значною універсальністю. Він розрахований на аналіз стаціонарних та нестационарних задач теплопровідності, задач статичної термопружності, частотний аналіз, оптимізацію конструкції та інших розрахунків. Він має всі необхідні інструменти для підготовки і проведення повного циклу розрахунків.

Розрахунок класичної задачі осесиметричного нагріву стрижня [3]. Температура середовища на торцях постійна та дорівнює 80°C , в початковий момент часу вона дорівнювала кімнатній температурі (рис. 2).

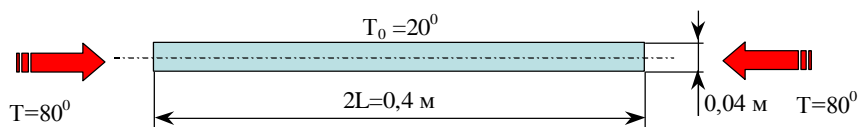


Рисунок 2. Розрахункова схема

Необхідні для розрахунку: граничні умови та властивості матеріалу стрижня наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Граничні умови та властивості матеріалу стрижня

Початкова температура $T_0, ^{\circ}\text{C}$	Температура нагріву $T, ^{\circ}\text{C}$	Модуль пружності $E, \text{МПа}$	Густина матеріалу $\rho, \text{кг/м}^3$	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Питома теплоємність $c, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$
20	80	2.25×10^5	7800	18,9569	2,4303718

Точний розв'язок з похибкою не більшою ніж на три десятих градуса поданий у табл. 2 для моментів часу $t = 1; 3; 5; 10; 20; 25$ с.

Таблиця 2

Точний аналітичний розв'язок

t, c \ L, m	0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20
1	74,7	39	23,5	20,3	20	20
3	76,9	53,7	36,4	26,4	22,1	21
5	77,6	59,2	43,8	33,0	26,8	24,9
10	78,4	65,5	54,1	45,2	39,6	37,7
20	79,1	72,0	65,7	60,7	57,5	56,4
25	79,3	74,1	69,3	65,6	63,2	62,4

Оскільки задача є симетричною, то достатньо розглянути одну з симетричних частин стержня, який розбивали на гексагональні скінченні елементи. З одного торця прикладали конвекційний потік на поверхні, та розраховували нестационарну задачу теплопровідності. Результатом розрахунку були температурні поля стержня в інтервалі часу від 0-ї до 25-тої секунди. На відстані 0,04, 0,08, 0,12, 0,16 та 0,2 м від дії джерела тепла визначали температуру у вузлах та будували графік розподілу температури по довжині стрижня в моменти часу 9.5 і 24.9 с., які були найбільш близькими до інтервалів часу з точним значенням температури (рис. 3).

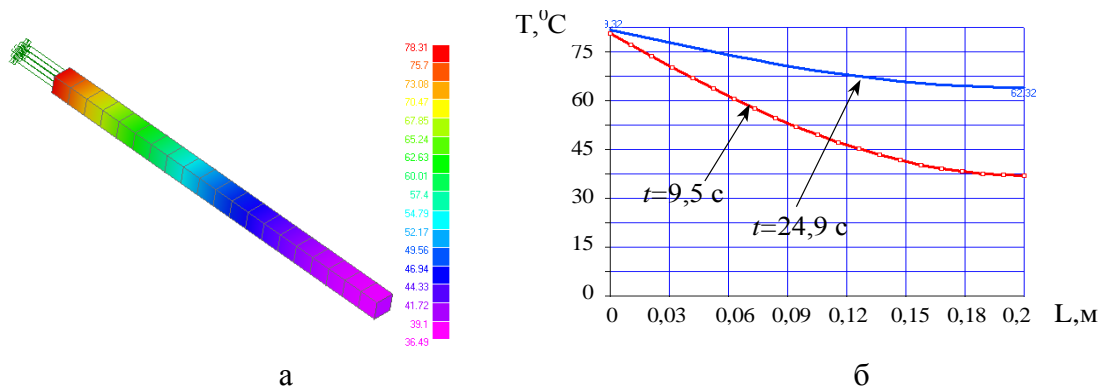


Рисунок 3. Скінченно елементна модель (а), та графік розподілу температур вдовж стрижня для різних інтервалів часу (б).

Розрахунок показав, що чисельний та аналітичний розв'язки співпадають.

Перелік посилань

1. Антонюк В.С., Сорока О.Б., Солових Є.К., Калініченко В.І. Аналітичні та числові методи проектування дискретних покриттів на інструментальних матеріалах. Математичні проблеми механіки неоднорідних структур. Львів, 2006. Т.1. 273 с.
2. Калініченко В.І. Панівко В.В. Расчетно-экспериментальный подход к прогнозированию напряженно-деформируемого состояния защитных покрытий. Людина і Космос: матер. Міжнар. конф. Дніпропетровськ, НЦАОМУ. 2005. С. 216.
3. Антонюк В.С., Возненко В.В., Калініченко В.І. Моделювання термосилових умов навантаження робочих поверхонь деталей та інструменту Приладобудування 2004: стан і перспективи: матер. III науково-технічної конференції. Київ, НТУУ «КПІ». 2004. С. 83-84.

УДК 621.791.927.5:669.018.25

Присяжнюк П.М., д.т.н., проф.; Коржов А.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

**ДЕФОРМАЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ НАПЛАВЛЕНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ
ВИСОКОМАРГАНЦЕВОЇ СТАЛІ, АРМОВАНОЇ КОМПЛЕКСНИМИ
КАРБИДАМИ, ЯК МЕХАНІЗМ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ В УМОВАХ
УДАРНО-АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ**

Анотація. Розглянуто механізм деформаційного зміцнення наплавленого покриття системи Fe–Ti–Nb–Mo–V–C в умовах ударно-абразивного навантаження. Показано, що комплексний твердий розчин зі структурою NaCl складу $(\text{Ti}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C}$ у матриці марганцевого аустеніту забезпечує поєднання дисперсійного та деформаційного зміцнення, що призводить до підвищення твердості від ~47 до ~57 HRC безпосередньо в процесі експлуатації. Визначено економічну ефективність відновлення роторів дробарок наплавленням порівняно з їх заміною в умовах відновлення інфраструктури України.

Ключові слова: наплавлення, карбідні фази, марганцевий аустеніт, деформаційне зміцнення, ударно-абразивне зношування, відновлення роторів.

Prysyazhnyuk P.M., Korzhov A.V.

**DEFORMATION HARDENING OF HARDFACED COATINGS BASED ON HIGH-
MANGANESE STEEL REINFORCED WITH COMPLEX CARBIDES AS A
MECHANISM OF WEAR RESISTANCE ENHANCEMENT UNDER IMPACT-
ABRASIVE CONDITIONS**

Abstract. The deformation hardening mechanism of Fe–Ti–Nb–Mo–V–C hardfaced coating under impact-abrasive loading is analyzed. The complex carbide solid solution $(\text{Ti}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C}$ with NaCl structure in manganese austenite matrix provides combined dispersion and deformation strengthening, increasing hardness from ~47 to ~57 HRC during service. The economic efficiency of crusher rotor restoration by hardfacing versus replacement is assessed in the context of Ukraine infrastructure reconstruction.

Keywords: hardfacing, carbide phases, manganese austenite, deformation hardening, impact-abrasive wear, rotor restoration.

Ключовою проблемою при виборі матеріалів для відновлення деталей дробарок є поєднання суперечливих вимог: висока твердість (абразивна стійкість) та достатня в'язкість (опір сколюванню при ударних навантаженнях). Традиційні хромисті наплавочні сплави забезпечують твердість 55–65 HRC, проте мають критично низьку ударну в'язкість [1]. Навпаки, наплавлення чистою сталлю Гадфільда (Г13) дає задовільну в'язкість, але недостатню початкову твердість (~20 HRC), яка підвищується лише за умов значного пластичного деформування [2].

Альтернативним підходом є формування композитного покриття з аустенітною матрицею, здатною до деформаційного зміцнення (TRIP/TWIP-ефекти), армованою дисперсними частинками твердих фаз. Такий підхід реалізований у сплаві системи Fe–Ti–Nb–Mo–V–C з позначенням 360G15M6B6T3C3F, де матрицею слугує марганцевий аустеніт ($\approx 15,5$ мас.% Mn), а зміцнювальною фазою – комплексний карбідний твердий розчин $(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Mo})\text{C}$ зі структурою NaCl [3].

Висока мікротвердість карбідних включень (>20 ГПа) при середньому розмірі ~3 мкм забезпечує ефективну протидію проникненню абразивних частинок за механізмом

дисперсійного зміцнення [4]. Водночас аустенітна матриця з вмістом Mn $\approx 15,5$ мас.% характеризується зниженою енергією дефектів пакування (ЕДП), що сприяє інтенсивному двійникуванню та $\gamma \rightarrow \epsilon$ мартенситному перетворенню при ударних навантаженнях.

На відміну від чистої сталі Гадфільда, де деформаційне зміцнення реалізується лише при достатньо високих контактних тисках (>300 МПа), наявність карбідних частинок у покритті 360G15M6B6T3C3F створює локальні концентратори напружень навколо включень. Це ініціює двійникування та мартенситне перетворення навіть при відносно помірних ударних навантаженнях, характерних для умов подрібнення піщано-гравійних сумішей.

Таким чином, синергія двох механізмів – дисперсійного зміцнення частинками $(\text{Ti}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C}$ та деформаційного зміцнення матриці – зумовлює підвищення твердості покриття від ~ 47 HRC у стані після наплавлення до ~ 57 HRC після робочого наклепу [3]. Це перевищує показники стандартних наплавочних сплавів на основі сталі Гадфільда приблизно на 10 HRC при збереженні задовільної в'язкості системи [5].

Практичне застосування наплавочного сплаву 360G15M6B6T3C3F було апробовано при відновленні роторів із сталі Гадфільда дробарки PULVOMATIC серії 1145 (Іспанія) в умовах подрібнення піщано-гравійних сумішей з початковим гранулометричним складом 25–150 мм у щєбінь фракції 5–20 мм при продуктивності ≈ 60 т/год [3].

Економічну доцільність відновлення роторів наплавленням порівняно з їх заміною пропонується оцінювати через питомі витрати на тону переробленого матеріалу:

$$C = (C_p + n \cdot C_n) / (n \cdot Q),$$

де C_p – вартість нового ротора (≈ 6000 євро); C_n – вартість одного відновлення наплавленням; n – кількість відновлень між заміною ротора; Q – ресурс ротора між відновленнями (тис. т переробленого матеріалу).

При ресурсі ротора до відновлення ~ 15 тис. т і можливості 3–4 відновлень, питомі витрати на переробку 1 т матеріалу знижуються у 2,5–3 рази порівняно з режимом повної заміни роторів. Цей ефект особливо актуальний в умовах відновлення інфраструктури України: попит на дроблені матеріали (щєбінь, гравій) суттєво зріс, тоді як логістика імпортованих запасних частин ускладнена [6].

Додатковою перевагою є можливість виконання відновлювальних робіт безпосередньо на місці експлуатації дробарки – у кар'єрі або на будівельному майданчику – без демонтажу та транспортування обладнання, що скорочує непродуктивні простой.

1. Деформаційне зміцнення покриття системи Fe–Ti–Nb–Mo–V–C в умовах ударно-абразивного навантаження обумовлене синергією дисперсійного зміцнення карбідними частинками $(\text{Ti}_{0.3}\text{Nb}_{0.3}\text{Mo}_{0.3})\text{C}$ та деформаційного зміцнення марганцевоаустенітної матриці за TRIP/TWIP-механізмами.

2. Підвищення твердості від ~ 47 HRC (після наплавлення) до ~ 57 HRC (після наклепу) є наслідком ініціювання двійникування та мартенситного перетворення локальними концентраторами напружень навколо карбідних включень, що робить процес зміцнення ефективнішим порівняно з нелегованою сталлю Гадфільда.

3. Застосування технології відновлення наплавленням сплавом 360G15M6B6T3C3F знижує питомі витрати на переробку будівельних матеріалів у 2,5–3 рази, що є особливо важливим в умовах відновлення інфраструктури України.

Перелік посилань

1. Ge S., Wang Q., Wang J. The impact wear-resistance enhancement mechanism of medium manganese steel and its applications in mining machines. *Wear*. 2017. Vol. 376–377, Part B. P. 1097–1104. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.015>
2. Varela L.B., Tressia G., Masoumi M. et al. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 122, art. no. 105295. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105295>
3. Prysyzhnyuk P., Bembenek M., Drach I. et al. Restoration of the Impact Crusher Rotor Using FCAW with High-Manganese Steel Reinforced by Complex Carbides. *Management Systems in Production Engineering*. 2024. Vol. 32, No. 2. P. 294–302. <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0028>
4. Bembenek M., Prysyzhnyuk P., Shihab T. et al. Microstructure and Wear Characterization of the Fe–Mo–B–C Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. *Materials*. 2022. Vol. 15, art. no. 5074. <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
5. Prysyzhnyuk P., Ivanov O., Matvienkiv O. et al. 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*. 2022. Vol. 36. P. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.014>
6. Prysyzhnyuk P., Molenda M., Romanyshyn T. et al. Development of a hardbanding material for drill pipes based on high-manganese steel reinforced with complex carbides. *Acta Montanistica Slovaca*. 2022. Vol. 27. P. 685–696. <https://doi.org/10.46544/AMS.v27i3.09>

УДК 669.295; 621.785.5

Олег Ткачук, к.т.н., ст. досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.; Ірина Погрелюк, д.т.н., проф.; Роман Проскурняк, к.т.н.; Христина Задорожна, к.т.н., ст. досл.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

ВПЛИВ ПАРЦІАЛЬНОГО ТИСКУ АЗОТУ НА ФОРМУВАННЯ НІТРИДНИХ ШАРІВ НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ VT6

Анотація. Вивчено вплив парціального тиску азоту на структурно-фазовий стан і морфологію поверхні титанового сплаву VT6, азотованого методом дифузійного насичення з контрольованого газового середовища.

Ключові слова: титановий сплав VT6, газове азотування, структурно-фазовий стан, морфологія поверхні.

Oleh Tkachuk, Mykhailo Student, Iryna Pohrelyuk, Roman Proskurnyak, Khrystyna Zadorozhna

INFLUENCE OF NITROGEN PARTIAL PRESSURE ON FORMATION OF NITRIDE LAYERS ON VT6 TITANIUM ALLOY

Abstract. The effect of nitrogen partial pressure on the phase-structural state and surface morphology of the VT6 titanium alloy nitrided by the method of diffusion saturation from a controlled gas environment was studied.

Keywords: VT6 titanium alloy, gas nitriding, phase-structural state, surface morphology.

Вступ. Титанові сплави завдяки високому співвідношенню міцності до ваги, корозійній стійкості та біосумісності мають широкий спектр застосування, включаючи авіа- та машинобудування, хімічну промисловість і біомедицину [1, 2]. Провідна роль титану в багатьох галузях промисловості також зумовлена великою кількістю можливостей для інженерії поверхні. Одним із перспективних методів інженерії поверхні титанових сплавів є формування нітридних шарів. Наразі існує багато методів інженерії поверхні, у тому числі дифузійний, плазмовий, іонно-плазмовий, детонаційний, лазерний, для підвищення твердості, корозійної тривкості та зносостійкості титанових сплавів [1, 2]. Дифузійне насичення з контрольованого газового середовища залишається перспективним методом інженерії поверхні титанових сплавів, оскільки дозволяє регулювати структурно-фазовий стан приповерхневих шарів і обробляти деталі довільної конфігурації (включаючи отвори) [2].

Метою даної роботи є дослідити вплив парціального тиску азоту на формування нітридних шарів на титановому сплаві VT6 методом дифузійного насичення з контрольованого газового середовища.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували зразки розміром $10 \times 15 \times 1$ мм з $(\alpha + \beta)$ -титанового сплаву VT6, які попередньо шліфували, полірували (до $Ra = 0,4$ мкм), промивали в ультразвуковій ванні та висушували.

Азотування проводили як в статичних умовах при атмосферному тиску газу (режим I), так і в розрідженій динамічній атмосфері азоту (режим II). Режим I – $T=850$ °C, $t=12$ год, $p_{N_2}=10^5$ Па; режим II – $T=850$ °C, $t=12$ год, $p_{N_2}=1$ Па, $I=7 \times 10^{-3}$ Па/с. До температури азотування зразки нагрівали у вакуумі 10 мПа. Після ізотермічної витримки їх охолоджували в азоті з піччю до 500 °C, після чого систему вакуумували. Використовували газоподібний азот технічної чистоти, що містив кисню не більше 0,4 об.% і парів води не більше 0,07 г/м³.

Фазовий склад поверхневих шарів після азотування визначали методом рентгенівського фазового аналізу на дифрактометрі ДРОН-3.0 ($\text{CuK}\alpha$ - випромінювання). Мікроструктуру азотованих шарів вивчали з використанням металографічного мікроскопа «Eriquant». Хімічний склад поверхневих шарів визначали за допомогою сканувального електронного мікроскопа EVO-40XVP з системою мікроаналізу INCA Energy 350.

Профілометрування здійснювали на профілометрі типу 170621. Мікротвердість поверхні та її розподіл по глибині визначали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М за навантаження 0,49 Н. Травлення шліфів здійснювали реактивом Кролла.

Результати досліджень та їх обговорення. В результаті газового азотування титанового сплаву ВТ6 формується азотований шар, до складу якого, згідно результатів рентгенівського фазового аналізу (рис. 1), входить нітридний та дифузійний шар (на базі твердого розчину азоту в α -титані). Нітридний шар складається з нітридів титану δ -TiN і ϵ -Ti₂N, вміст яких залежить від режиму азотування.

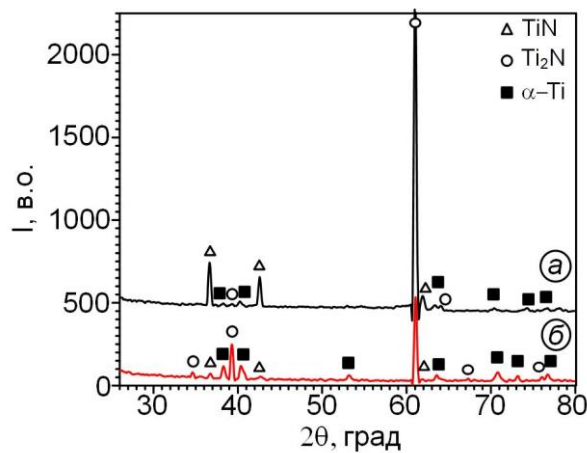


Рисунок 1. Дифракційні спектри титанового сплаву ВТ6 після режимів азотування I (а) і II (б).

Дослідження показали, що після азотування в азоті атмосферного тиску (режим I) вміст мононітриду TiN у нітридному шарі становить 67 %, тоді як в розрідженому азоті (режим II) – 4 %. Таким чином, в нітридному шарі I переважає фаза TiN. Натомість нітридний шар II, в основному, складається з фази Ti₂N, про що, окрім рентгенофазового, свідчить і мікрорентгеноспектральний аналіз (26,77 ат.% N, 73,23 ат.% Ti).

Присутність на дифрактограмах ліній α -титану зі збільшеними міжплощинними відстанями свідчить про формування дифузійного шару, що відокремлює нітридний шар від матриці сплаву. Після азотування за нижчого парціального тиску азоту період ґратки титану менший (табл. 1). Формування нітридного шару супроводжується мікроструктурними змінами, зокрема ростом кристалітів утворених фаз і релаксацією напружень. Розмір кристалітів кубічного нітриду титану δ -TiN і рівень напруженого стану зменшуються зі зниженням парціального тиску азоту (табл. 1).

Товщину дифузійного шару оцінювали за розподілом мікротвердості по перерізу приповерхневих шарів, а сам шар ідентифікували як зону, твердість якої на 0,2 ГПа перевищує твердість матриці сплаву (рис. 2), а також металографічно як поверхневу зону з нижчим ступенем травлення відносно матриці (рис. 3). Зниження парціального тиску азоту (перехід від режиму I до II) призводить до зменшення товщини нітридного шару від 7 до 3 мкм та збільшення товщини дифузійного шару від 70 до 90 мкм.

Таблиця 1. Параметри кристалічної ґратки фаз TiN, Ti₂N і α-Ti, розмір кристалітів і внутрішні напруження в нітриді TiN

Режим азотування	Параметр ґратки TiN, нм	Параметр ґратки Ti ₂ N, нм		Параметр ґратки α-Ti, нм		Розмір кристалітів, нм	Внутрішні напруження
		a	a	c	a		
I	0,42475	0,49575	0,30379	0,47110	0,29411	69,17	0,001539
II	0,42390	0,49523	0,30359	0,46995	0,29303	54,82	0,000408

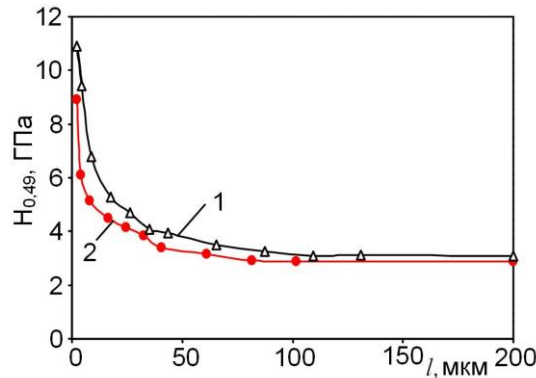


Рисунок 2. Розподіл мікротвердості по перерізу приповерхневих шарів титанового сплаву ВТ6 після режимів азотування I (1) і II (2).

Мононітрид титану TiN є фазою втілення, твердість якої визначається домінуючими орієнтаціями та властивостями атомних площин. Результати рентгеноструктурного аналізу свідчать про те, що у сформованому нітридному шарі нітридні фази мають превалюючі орієнтації. У дифракційному спектрі нітриду TiN домінують рефлекси (111) і (200). Фаза впорядковується в напрямку [111], що характерно для матеріалів з кубічною структурою. Збільшення парціального тиску азоту сприяє посиленню превалюючої орієнтації TiN в напрямку [111]. Так як міцність вздовж площини (200) більша, ніж вздовж (111), то ріст текстурованості в напрямку [200] дозволяє пояснити збільшення поверхневої твердості азотованого сплаву від 8,5 до 11,1 ГПа зі збільшенням парціального тиску азоту.

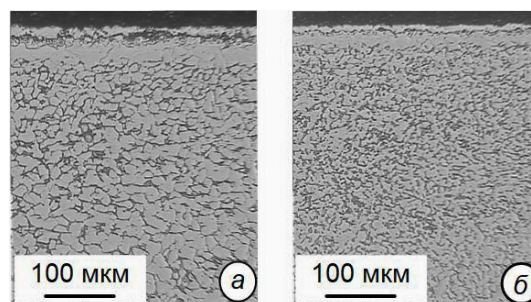


Рисунок 3. Поперечний переріз титанового сплаву ВТ6 після режимів азотування I (а) і II (б).

Аналіз інтенсивностей ліній Ti₂N свідчить про превалюючу орієнтацію ε-нітриду по площині [002]. Збільшення парціального тиску азоту суттєво підвищує текстурованість фази Ti₂N.

Азотування супроводжується формуванням характерного поверхневого рельєфу (рис. 4), що погіршує якість поверхні. Характерна топографія азотованої поверхні – це

хвилясті нерівності, що утворюють сітку на поверхні, яка, очевидно, повторює сітку границь зерен матриці азотованого матеріалу. Збільшення парціального тиску азоту сприяє укрупненню елементів рельєфу.

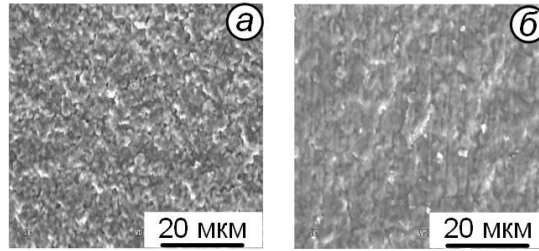


Рисунок 4. Морфологія поверхні титанового сплаву ВТ6 після режимів азотування I (а) і II (б).

Виникнення та ріст фрагментів рельєфу при азотуванні відображається на параметрах профілю поверхні, зміна яких проілюстрована в табл. 2. Зниження парціального тиску азоту сприяє зменшенню як висотних, так і крокових параметрів профілю поверхні. Таким чином, азотування у розрідженому азоті покращує якість поверхні сплаву на один квалітет.

Таблиця 2. Параметри профілю поверхні необробленого та азотованого титанового сплаву ВТ6

Параметри профілю поверхні	Стан поверхні		
	Необроблений	Нітридний шар I	Нітридний шар II
Ra, мкм	0,1251	0,4219	0,1842
Rz, мкм	0,5152	1,6615	0,7335
Rmax, мкм	0,8689	2,4665	0,9329
S, мкм	25,8684	28,7140	27,9133
Sm, мкм	36,5854	54,4962	32,8697

Висновки. Таким чином, розміри та якість азотованих шарів, сформованих на поверхні титанового сплаву ВТ6 визначаються парціальним тиском азоту при дифузійному насиченні з контрольованого газового середовища. Зокрема, на потовщення саме нітридного шару, в тому числі частки в ньому кубічного нітриду δ -TiN, впливає збільшення парціального тиску азоту від 1 до 10^5 Па.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2025.06/0028 за конкурсом «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України».

Перелік посилань

1. M. Correa Rossi, P. Akira Bazaglia Kuroda, L. Solano de Almeida, L. Sgarbi Rossino, C. Ramos Moreira Afonso, A detailed analysis of the structural, morphological characteristics and micro-abrasive wear behavior of nitrided layer produced in α (CP-Ti), $\alpha+\beta$ (Ti-6Al-4V), and β (TNZ33) type Ti alloys, Journal of Materials Research and Technology. 27 (2023) 2399–2412.
2. I.M. Pohrelyuk, S.E. Sheykin, S.M. Dub, A.G. Mamalis, I.Yu. Rostotskii, O.V. Tkachuk, S.M. Lavrys, Increasing of functionality of c.p. titanium/UHMWPE tribo-pairs by thermodiffusion nitriding of titanium component, Biotribology. 7 (2016) 38–45.

Секція: МЕХАТРОНІКА, РОБОТОТЕХНІКА, ДРОНИ

УДК 007.52:61

Андрій Горкуненко, к.т.н., доц.

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

РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ В МЕДИЦИНІ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Анотація. У роботі розглянуто сучасні роботизовані системи у медицині як перспективний напрям розвитку медичної інженерії, мехатроніки та штучного інтелекту. Проаналізовано основні компоненти медичних роботизованих платформ: мехатронні модулі, системи комп'ютерного зору, сенсорні підсистеми, алгоритми машинного навчання та системи керування. Наведено приклади застосування роботизованих систем у хірургії, діагностичній візуалізації, реабілітації та телемедицині. Особливу увагу приділено перспективам розвитку автономних та напівавтономних медичних роботів, а також питанням безпеки, етики та регуляторного контролю.

Ключові слова: медична робототехніка, роботизована хірургія, штучний інтелект, комп'ютерний зір, мехатроніка, телемедицина, медична інженерія.

Andrii Horkunenko, Ph.D., Assoc. Prof.

ROBOTIC SYSTEMS IN MEDICINE: CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Abstract. The paper considers modern robotic systems in medicine as a promising direction in the development of medical engineering, mechatronics, and artificial intelligence. The main components of medical robotic platforms are analyzed, including mechatronic modules, computer vision systems, sensing subsystems, machine learning algorithms, and control systems. Examples of the application of robotic systems in surgery, diagnostic imaging, rehabilitation, and telemedicine are presented. Particular attention is paid to the prospects for the development of autonomous and semi-autonomous medical robots, as well as to issues of safety, ethics, and regulatory control.

Keywords: medical robotics, robotic surgery, artificial intelligence, computer vision, mechatronics, telemedicine, medical engineering.

Сучасна медицина характеризується активним впровадженням цифрових технологій, систем штучного інтелекту та роботизованих платформ. Медична робототехніка сьогодні є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку інженерії та охорони здоров'я [1], оскільки дозволяє підвищити точність медичних маніпуляцій, зменшити ризик людських помилок і забезпечити новий рівень автоматизації клінічних процесів.

Роботизовані системи у медицині є кіберфізичними комплексами, що об'єднують механічні виконавчі пристрої, сенсорні модулі, комп'ютерний зір, системи керування та алгоритми штучного інтелекту. На відміну від традиційних промислових роботів, медичні роботи функціонують у середовищі з високими вимогами до безпеки, точності та адаптивності, оскільки працюють безпосередньо з пацієнтом.

Одним із найбільш відомих напрямів є роботизована хірургія. Сучасні хірургічні системи дозволяють виконувати високоточні малоінвазивні операції із використанням дистанційного керування маніпуляторами. Такі системи забезпечують масштабування рухів оператора, компенсацію фізіологічного тремору та покращену візуалізацію

операційного поля [1, 2]. Роботизована хірургія особливо активно застосовується в урології, кардіохірургії, нейрохірургії та гінекології.

Важливим компонентом сучасних роботизованих систем є комп'ютерний зір. Алгоритми аналізу медичних зображень використовуються для розпізнавання анатомічних структур, сегментації тканин, навігації інструментів та оцінювання стану пацієнта. Поєднання комп'ютерного зору з методами машинного навчання відкриває можливості для створення систем часткової автономії [1, 3], здатних виконувати окремі етапи медичних процедур під контролем лікаря.

Перспективним напрямом є роботизовані системи ультразвукової діагностики [3]. Такі системи можуть автоматично позиціонувати ультразвуковий датчик, аналізувати отримані зображення та допомагати у виявленні патологічних змін. Особливого значення роботизовані діагностичні системи набувають у телемедицині, де вони дозволяють проводити дистанційні обстеження пацієнтів.

Ще одним важливим напрямом є роботизовані реабілітаційні комплекси та екзоскелети. Вони застосовуються для відновлення рухових функцій у пацієнтів після інсультів, травм або неврологічних захворювань. Завдяки сенсорним системам та алгоритмам адаптивного керування роботизовані екзоскелети здатні підлаштовуватися під фізіологічні особливості пацієнта та забезпечувати персоналізовану терапію [2].

Подальший розвиток медичної робототехніки тісно пов'язаний із розвитком технологій штучного інтелекту. Використання нейронних мереж, алгоритмів глибокого навчання та систем підтримки прийняття рішень дозволяє підвищити ефективність аналізу медичних даних та автоматизувати окремі клінічні процеси. Водночас повна автономність медичних роботів поки що залишається обмеженою через складність біологічного середовища та високі вимоги до безпеки.

Окрему увагу необхідно приділяти етичним та регуляторним аспектам. Медичні роботизовані системи повинні відповідати вимогам безпеки, кіберзахисту, захисту персональних даних та принципам прозорості алгоритмів штучного інтелекту [4, 5]. Ключовим принципом залишається збереження контролю лікаря над клінічно значущими рішеннями.

Отже, роботизовані системи є одним із найважливіших напрямів розвитку сучасної медицини та медичної інженерії. Їх використання сприяє підвищенню точності діагностики, ефективності лікування та якості медичної допомоги. Перспективи розвитку медичної робототехніки пов'язані зі створенням систем керованої автономії, удосконаленням алгоритмів комп'ютерного зору, інтеграцією штучного інтелекту та розвитком телемедичних технологій.

Перелік посилань

1. Saeidi, H., Opfermann, J. D., Kam, M., Wei, S., Leonard, S., Hsieh, M. H., Kang, J. U., & Krieger, A. (2022). Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis. *Science Robotics*, 7(62), eabj2908.
2. Bergholz, M., Ferle, M., & Weber, B. M. (2023). The benefits of haptic feedback in robot assisted surgery and their moderators: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 13, 19215.
3. Su, K., Liu, J., Ren, X., Huo, Y., Du, G., Zhao, W., Wang, X., Liang, B., Li, D., & Liu, P. X. (2024). A fully autonomous robotic ultrasound system for thyroid scanning. *Nature Communications*, 15, 4004.
4. Vayena, E., & Blasimme, A. (2021). *Ethics and governance of artificial intelligence for health: WHO guidance*. Geneva: World Health Organization.
1. European Parliament and Council of the European Union. (2017). Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on medical devices. *Official Journal of the European Union*, L 117, 1–175.

УДК 621.01:534.1:621.928.3

Віталій Корендій, к.т.н., доц.; Олег Паращин; Тарас Вільчинський; Олександр Янів; Владислав Киричук

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ПЕРСПЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ ВІБРОЗБУДНИКІВ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Анотація. Розглянуто основні типи віброзбудників для вібраційного технологічного обладнання. Акцентовано на перспективних конструкціях із регульованими параметрами, багаточастотним збудженням та здатністю до синтезу керованої траєкторії руху робочого органа. Узагальнено переваги та обмеження їхнього застосування у ключових вібраційних технологічних процесах.

Ключові слова: віброзбудник, вібраційне технологічне обладнання, інерційний привід, електромагнітний привід, планетарний механізм, траєкторія коливань, самосинхронізація, параметричний синтез.

Vitaliy Korendiy, Ph.D., Assoc. Prof.; Oleh Parashchyn; Taras Vilchynskyi; Oleksandr Yaniv; Vladyslav Kyrychuk

ADVANCED DESIGNS OF VIBRATION EXCITERS FOR VIBRATORY TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Abstract. The main types of vibration exciters for vibratory technological equipment are considered. Emphasis is placed on promising designs featuring adjustable parameters, multi-frequency excitation, and the capability to synthesize controlled motion trajectories of the working member. The advantages and limitations of their application in key vibratory technological processes are summarized.

Keywords: vibration exciter, vibratory technological equipment, inertial drive, electromagnetic drive, planetary mechanism, oscillation trajectory, self-synchronization, parametric synthesis.

Вібраційне технологічне обладнання широко використовується у машинобудуванні, гірничій, будівельній, харчовій, фармацевтичній, аграрній та переробній промисловості для транспортування, дозування, сепарації, ущільнення, змішування, сортування, очищення та фінішної обробки матеріалів. Ефективність таких машин значною мірою визначається конструкцією віброзбудника, оскільки саме він формує силове або кінематичне збудження, що задає амплітудно-частотні характеристики, напрям дії збуджувальної сили та траєкторію руху робочого органа.

Традиційні конструкції віброзбудників найчастіше формують гармонічне або близьке до гармонічного збудження. Такий підхід є конструктивно простим, але не завжди забезпечує оптимальну взаємодію робочого органа з оброблюваним середовищем. Для різних технологічних процесів бажані різні режими руху: майже прямолінійні коливання доцільні для спрямованого транспортування; еліптичні траєкторії – для інтенсивного перемішування, сепарації та просіювання; кругові або складні замкнені траєкторії – для полірування, віброгалтування, ущільнення чи активації сипких середовищ. Тому сучасна проблема полягає не тільки у створенні збуджувальної сили необхідної величини, а й у цілеспрямованому формуванні траєкторії руху робочого органа.

Особливої актуальності набувають конструкції віброзбудників, які забезпечують регулювання амплітуди, частоти, фазового зсуву, напряму збудження та співвідношення гармонік без істотного ускладнення всієї машини. До таких рішень належать

регульовані дебалансні приводи, співвісні інерційні віброзбудники, планетарні механізми, самосинхронізовані багатодобалансні системи, електромагнітні приводи з незалежним керуванням коливаннями у різних координатах, а також кулачкові й кривошипно-повзунні механізми з наперед синтезованим законом руху.

У сучасних дослідженнях інерційні віброзбудники розглядаються як найпоширеніший тип приводів для вібраційних машин, що пояснюється їхньою конструктивною простотою, високою питомою потужністю та придатністю до використання у грохотах, віброживильниках, конвеєрах і ущільнювальних машинах. Водночас традиційні дебалансні системи мають низку обмежень: складність точного керування формою траєкторії, можливість появи паразитних кутових коливань, підвищені динамічні навантаження під час пуску й вибігу, а також чутливість до резонансних режимів. Огляд сучасних інерційних віброзбудників показує, що перспективними є планетарні, саморегульовані та багатоланкові схеми, здатні генерувати лінійні, еліптичні, кругові й складні замкнені траєкторії [1].

Окремий напрям становлять співвісні інерційні віброзбудники з двома механічно синхронізованими дебалансами. У таких конструкціях один електродвигун може приводити два незрівноважені ротори, а зміна співвідношення їхніх кутових швидкостей і фазового зсуву дає змогу формувати кругові, еліптичні або складні багаточастотні траєкторії робочого органа [2]. Перевагою такого підходу є примусова кінематична синхронізація дебалансів, що усуває проблеми, характерні для багатопровідних систем.

Планетарні віброзбудники є перспективними для вібраційного обладнання, у якому потрібно отримати складні траєкторії без застосування складних електронних систем керування. Завдяки поєднанню переносного та відносного обертання незрівноваженої маси планетарний механізм може генерувати не лише прості гармонічні збурення, але й багаточастотні режими з утворенням еліптичних, прямолінійних, кругових або гіпотрохоїдальних траєкторій [3]. Це відкриває можливості траєкторієорієнтованого синтезу, коли геометричні та кінематичні параметри механізму добираються відповідно до бажаного руху робочого органа.

Електромагнітні віброзбудники широко застосовуються у резонансних віброживильниках, дозаторах і транспортерах. Їхня перевага полягає у відсутності обертових дебалансів, компактності, високій керованості та можливості зміни режиму роботи через параметри електроживлення. Сучасні дослідження демонструють ефективність мікроконтролерного керування механічною частотою віброживильника шляхом модифікації синусоїдального сигналу живлення; при цьому досягнуто стабільну амплітуду коливань близько 1,5 мм і зміну витрати дозованого матеріалу в межах 0–100 г/с за частоти 1–50 Гц [4]. Інший перспективний напрям – незалежне електромагнітне збурення у горизонтальному та вертикальному напрямках, що дозволяє змінювати фазовий зсув між координатами й формувати прямолінійні або еліптичні траєкторії транспортуючого органа [5].

Питання самосинхронізації дебалансних віброзбудників залишається важливим для багатопровідних вібраційних машин. Праці останніх років показують можливість отримання бігармонічних прямолінійних коливань робочого органа за допомогою двох пар кінематично не зв'язаних дебалансних віброзбудників із кратними частотами обертання [6]. Такий підхід є перспективним для машин, де необхідне підсилення технологічного ефекту за рахунок багаточастотного збурення, але він потребує ретельного аналізу умов стійкості синхронних режимів.

Кулачкові віброзбудники становлять окремий клас механізмів, у яких закон руху робочого органа може бути заданий через профіль кулачка. Сучасні підходи до їх синтезу переходять від прямого аналізу заданого профілю до оберненої задачі:

спочатку задається бажана програма пришвидшення робочої маси, а потім визначається необхідний рух штовхача та профіль кулачка з урахуванням обмежень за кутом тиску, радіусом кривини і недопущенням підрізання [7]. Це робить кулачкові віброзбудники доцільними для машин, у яких потрібно реалізувати спеціальні негармонічні або близькі до віброударних режими.

За фізичним принципом формування збурення віброзбудники для технологічного обладнання доцільно поділити на механічні інерційні, кінематичні, електромагнітні, електрогідравлічні, пневматичні та комбіновані. Механічні інерційні віброзбудники створюють змінну збурювальну силу внаслідок обертання незрівноважених мас. Кінематичні віброзбудники, зокрема кривошипно-повзунні та кулачкові, безпосередньо задають переміщення, швидкість або пришвидшення виконавчої ланки. Електромагнітні приводи формують коливання за рахунок періодичної взаємодії електромагніта та якоря, а електрогідравлічні – через пульсацію тиску або витрати робочої рідини.



Рисунок 1. Загальна класифікація віброзбудників вібраційного технологічного обладнання

Інерційні віброзбудники у своєму базовому виконанні (одно- та дводебалансні системи) забезпечують генерування кругових, еліптичних або прямолінійних коливань. Розширення їхньої функціональності досягається за рахунок застосування регульованих конструкцій, що дозволяють безступінчасто змінювати амплітуду шляхом керування фазою дебалансів. Значний потенціал мають також співвісні механізми, здатні формувати складні траєкторії та двочастотні режими роботи від єдиного привода, що суттєво підвищує технологічні можливості обладнання.

Планетарні механізми збудження дозволяють формувати складні замкнені траєкторії руху робочого органа завдяки кінематичному накладанню переносного руху водила та відносного обертання сателіта з незрівноваженою масою. Така просторова кінематика створює умови для цілеспрямованої оптимізації динамічної взаємодії робочих поверхонь із сипким або в'язким середовищем, покращуючи процеси просіювання та ущільнення.

Кривошипно-повзунні віброзбудники відрізняються жорстким кінематичним зв'язком, що гарантує високу точність повторюваності переміщень і стабільність періодичного збурення. Це робить їх оптимальним вибором для вібропресувального обладнання та випробувальних стендів. Кулачкові механізми володіють найвищим потенціалом щодо синтезу наперед заданих негармонічних, зокрема віброударних, законів руху. Проте їхнє ширше практичне застосування лімітується високими контактними напруженнями та ризиком інтенсивного зношування робочих профілів.

Електромагнітні віброзбудники демонструють найвищу ефективність у резонансних системах малої та середньої потужності. Завдяки конструктивній простоті

механічної частини та можливостям високоточного електронного керування вони є базовим рішенням для дозувального та живильного обладнання.

Електрогідравлічні системи характеризуються значною силовою здатністю в діапазоні низьких частот збурення. Ця властивість робить їх практично безальтернативним рішенням для приводу важкого великогабаритного обладнання та потужних стендів, незважаючи на загальну складність конструкції та залежність ефективності від динамічних втрат і жорсткості рідини у гідромагістралях.

Проведений огляд показує, що розвиток віброзбудників для технологічного обладнання переходить від традиційного завдання створення періодичної збурювальної сили до задачі керованого формування траєкторії руху робочого органа. Такий підхід є особливо важливим для процесів транспортування, сепарації, просіювання, ущільнення, дозування, змішування та фінішної обробки, де технологічний ефект визначається не лише амплітудою і частотою, а й формою руху.

Найбільш поширеними залишаються інерційні дебалансні віброзбудники, однак їхні перспективні модифікації пов'язані з регулюванням фазового зсуву, застосуванням співвісних дебалансів, багаточастотним збуренням і кінематичною синхронізацією. Планетарні віброзбудники є особливо перспективними для траєкторієорієнтованого синтезу, оскільки дають змогу формувати складні замкнені траєкторії за рахунок раціонального добору геометричних і кінематичних параметрів. Електромагнітні віброзбудники доцільні для точного дозування та транспортування сипких матеріалів, особливо у резонансних системах із мікроконтролерним або фазовим керуванням. Кулачкові механізми мають переваги для реалізації спеціальних негармонічних законів руху, але потребують ретельної перевірки геометричних і контактних обмежень.

Перелік посилань

1. Korendiy V., Augousti A., Lanets O., Vilchynskiy T., Kyrychuk V., Yaniv O., Protasov R. Novel concepts and designs of inertial vibration exciters for industrial vibratory equipment: a review. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2024. Vol. 10, № 4. Pp. 17–33. URL: <https://doi.org/10.23939/ujmems2024.04.017>.
2. Gurskiy V., Korendiy V., Krot P., Zimroz R., Kachur O., Maherus N. On the dynamics of an enhanced coaxial inertial exciter for vibratory machines. *Machines*. 2023. Vol. 11, № 1. Article 97. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11010097>.
3. Korendiy V., Parashchyn O., Kachur O., Lozynskiy V., Hrevtsov S., Hembara N. Trajectory-oriented synthesis of a planetary-type vibration exciter for vibratory technological equipment. *Vibroengineering Procedia*. 2026. Vol. 61. Pp. 1–10. URL: <https://doi.org/10.21595/vp.2026.26348>.
4. Kavaliauskas Ž., Šajev I. Control of vibratory feeder device mechanical frequency using the modification of the sinusoidal supply voltage signal. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2024. Vol. 14, № 1. Article 15. URL: <https://doi.org/10.3390/jlpea14010015>.
5. Gurskiy V., Korendiy V., Krot P., Dyshev O. Determination of kinematic and dynamic characteristics of a reversible vibratory conveyor with an electromagnetic drive. *Vibroengineering Procedia*. 2024. Vol. 55. Pp. 138–144. URL: <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24403>.
6. Yaroshevich N., Zabrodets I., Yaroshevich T. Study of self-synchronization of unbalanced vibration exciters of a biharmonic vibration drive. *Vibroengineering Procedia*. 2025. URL: <https://www.extrica.com/article/25204>.
7. Korendiy V., Kyrychuk V., Svidrak I., Kotsiumbas O., Pelo R., Brytkovskiy V. Acceleration-driven cam profile synthesis for a cam-type vibration exciter with an elastically coupled oscillating mass. *Vibroengineering Procedia*. 2026. Vol. 61. Pp. 17–25. URL: <https://doi.org/10.21595/vp.2026.26147>.

УДК 621.01:629.3.042

**Віталій Корендій, к.т.н., доц.; Назарій Федунішин; В'ячеслав Пасіка, д.т.н., проф.;
Ігор Лаушник, к.т.н., доц.; Наталія Гембара, к.т.н., доц.**
Національний університет «Львівська політехніка», Україна

СИЛОВИЙ АНАЛІЗ ШАРНІРНО-ВАЖІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ОДНОРУЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРЬОМА ПЕДАЛЯМИ АВТОМОБІЛЯ

Анотація. Розглянуто квазістатичний силовий аналіз шарнірно-важільного механізму одnorучного керування педалями акселератора, гальма та зчеплення автомобіля. Визначено моменти опору педалей, осьові зусилля у тягах, узагальнені навантаження та силу руки водія. Встановлено, що найбільш навантаженою є гальмівна підсистема, а жорсткість центрувальних пружин істотно впливає на зусилля керування.

Ключові слова: адаптивне автомобільне обладнання, ручне керування, шарнірно-важільний механізм, педалі автомобіля, тяги-штовхачі, осьові зусилля, центрувальні пружини, ергономіка водія.

**Vitaliy Korendiy, Ph.D., Assoc. Prof.; Nazarii Fedunyshyn; Viacheslav Pasika, Sc.D.
Prof.; Ihor Laushnyk, Ph.D., Assoc. Prof.; Nataliia Hembara, Ph.D., Assoc. Prof.**

FORCE ANALYSIS OF A HINGE-LEVER MECHANISM FOR ONE-HANDED CONTROL OF THREE MOTOR-VEHICLE PEDALS

Abstract. A quasi-static force analysis of a hinge-lever mechanism for one-handed control of accelerator, brake, and clutch pedals is considered. Pedal resisting moments, axial rod forces, generalized loads, and driver-applied hand force are determined. The brake subsystem is shown to be the most loaded, while centering spring stiffness significantly affects the control effort.

Keywords: adaptive driving equipment, hand control, hinge-lever mechanism, vehicle pedals, push-pull rods, axial forces, centering springs, driver ergonomics.

Забезпечення доступності автомобільного транспорту для осіб з обмеженою рухливістю нижніх кінцівок є актуальною інженерною, ергономічною та соціальною проблемою. У стандартному автомобілі основні функції керування поздовжнім рухом реалізуються через педалі акселератора, гальма та, у разі механічної трансмісії, зчеплення. Для водіїв, які не можуть безпечно або з достатньою точністю керувати педалями ногами, необхідні адаптивні пристрої, що переносять функції керування з нижніх кінцівок на руку водія без зниження надійності та передбачуваності керування.

Більшість наявних пристроїв ручного керування орієнтована на автомобілі з автоматичною трансмісією і забезпечує керування лише двома педалями: акселератором та гальмом. Для автомобілів із механічною коробкою передач така схема є недостатньою, оскільки під час рушання з місця, перемикання передач і зупинки потрібно узгоджено керувати трьома педалями. У попередніх дослідженнях було обґрунтовано структуру багатоланкового шарнірно-важільного механізму, здатного забезпечити одnorучне керування педалями акселератора, гальма та зчеплення [1]. Проте кінематичне обґрунтування такої системи не дає відповіді на питання про реальні навантаження в її ланках, необхідне зусилля руки водія, силовий стан тяг, шарнірів, повзуна та напрямної.

Адаптивні системи керування транспортними засобами повинні забезпечувати повний хід відповідних органів керування, не перешкоджати роботі штатних педалей, мати достатню надійність повернення у нейтральне положення та відповідати вимогам доступності органів керування для водія [2, 3]. Додатково необхідно враховувати

ергономічні обмеження, зокрема допустимі рівні зусиль, що прикладаються водієм, досяжність рукоятки керування та однозначність ідентифікації функцій органів керування [3, 4]. Отже, запропонований механізм доцільно розглядати не лише як кінематичну структуру, а як силову передавальну систему, в якій опір педалей трансформується у зусилля руки водія та внутрішні навантаження ланок.

Метою роботи є розроблення узагальненої процедури силового аналізу шарнірно-важільного механізму одноручного керування трьома педалями автомобіля та оцінювання зусилля, яке необхідно прикласти водієві до рукоятки керування. Об'єктом дослідження є процес передавання сил у механічній системі, що з'єднує рукоятку керування з педалями акселератора, гальма та зчеплення. Предметом дослідження є залежності між моментами опору педалей, осьовими зусиллями у тягах-штовхачах, узагальненими навантаженнями та складовими сили руки водія.

Розрахункова схема механізму (рис. 1) містить керувальний важіль, повзун із рукояткою, три тяги-штовхачі та три педальні ланки. Педалі акселератора, гальма та зчеплення подано відповідно як ланки O_2A_2 , O_3A_3 та O_4A_4 , з'єднані з керувальною частиною механізму тягами A_2B_2 , A_3B_3 та A_4B_4 . З'єднання в точках O_i розглядаються як обертальні кінематичні пари, а з'єднання в точках A_i та B_i – як сферичні шарніри. Тяги в першому наближенні вважаються двосиловими елементами, тобто такими, що передають лише осьове розтягувальне або стискальне зусилля.

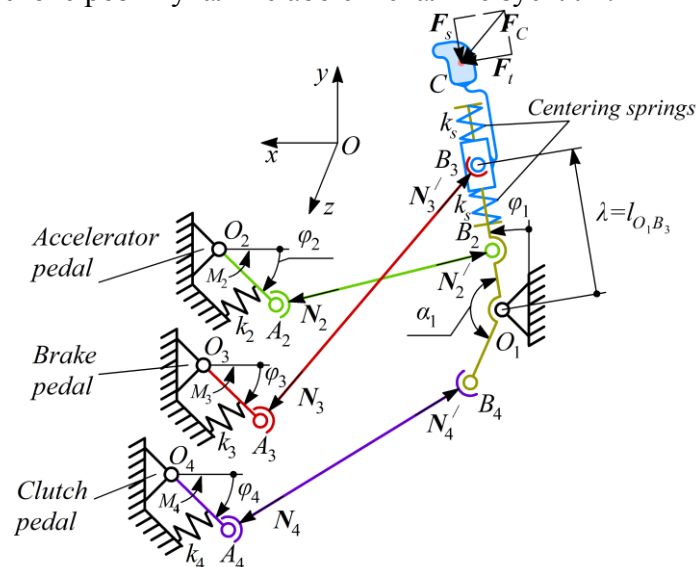


Рисунок 1. Розрахункова схема запропонованого механізму керування педалями автомобіля

Рух механізму описано двома узагальненими координатами: $q = [\varphi_1 \quad s]^T$, де φ_1 – кутове переміщення керувального важеля, а s – лінійне переміщення повзуна від нейтрального положення. Кут φ_1 переважно визначає узгоджене керування акселератором і зчепленням, тоді як переміщення повзуна s використовується для приводу гальмівної педалі. Такий поділ функцій дає змогу конструктивно розділити режим розгону або перемикання передач і режим гальмування.

Силовий аналіз виконано у квазістатичній постановці. Це припущення є прийнятним для попереднього інженерного оцінювання, оскільки ручне керування педалями відбувається з порівняно невеликими швидкостями, а інерційні сили ланок механізму є меншими порівняно із силами, зумовленими опором педалей, пружин, тертя та прикладеним зусиллям водія. У загальному випадку момент опору i -ї педалі можна

подати у вигляді: $M_i^{(r)} = M_{i0} + k_i(\varphi_i - \varphi_{i0}) + c_i\dot{\varphi}_i + M_{fi}\text{sgn}(\dot{\varphi}_i)$, де M_{i0} – початковий момент опору, k_i – еквівалентна кутова жорсткість педальної системи, c_i – коефіцієнт демпфування, M_{fi} – момент тертя. У статичному наближенні демпфувальний доданок може бути вилучений, а вплив тертя – врахований через початковий момент опору. Осьове зусилля у кожній тязі визначається з умови рівноваги відповідної педальної ланки відносно осі її обертання. Для i -ї тяги вводиться одиничний вектор її напрямку $\mathbf{e}_i = (\mathbf{r}_{B_i} - \mathbf{r}_{A_i}) / |\mathbf{r}_{B_i} - \mathbf{r}_{A_i}|$, а миттєве плече передавання сили визначається як $h_i = \mathbf{a}_i \cdot [(\mathbf{r}_{A_i} - \mathbf{r}_{O_i}) \times \mathbf{e}_i]$, де \mathbf{a}_i – одиничний вектор осі обертання відповідної педальної ланки. Тоді осьове зусилля у тязі наближено дорівнює $N_i = M_i^{(r)} / h_i$.

Ця залежність показує, що на навантаження тяги впливають як момент опору педалі, так і поточна геометрія механізму. Якщо плече h_i наближається до нуля, механізм переходить у невідне або майже сингулярне положення, що призводить до різкого зростання осьового зусилля. Тому під час проектування необхідно перевіряти зміну h_i у всьому робочому діапазоні.

Для визначення узагальнених навантажень використано принцип можливих переміщень. Вектор узагальнених сил механізму можна записати як $\mathbf{Q} = \mathbf{J}^T \mathbf{M}^{(r)} + \mathbf{Q}^{(h)} + \mathbf{Q}^{(f)}$, де \mathbf{J} – матриця Якобі, що пов'язує зміни кутів педалей із узагальненими координатами, $\mathbf{M}^{(r)}$ – вектор моментів опору педалей, $\mathbf{Q}^{(h)}$ – узагальнена дія центрувальних пружин повзуна, $\mathbf{Q}^{(f)}$ – узагальнені сили тертя. У першому наближенні тертя в шарнірах та напрямній може бути не виділене окремо, а враховане у номінальних характеристиках опору.

Зусилля руки водія у точці рукоятки розкладено на тангенціальну та осьову складові. Тангенціальна складова F_t відповідає повороту керувального важеля, а осьова складова F_s – переміщенню повзуна вздовж напрямної та приводу гальмівної педалі. Результирує зусилля визначається залежністю $F_C = \sqrt{F_t^2 + F_s^2}$.

Саме величина F_C є одним з основних показників ергономічної придатності механізму, оскільки вона безпосередньо характеризує навантаження на руку водія.

Числове моделювання виконано для номінального набору геометричних і силових параметрів. Кутове переміщення керувального важеля змінювалося в межах від -30° до $+30^\circ$, додатний хід гальмівного повзуна становив до 230 мм, нейтральна відстань між нерухомим шарніром O_1 і повзуном B_3 приймалася рівною 110 мм, а відстань між повзуном і точкою прикладання сили до рукоятки – 120 мм. Базова еквівалентна жорсткість центрувальних пружин становила 0,20 Н/мм. Характеристики опору педалей задано номінальними степеневими залежностями, що відтворюють якісну різницю між мало навантаженим акселератором, середньо навантаженим зчепленням і найбільш навантаженим гальмом.

Результати розрахунків показали, що момент опору педалі акселератора змінюється приблизно від 0,8 до 5,0 Н·м, момент опору педалі зчеплення – від 6,0 до 33,7 Н·м, а момент опору гальмівної педалі у режимі службового гальмування – від 8,0 до 69,0 Н·м. Для режиму екстреного гальмування момент опору може досягати приблизно 98,7 Н·м. Це підтверджує, що саме гальмівна підсистема є визначальною під час оцінювання максимального силового навантаження механізму.

Аналіз миттєвих плечей передавання сили засвідчив відсутність майже сингулярних положень у прийнятому робочому діапазоні. Для акселераторної ланки плече h_2 змінювалося приблизно в межах 100,1–146,0 мм, для гальмівної ланки h_3 – у межах 221,1–274,8 мм, а для ланки зчеплення h_4 – у межах 94,6–169,2 мм. Отже, запропонована конфігурація забезпечує достатньо стабільне передавання сили.

Осьове зусилля у тязі акселератора A_2B_2 було найменшим і становило приблизно 8,0–34,0 Н. Тяга зчеплення A_4B_4 навантажувалася суттєво більше: її осьове зусилля досягало приблизно 199,2 Н. Найбільше навантаження зафіксовано у гальмівній тязі A_3B_3 , де осьове зусилля зростало приблизно від 36,2 до 251,3 Н. Таким чином, гальмівна тяга, повзун, напрямна та відповідні сферичні шарніри повинні проектуватися з найбільшим запасом міцності.

Узагальнений момент, необхідний для повороту керувального важеля, змінювався від 9,2 до 16,4 Н·м. Відповідна тангенціальна складова сили руки водія становила приблизно 40,0–71,4 Н, що свідчить про прийнятний рівень зусилля під час узгодженого керування акселератором і зчепленням. Водночас режим гальмування виявився значно вимогливішим: узагальнена сила переміщення повзуна та осьова складова сили руки досягали приблизно 231,7 Н за базової жорсткості центрувальних пружин 0,20 Н/мм. Результуюче зусилля руки водія у цьому випадку становило близько 235,1 Н.

Отримані результати показують, що запропонований шарнірно-важільний механізм може забезпечити передавання керувальних дій від руки водія до трьох педаль автомобіля. Найменш навантаженою є підсистема акселератора, яка переважно визначає плавність і чутливість керування подачею палива або потужністю. Підсистема зчеплення характеризується підвищеними навантаженнями через більший момент опору та менші значення миттєвого плеча передавання сили. Найбільш критичною є гальмівна підсистема, оскільки саме вона формує максимальні осьові зусилля у тязі, найбільшу узагальнену силу повзуна та найбільше результуюче зусилля руки водія.

Практичне значення запропонованого підходу полягає в тому, що він дає змогу ще на стадії проектування визначити найбільш навантажені елементи механізму, обґрунтувати параметри тяг, шарнірів, повзуна, напрямної та центрувальних пружин. Подальше вдосконалення механізму доцільно виконувати за двома основними критеріями: мінімізація максимального зусилля руки водія та недопущення невідповідних силових конфігурацій. Для цього слід оптимізувати довжину рукоятки, координати точок кріплення тяг, довжини педальних важелів і жорсткість пружин повернення.

Перелік посилань

1. Korendiy V., Fedunyshyn N., Kozub V. Justifying the structure of the improved mechanism for manual control of motor vehicles' pedals. *Transport Technologies*. 2024. Vol. 5, No. 2. P. 75–87. DOI: <https://doi.org/10.23939/tt2024.02.075>.
2. FIA Disability and Accessibility Commission. *Vehicle adaptation guidelines*. FIA, 2023. URL: https://api.fia.com/sites/default/files/maj2023_daa_guidelines_a4_v4_web.pdf (дата звернення: 26.04.2026).
3. SAE International. *Driver hand control reach: SAE Standard J287_202211*. SAE International, 2022. URL: https://www.sae.org/standards/j287_202211-driver-hand-control-reach (дата звернення: 26.02.2026).
4. ISO 2575:2021. *Road vehicles – Symbols for controls, indicators and tell-tales*. Geneva: International Organization for Standardization, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/68409.html> (дата звернення: 26.02.2026).
5. Mortimer R. G. Foot brake pedal force capability of drivers. *Ergonomics*. 1974. Vol. 17, No. 4. P. 509–513. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140137408931381>.

УДК 539.3

Артур Микитишин; Ігор Коноваленко, канд. техн. наук, доц.; Павло Марущак, докт. техн. наук, проф.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ СТАЛЕВОЇ ПЛАСТИНИ НА ОСНОВІ МЕРЕЖІ YOLO26

Робота присвячена розробленню та експериментальній перевірці моделі автоматичного виявлення дефектів металевих листів на основі архітектури YOLO26 для потреб швидкого промислового контролю якості. Дослідження проведено на наборі з 1350 кадрованих зображень, що містять три класи пошкоджень: подряпини (scratch), лінії (line) та потертості (attrition). Оцінювання моделі показало високу узагальнювальну здатність із метриками $mAP50=0.820$ та $F1=0.778$, причому найвища точність досягнута для класу потертостей, тоді як основний масив помилок припадає на слабконтрастні подряпини. Встановлено, що мережа YOLO26 є перспективною для точного розпізнавання дефектів, проте потребує подальшого вдосконалення алгоритмів локалізації ушкоджень екстремальної форми в умовах реального виробництва.

Ключові слова: виявлення об'єктів, розпізнавання в реальному часі, глибока нейронна мережа, дефекти.

Artur Mykytyshyn; Ihor Konovalenko, PhD, Assoc. prof.; Pavlo Maruschak, DSc, Prof. METHODOLOGY AND RESULTS OF DETECTION OF STEEL PLATE DEFECTS BASED ON THE YOLO26 NETWORK

This paper presents the development and experimental validation of an automated metal sheet defect detection model based on the YOLO26 architecture for rapid industrial quality control. The study utilizes a dataset of 1,350 cropped images encompassing three types of surface damage: scratches, lines, and attrition. The model demonstrated strong generalization, achieving $mAP50=0.820$ and $F1=0.778$, with the highest precision observed for the attrition class and most errors associated with low-contrast scratches. While YOLO26 proves highly effective and accurate for defect recognition, further improvements are required to localize extreme-shaped defects under varying industrial conditions accurately.

Keywords: object detection, real-time recognition, deep neural network, defects.

Автоматизація контролю якості металевих листів є важливою складовою сучасного цифрового виробництва, оскільки навіть незначні поверхневі пошкодження можуть призводити до зниження міцності, корозійної стійкості та якості готової продукції. Ручний візуальний контроль залишається дорогим, суб'єктивним та погано масштабованим, особливо в умовах великого потоку матеріалу та високих вимог до повторюваності рішень. Тому застосування методів комп'ютерного зору та глибокого навчання для промислової інспекції є актуальним і відповідає сучасним тенденціям розвитку інтелектуальних виробничих систем [1,2].

Технологічні дефекти на поверхні металопрокату успішно виявляються за допомогою оптико-цифрових систем і розпізнаються за допомогою згорткових нейронних мереж. Моделі сімейства YOLO належать до класу одноетапних методів виявлення об'єктів, що вирізняються високою швидкістю та точністю. Зображення з камер надходить на вхід мережі YOLO, де воно розбивається на сітку розміром $S \times S$. Якщо геометричний центр об'єкта потрапляє у певну комірку, вона генерує обмежувальну рамку для визначення його просторового положення та класу. Наразі

відомо значну кількість оригінальних технічних рішень на основі архітектури YOLO [3,4]. Зокрема, широкого застосування набула модель YOLOv8, яка вирізняється вдосконаленими стратегіями навчання. Це забезпечує значне підвищення точності та універсальності порівняно з попередніми версіями YOLOv1–YOLOv7.

Модель YOLOv8 набула поширення завдяки наявності Python API, сумісності з платформами TensorRT, CoreML та ONNX, а також завдяки варіативності масштабних модифікацій, що забезпечують оптимальний баланс між швидкістю та точністю залежно від завдань інференсу. Архітектури YOLOv9, 10 та 11 були розроблені послідовно, причому кожна наступна ітерація вдосконалювала базову архітектуру та підвищувала загальну продуктивність. Зокрема, у YOLOv9 інтегровано архітектуру GELAN (Generalized Efficient Layer Aggregation Network) та метод прогресивної дистиляції, що забезпечили поєднання обчислювальної ефективності з вищою репрезентативною здатністю мережі. Модель YOLOv10 відзначається оптимізованим співвідношенням точності та часу затримки завдяки гібридній стратегії призначення міток (label assignment), узгодженій із конкретними завданнями. YOLO11 продовжила розвиток концепції Ultralytics, забезпечивши вищу ефективність утилізації ресурсів графічних процесорів (GPU), що дозволило досягти високої продуктивності навіть під час обробки зображень із значною кількістю дрібних об'єктів.

Наступні версії, YOLOv12 та YOLOv13, є вдосконаленими архітектурами, орієнтованими на максимізацію точності на різноманітних наборах даних. Попри високі метрики якості, ці моделі значною мірою залежать від алгоритму придушення немаксимумів (NMS) та використання розподілу фокальних втрат (Distribution Focal Loss, DFL). Саме обмеження, пов'язані з постобробкою на базі NMS та складністю обчислення функцій втрат, стали передумовою для створення YOLO26 — моделі наступного покоління, оптимізованої для периферійних обчислень (edge computing). Слід також зазначити, що попередні версії зберігали вразливість до таких проблем, як втрата просторових ознак, а також наявність хибнопозитивних (false positives) та хибнонегативних (false negatives) результатів під час виявлення дрібних дефектів на складному фоні. Це суттєво ускладнювало одночасне задоволення вимог щодо роботи в режимі реального часу та високої точності. Для подолання зазначених недоліків у цьому дослідженні для аналізу дефектів металопрокату застосовано архітектуру YOLO26.

Метою роботи є розроблення та експериментальна перевірка моделі автоматичного виявлення дефектів металевих листів на основі архітектури YOLO26 для задачі швидкого промислового контролю якості поверхні. Для досягнення поставленої мети сформовано придатний для навчання набір даних дефектів, забезпечено коректну локалізацію пошкоджень на зображеннях металевої поверхні, класифіковано виявлені області за типом дефекту та оцінено баланс між швидкістю і точністю детекції. Також досліджено поведінку моделі на малих локальних фрагментах поверхні, де контраст дефектів може бути низьким, а форма ушкодження неоднорідною.

Для вирішення завдання розпізнавання дефектів використано модель YOLO26 середнього розміру (Medium), реалізовану на базі фреймворку Ultralytics та адаптовану до задачі детекції виробничих дефектів. Початковий набір даних було сформовано зі структурованих RGB-зображень та сегментаційних масок для трьох класів дефектів: scratch (подряпини), line (лінії) та attrition (потертості). Для проведення експерименту було створено набір даних із фрагментів розміром 256×256 пікселів. У результаті кадрування загалом сформовано 1350 зображень, які було розподілено на підвибірки для навчання, валідації та тестування. Кількісні характеристики набору даних наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Структура набору даних, використаного для навчання та тестування

Split	К-сть зображень	К-сть об'єктів	scratch	line	attrition
train	1012	1616	435	565	616
val	202	303	100	71	132
test	136	242	68	76	98

Для підвищення узагальнювальної здатності застосовано лише геометричні аугментації, релевантні до промислового контролю: дискретні повороти на 90° та горизонтальні/вертикальні віддзеркалення з імовірністю 0,5.

Модель навчали протягом 250 епох. Оцінювання на незалежній тестовій вибірці показало хорошу узагальнювальну здатність моделі: $mAP50=0.820$, $precision=0.775$, $recall=0.781$, $F1=0.778$. Приклад результату розпізнавання моделі на кількох зображеннях тестової вибірки показано на рис. 1.

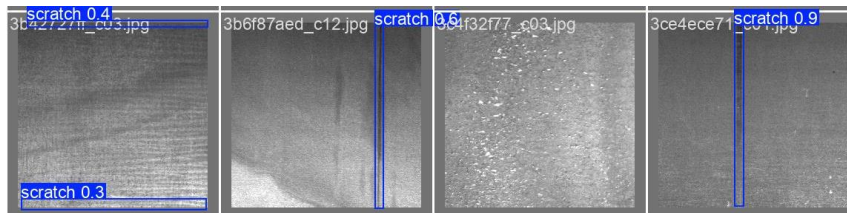


Рисунок 1. Приклад візуалізації прогнозу моделі

Аналіз матриці помилок і покласових тестових метрик показує домінування правильно класифікованих випадків по головній діагоналі та відсутність суттєвого міжкласового змішування. Основний внесок у помилки робить не плутанина між класами, а пропуски частини дефектів і залишкові false positive, насамперед для класу scratch. Для класу дефектів line модель демонструє найбільш збалансовану поведінку ($precision=recall=0.829$), тоді як клас attrition має найвищу $precision=0.911$. Це вказує, що подальше покращення моделі варто фокусувати на складних тонких і слабконтрастних scratch-дефектах.

Перелік посилань

1. Chen J., Liu Z., Wang H., Núñez A., Han Z. (2021). Surface Defect Detection Methods for Industrial Products: A Review. Applied Sciences, 11(16), 7657. <https://doi.org/10.3390/app11167657>
2. Akhyar F., Kama N., Ismail M.H., Ndzi D., Ahmad N. (2023). FDD-a deep learning-based steel defect detector. Neural Computing and Applications, 35, 12167-12188. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08455-1>
3. Chen C., Lee, H. & Chen, M. Steel surface defect detection method based on improved YOLOv9, Sci Rep., 2025, 15, 25098, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10647-1>
4. Liao L., Song C., Wu S., Fu J. A novel YOLOv10-based algorithm for accurate steel surface defect detection, Sensors, 2025, 25, 769. <https://doi.org/10.3390/s25030769>
5. CN121788531A Industrial surface defect detection methods and systems, Han Zhike; Wang Xing; Shao Jiayu; Fan Yexin, 2026-04-03 (in Chinese).

УДК 621.865

Roman Mykhailyshyn¹ Ph.D.; Floris Erich¹ Ph.D.; Frantisek Duchon² Ph.D., Prof.; Ivan Virgala³ Ph.D., Prof.; Michal Kelemen³ Ph.D., Prof.; Jing Xiao⁴ Ph.D., Prof.; Ann Majewicz Fey⁵ Ph.D., Prof.; Kensuke Harada⁶ Ph.D., Prof.; Yukiyasu Domaе¹ Ph.D.

¹National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Japan

²Slovak University of Technology in Bratislava, Slovak Republic

³Kosice University of Technology, Slovak Republic

⁴Worcester Polytechnic Institute, United States of America

⁵The University of Texas at Austin, United States of America

⁶The University of Osaka, Japan

VIBRATIONS OF DEFORMABLE OBJECTS WITH DIFFERENT GRASPING METHODS

Abstract: The impact of object vibrations on the capabilities of robot grasping systems is very significant. The process of vibration generation from the method of grasping, even with the same gripping device, will be very different. Therefore, the need to analyze such processes in automated robotic cells creates a gap for further research to overcome vibration or use it for useful purposes.

Keywords: robotics, manipulation, grasping, deformable objects, vibration

Роман Михайлишин¹ канд. техн. наук; Флоріс Еріх¹ канд. техн. наук; Франтішек Духон² канд. техн. наук, проф.; Іван Віргала³ канд. техн. наук, проф.; Міхал Келемен³ канд. техн. наук, проф.; Джін Сяо⁴ канд. техн. наук, проф.; Енн Масвич Фей⁵ канд. техн. наук, проф.; Кенсукє Харада⁶ канд. техн. наук, проф.; Яукіясу Домае¹ канд. техн. наук

¹Національний інститут передової промислової науки і технологій, Японія

²Словацький технологічний університет в Братиславі, Словацька Республіка

³Технологічний університет в Кошице, Словацька Республіка

⁴Вустерський політехнічний інститут, Сполучені Штати Америки

⁵Техаський університет в Остіні, Сполучені Штати Америки

⁶Університет Осаки, Японія

ВІБРАЦІЇ ДЕФОРМІВНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ РІЗНИХ МЕТОДАХ ЗАХОПЛЕННЯ

Анотація: Вплив вібрацій об'єкта на можливості захоплювальних систем роботів є дуже суттєвим. Процес утворення вібрацій залежно від методу захоплення навіть за того самого захоплювального пристрою буде дуже сильно відрізнятися. Тому необхідність в аналізі таких процесів в автоматизованих робототехнічних комірках створює зазор для подальших досліджень для подолання вібрації або її використання в корисних цілях.

Ключові слова: робототехніка, маніпулювання, захоплення, гнучкі об'єкти, вібрації

The use of any gripping device causes vibrations, regardless of whether it is a mechanical gripper [1-2], magnetic [3], pneumatic [4] or any other [5]. When interacting with an object, we disrupt the stability of the system and carry out various types of force interactions, which, depending on the interaction method, can extinguish these vibrations. Of all the possible objects used in robotic cells, the most difficult to stabilize vibrations is for deformable objects. In addition, there are many local pneumatic grippers that, having grasped the object, continue to cause additional vibrations of deformable objects (Fig. 1a) [6-7]. If we add the use of local pneumatic grippers to the difficult-to-control deformable objects, we get a complex

task that will lead to uncertainty and minimize the success of the pick and place operation in a robotic cell.

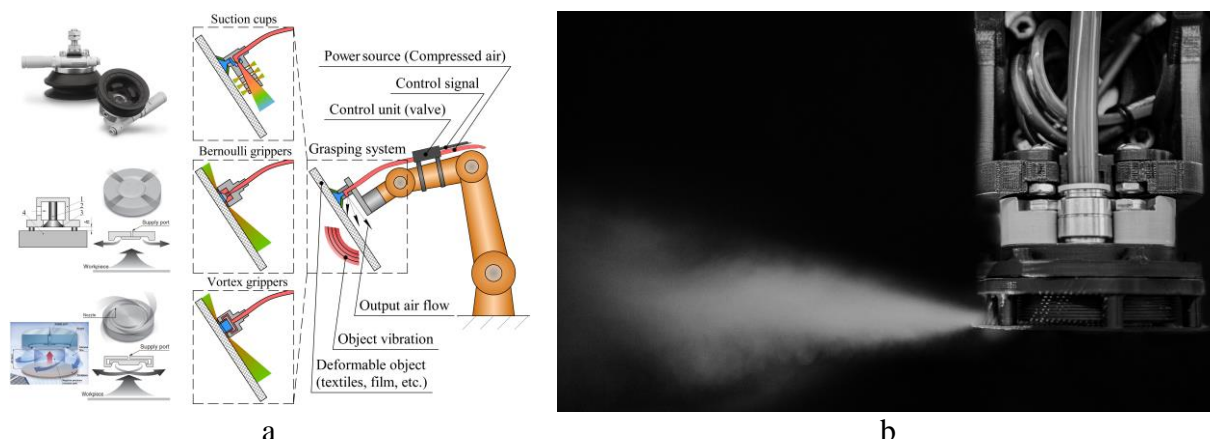


Fig. 1. Causes of local vibrations due to gripping devices: (a) diagram of the connection of local pneumatic grippers to the robot and the direction of the air causing the vibrations [6]; (b) experimental demonstration of air flow with smoke generated by a Bernoulli gripper [7].

One of the most suitable examples for demonstrating the problem of vibration of deformable objects is jet grippers [8-10] in which, unlike classical vacuum grippers, air is released to the outside [11-19], which leads to vibration of deformable objects. We have demonstrated the flow of air with smoke that forms an improved Bernoulli gripper for textile material grasping (Fig. 1b) [7].

Thanks to the successful work on the methods of numerical modeling of a pneumatic gripper for textile materials [20], and the implementation of the methodology for automated research of gripping devices with textile materials [21], it was possible to conduct a study of the influence of the parameters of the gripping system on the force characteristics. This allows us to state the need to minimize vibrations to ensure maximum gripping force. However, in addition to increasing the gripping force, the method of manipulation after grasping remained an important factor [22], which causes the interaction of air flows with deformable objects. By optimizing the trajectory parameters, we achieved a significant reduction in the required holding force for robotic pick and place operations [23]. Therefore, the task of studying the influence of air flows during gripping is in the future. For this purpose, two gripping schemes have been developed (Fig. 2), with a deformable object hanging from one side, and with a uniform object hanging from two.

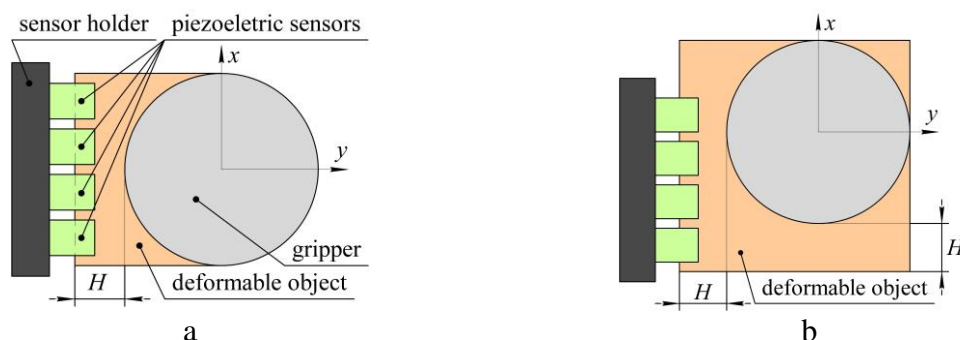


Fig. 2. Scheme of measuring vibrations of a deformable object when grasping by various methods: (a) when a deformable object hangs from one side; (b) when a deformable object hangs from both sides evenly.

By measuring the average vibration rate with four piezoelectric sensors, we found the vibrations of the deformable object for different lengths of the object hanging outside the gripper (Fig. 3).

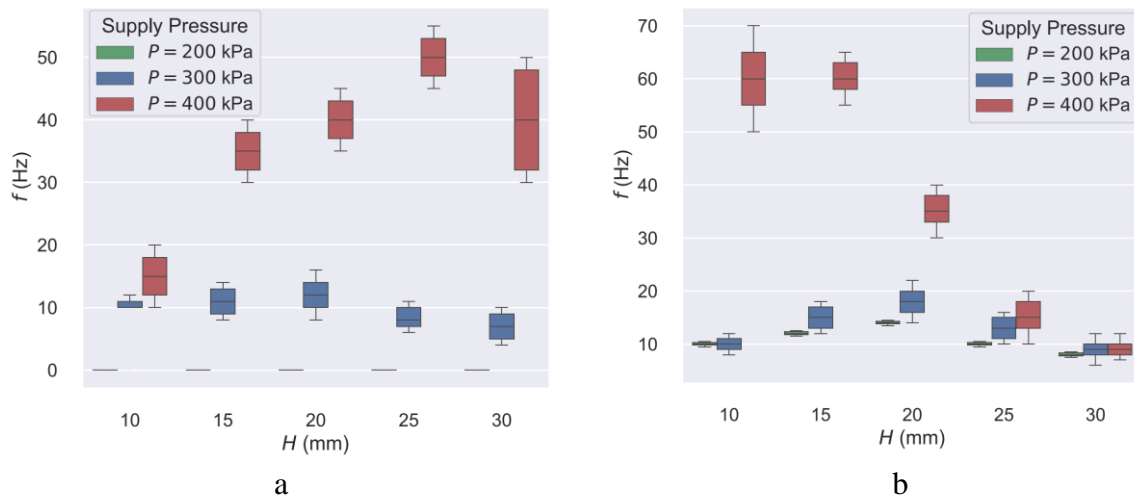


Fig. 3. Results of vibration measurements when grasping deformable objects while changing the length of the hanging material for: (a) one side; (b) both sides evenly.

The obtained vibration data demonstrate the dependence of the supply pressure, the area of interaction with the object and the mass of the hanging deformable object. At low supply pressure parameters (200 kPa) for the conventional one-end variant, there are no vibrations, and for hanging from two ends, there is a small vibration. This is due to the fact that when grasping a deformable object from two sides, the area of interaction of the air flow with the object doubles and allows the object to oscillate. It is obvious that for the conventional one-side, the area was not enough to start oscillations. In addition, the expected vibration trend is visible for a supply pressure of 300 kPa, that with an increase in the length of the conventional H, the object first increases oscillations and after reaching the critical mass and area (at H = 20 mm) it decreases vibrations. On the other hand, at a supply pressure of 400 kPa and a deformable object from one side, we see a consistent increase in object vibrations with a peak of H = 25 mm. And for hanging from two sides (400 kPa) vibrations are gradually reduced due to a significant increase in the mass of the deformable object that oscillates. Thanks to the reengineering of the previously proposed gripper for textile objects [6], it was possible to completely remove the vibration and provide an increase in the lifting and holding force.

References

1. Hinwood, D., Herath, D., & Goecke, R. (2020, August). Towards the design of a human-inspired gripper for textile manipulation. In 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (pp. 913-920). IEEE.
2. Donaire, S., Borrás, J., Alenya, G., & Torras, C. (2020). A versatile gripper for cloth manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 6520-6527.
3. Ebraheem, Y., Drean, E., & Adolphe, D. C. (2021). Universal gripper for fabrics—design, validation and integration. *Int. Journal of Clothing Science and Technology*, 33(4), 643-663.
4. Mykhailyshyn, R., Savkiv, V., Maruschak, P., & Xiao, J. (2022). A systematic review on pneumatic gripping devices for industrial robots. *Transport*, 37(3), 201-231.
5. Borrás, J., Alenya, G., & Torras, C. (2020). A grasping-centered analysis for cloth manipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(3), 924-936.
6. Mykhailyshyn, R., Romancik, J., Harada, K., & Fey, A. M. (2025, August). Vibration

- Vanquished: Enhancing Grasping of Deformable Objects with Jet Gripper Technology. In 2025 *IEEE 21st Int. Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 2874-2880). IEEE.
7. Mykhailyshyn, R., Savkiv, V., Fey, A. M., & Xiao, J. (2022). Gripping device for textile materials. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 20(4), 2397-2408.
 8. Mykhailyshyn, R., & Xiao, J. (2022). Influence of inlet parameters on power characteristics of Bernoulli gripping devices for industrial robots. *Applied Sciences*, 12(14), 7074.
 9. Mykhailyshyn, R., Duchoň, F., Mykhailyshyn, M., & Majewicz Fey, A. (2022). Three-dimensional printing of cylindrical nozzle elements of bernoulli gripping devices for industrial robots. *Robotics*, 11(6), 140.
 10. Kumar, V., Fontul, M., Neves, C., & Coelho, P. J. (2025). Prototyping and characterisation of gripper technologies for stiff fabric material. *IEEE Access*.
 11. Mykhailyshyn, R., Duchoň, F., Virgala, I., Sinčák, P. J., & Majewicz Fey, A. (2023). Optimization of outer diameter bernoulli gripper with cylindrical nozzle. *Machines*, 11(6), 667.
 12. Li, X., Li, N., Tao, G., Liu, H., & Kagawa, T. (2015). Experimental comparison of Bernoulli gripper and vortex gripper. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(10), 2081-2090.
 13. Shi, K., & Li, X. (2018). Experimental and theoretical study of dynamic characteristics of Bernoulli gripper. *Precision Engineering*, 52, 323-331.
 14. Dini, G., Fantoni, G., & Failli, F. (2009). Grasping leather plies by Bernoulli grippers. *CIRP annals*, 58(1), 21-24.
 15. Mykhailyshyn, R., & Fey, A. M. (2024, June). Low-contact grasping of soft tissue using a novel vortex gripper. In 2024 *Int. Symposium on Medical Robotics (ISMR)* (pp. 1-6). IEEE.
 16. Petterson, A., Ohlsson, T., Caldwell, D. G., Davis, S., Gray, J. O., & Dodd, T. J. (2010). A Bernoulli principle gripper for handling of planar and 3D (food) products. *Industrial Robot: An International Journal*, 37(6), 518-526.
 17. Liu, D., Liang, W., Zhu, H., Teo, C. S., & Tan, K. K. (2017, July). Development of a distributed Bernoulli gripper for ultra-thin wafer handling. In 2017 *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (pp. 265-270). IEEE.
 18. Mykhailyshyn, R., Savkiv, V., Boyko, I., Prada, E., & Virgala, I. (2021). Substantiation of parameters of friction elements of Bernoulli grippers with a cylindrical nozzle. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME)*, 11(2), 17-39.
 19. Liu, D., Wang, M., Fang, N., Cong, M., & Du, Y. (2020). Design and tests of a non-contact Bernoulli gripper for rough-surfaced and fragile objects gripping. *Assembly Automation*, 40(5), 735-743.
 20. Mykhailyshyn, R., Fey, A. M., & Xiao, J. (2023). Finite element modeling of grasping porous materials in robotics cells. *Robotica*, 41(11), 3485-3500.
 21. Alkis, T., Fey, A. M., & Mykhailyshyn, R. (2026, January). Robotic Integration of Pneumatic Grasping Systems for Deformable Textile Handling: Automated Characterization Approach. In 2026 *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)* (pp. 213-218). IEEE.
 22. Mykhailyshyn, R., Fey, A. M., & Xiao, J. (2023). Toward Novel Grasping of Nonrigid Materials Through Robotic End-Effector Reorientation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*.
 23. Mykhailyshyn, R., Lee, J., Mykhailyshyn, M., Harada, K., & Fey, A. M. (2025). Dexterous manipulation of deformable objects via pneumatic gripping: Lifting by one end. *arXiv preprint arXiv:2501.05198*.

УДК 621.86

Володимир Савків к.т.н., доц.; Ігор Федорів; Соломія Федорів

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

БЕЗКОНТАКТНЕ ЗАХОПЛЕННЯ У РОБОТОТЕХНІЦІ

Розглянуто класифікацію безконтактних захоплювальних пристроїв для робототехнічних систем, орієнтованих на роботу з делікатними, крихкими, тонкими, стерильними, мікророзмірними та функціонально чутливими об'єктами. Узагальнено підходи до пневматичних систем на основі ефекту Бернуллі, ежекції та вихрового потоку, магнітних та електродинамічних систем, електростатичної левітації, акустичних систем на основі стоячих хвиль, ближнього акустичного поля та однопроменевого акустичного захоплення, а також оптичних пасток.

Ключові слова: захоплення, транспортування, робототехніка, ефект Бернуллі, левітація

Savkiv Volodymyr, Fedoriv Ihor, Fedoriv Solomiia

CONTACTLESS GRIPPING IN ROBOTICS

This article presents a classification of non-contact gripping devices for robotic systems designed to handle delicate, fragile, thin, sterile, micro-sized, and functionally sensitive objects. It summarizes approaches to pneumatic systems based on the Bernoulli effect, ejection, and vortex flow; magnetic and electrodynamic systems; electrostatic levitation; acoustic systems based on standing waves, the near-field acoustic field, and single-beam acoustic grasping; as well as optical traps.

Keywords: capture, transport, robotics, Bernoulli effect, levitation

1. Проблематика контактного захоплення

Перехід сучасних галузей промисловості (зокрема мікроскладання, фармацевтичного пакування, виробництва напівпровідників, біотехнологічного дозування та високочистих лабораторних процесів) до роботи з функціонально чутливими виробами зробив проблему фізичного контакту між виконавчим органом робота та об'єктом маніпулювання визначальною. Для делікатних, тонких, крихких, стерильних та мікророзмірних об'єктів традиційний механічний дотик становить серйозну загрозу.

Насамперед, для тонких пластин, полімерних плівок, оптичних компонентів, дрібних порошкових агломератів або крихких біоматеріалів механічний контакт означає високий ризик появи подряпин та локальних деформацій. Більше того, фізичний обтиск неминуче призводить до появи небажаних адгезійних сил, нестабільності під час відриву деталі від захоплювача, перенесення забруднень, виникнення залишкових напружень, втрати геометричної точності та, як наслідок, до значного зростання рівня виробничого браку.

2. Сутність рішення: Безконтактне маніпулювання

Для уникнення цих проблем впроваджують безконтактні системи, які дозволяють левітувати об'єкти поруч із робочим органом робота, не торкаючись його. Принципова перевага цього підходу полягає в тому, що об'єкт не піддається стисканню, не зазнає концентрованого механічного навантаження та не контактує із забруднювачами. Для цього використовують різні фізичні явища. Основні типи таких систем:

- Пневматичні системи (працюють за рахунок потоків повітря);
- Магнітні системи (використовують силу магнітного поля);
- Електростатичні системи (працюють завдяки статичній електриці);

- Акустичні системи (утримують деталі за допомогою звукових хвиль);
- Оптичні системи (використовують тиск лазерного променя).

3. Детальний огляд безконтактних рішень

3.1. Пневматичні системи

Пневматичні захоплювачі (що функціонують на основі ефекту Бернуллі, ежекції та вихрових потоків) на сьогодні є найбільш зрілим сегментом безконтактних технологій для промислового середовища.

Принцип дії: У пристроях Бернуллі стиснене повітря прискорюється в тонкому зазорі між корпусом захоплювача та деталлю; зростання швидкості спричиняє зниження статичного тиску, що і створює підйомну силу. Вихрові системи утворюють область зниженого тиску поблизу центру завдяки тангенціально закрученому повітряному потоку. Ежекційні схеми покладаються на струминний потік, що захоплює навколишнє повітря та формує локальне розрідження [1].

Особливості рішення: Ці системи одночасно створюють підйомну силу та газову подушку, що дозволяє утримувати деталь без механічного дотику та частково самоцентрувати її [1, 2]. Вони ідеально вирішують проблему маніпулювання тонкими, крихкими, пористими або текстурованими об'єктами, такими як кремнієві пластини, сонячні панелі, тонке скло, друковані плати та гнучкі плівки. Пневматика забезпечує високу продуктивність ліній та делікатне поводження з плоскими виробами.

3.2. Магнітні та електродинамічні системи

Цей клас рішень базується на взаємодії магнітного поля зі струмопровідним або магнітосприйнятливим елементом [3].

Принцип дії: На відміну від пневматики, тут сили передаються виключно через магнітне поле, що означає повну відсутність як механічного тертя, так і повітряного тиску.

Особливості рішення: Відсутність потоків газу та механічного зносу робить магнітну левітацію ідеальною для чистих виробництв. Технологія забезпечує високодинамічний двовимірний транспорт з багатьма ступенями свободи та мікрометровою точністю позиціонування. Вона найчастіше застосовується у вигляді спеціальних транспортних платформ (planar motor systems), де деталі переміщуються на пасивних магнітних носіях над поверхнею, яка складається із множини котушок [3].

3.3. Електростатична левітація

Цей спеціалізований метод формує підйомну дію електричним полем у (подібно до того, як натерта повітряна кулька притягує волосся) і стабілізує об'єкт шляхом активного керування напругою на електродах [4].

Особливості рішення: Головна цінність електростатичної левітації полягає в можливості безконтактної обробки матеріалів. Вона дозволяє нагрівати та досліджувати малі зразки (1–3 мм) у вакуумі без ризику паразитного забруднення чи гетерогенного зародкоутворення, що неминуче при використанні традиційних контейнерів. Технологія є незамінною для високотемпературного матеріалознавства, проте має обмеження щодо промислових масштабів.

3.4. Акустичні системи

Акустичні левітатори та захоплювачі використовують для утримання об'єктів акустичні випромінювання [4].

Принцип дії та види: Існує три основних підвиди цього методу. Системи стоячої хвилі (Standing Wave) утримують дрібні деталі у вузлах хвильового поля у вільному просторі між динаміком і відбивачем. Левітація ближнього акустичного поля (NFAL) створює підйомну силу завдяки високому тиску в мікроскопічному зазорі між вібруючою поверхнею та планарним об'єктом. Однопроменеве захоплення маніпулює деталями за допомогою одного сфокусованого пучка без використання відбивача [5].

Особливості рішення: Акустичні системи найменш вимогливі до матеріалу об'єкта, хоча й чутливі до його геометрії. Близьке поле чудово зарекомендувало себе як транспортер для легких плоских деталей, підкладок та листових виробів. Інші акустичні методи дозволяють без механічного контакту утримувати, обертати та переміщувати краплі, мікрочастинки та біологічно чутливі об'єкти в чистих зонах.

3.5. Оптичні пастки

Оптичні пастки (пінцети) використовують градієнт інтенсивності сфокусованого лазерного променя та тиск випромінювання [6].

Особливості рішення: Це еталонний інструмент для надзвичайно точної маніпуляції на мікро- та нанорівні. Оптичні системи забезпечують просторове переміщення без жодної механічної інерції інструмента. Вони відіграють ключову роль у лабораторних дослідженнях (біофізика, спектроскопія, мікрофлюїдика), проте їх впровадження у масове виробництво принципово обмежується небезпекою локального нагрівання та фотопошкодження матеріалів при збільшенні потужності для підняття важчих об'єктів. [6]

4. Висновки щодо вибору технології

Вибір конкретного рішення жорстко диктується виробничою задачею. Якщо ключовим пріоритетом є висока продуктивність конвеєра та делікатне перенесення листових чи крихких виробів, перевагу слід віддати пневматичним схемам. Для гнучкої внутрішньомашинної логістики, високоточного транспорту та мікрометрового позиціонування найбільш ефективною є магнітна левітація. Якщо критичною вимогою є абсолютна хімічна чистота процесу при високих температурах, застосовують електростатичну безконтейнерну левітацію. Коли ж виникає потреба маніпулювати міліметровими деталями, краплями рідини, біологічними клітинами чи мікрооб'єктами в просторі, оптимальним рішенням стають акустичні або високоточні оптичні інструменти.

Перелік посилань

1. Mykhailyshyn R., Savkiv V., Maruschak P., Xiao J. A systematic review on pneumatic gripping devices for industrial robots. *Transport*. 2022. Vol. 37, No. 3. P. 201–231. DOI: 10.3846/transport.
2. Brun X., Melkote S. N. Effect of substrate flexibility on the pressure distribution and lifting force generated by a Bernoulli gripper. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2012. Vol. 134, No. 5. Article 051010. DOI: 10.1115/1.4007186.2022.17110.
3. Beckhoff Automation. XPlanar | Planar motor system. Official product page. Available at: <https://www.beckhoff.com/en-en/products/motion/xplanar-planar-motor-system/> Accessed: 15.04.2026.
4. Hyers R. W., Rogers J. R. A review of electrostatic levitation for materials research. *High Temperature Materials and Processes*. 2008. Vol. 27, No. 6. P. 461–474. DOI: 10.1515/HTMP.2008.27.6.461.
5. Vandaele V., Lambert P., Delchambre A. Non contact handling in microassembly: acoustical levitation. *Precision Engineering*. 2005. Vol. 29, No. 4. P. 491–505. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2005.03.003.
6. Ashkin A., Dziedzic J. M., Bjorkholm J. E., Chu S. Observation of a single beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics Letters*. 1986. Vol. 11, No. 5. P. 288–290. DOI: 10.1364/OL.11.000288.

УДК 62-52:631.22

Віталій Яропуд, д.т.н., доцент

Вінницький національний аграрний університет, Україна

АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ ПРИМІЩЕНЬ АПК З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Анотація. Запропоновано алгоритм функціонування мехатронної системи забезпечення мікроклімату приміщень АПК, який базується на інтеграції вентиляційних підсистем та теплообмінних модулів. Встановлено залежності витрат повітря, теплових параметрів та енергоспоживання. За результатами моделювання підтверджено зниження енерговитрат до 28,6 % порівняно з класичною системою.

Ключові слова: мехатронна система, мікроклімат, вентиляція, теплообмін, енергоефективність.

Vitalii Yaropud

ALGORITHM FOR THE OPERATION OF A MECHATRONIC SYSTEM FOR MICROCLIMATE CONTROL IN AGRICULTURAL FACILITIES WITH CONSIDERATION OF ENERGY EFFICIENCY

Abstract. The algorithm of a mechatronic microclimate control system is developed. Dependencies of airflow, temperature and energy consumption are obtained. Energy savings up to 28.6% are confirmed.

Keywords: mechatronic system, microclimate, ventilation, heat exchange, energy efficiency.

Постановка проблеми. Забезпечення стабільного мікроклімату в приміщеннях АПК потребує комплексного підходу до керування вентиляційними та теплообмінними процесами. Традиційні системи характеризуються високими енерговитратами та низькою адаптивністю до змін зовнішніх умов.

Мета дослідження. Розробка алгоритму функціонування мехатронної системи забезпечення мікроклімату з урахуванням параметрів повітряного середовища та енергоспоживання.

Основний матеріал. Визначення параметрів функціонування мехатронної системи забезпечення мікроклімату базується на розрахунку необхідного обсягу вентиляції та енергетичних характеристик повітряного потоку [1]. Годинний обсяг вентиляції, необхідний для підтримання допустимого рівня концентрації вуглекислого газу, визначається за залежністю:

$$O_{CO_2} = \frac{E}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2},$$

де E – інтенсивність виділення газу тваринами; ε_1 , ε_2 – допустима та початкова концентрації газу.

Сумарні витрати повітря формуються як функція режимів роботи вентиляційних каналів та ступеня відкриття керуючих заслінок, що дає змогу адаптивно змінювати інтенсивність повітрообміну залежно від стану мікроклімату [2, 3].

Тепловий стан повітря після проходження теплообмінних елементів визначається за емпірично встановленими залежностями. Зокрема, температура повітря після ґрунтового теплообмінника визначається виразом:

$$T_G = T_{in} \pm \Delta T_{aU} = T_{in} \pm (7,82 - 0,00956 Q_{in} - 0,427 T_{in} + 0,000105 Q_{in} T_{in} + 0,0184 T_{in}^2),$$

що враховує витрати повітря та температуру на вході.

Енергетичні витрати системи визначаються сумарною потужністю вентиляційних і теплообмінних підсистем, що дозволяє оцінити ефективність її функціонування в різних режимах роботи.

Алгоритм функціонування системи передбачає послідовне визначення режиму вентиляції, керування положенням заслінок, регулювання роботи теплообмінників та адаптацію параметрів до змін зовнішніх кліматичних умов [2]. Блок-схема алгоритму наведена на рис. 1.

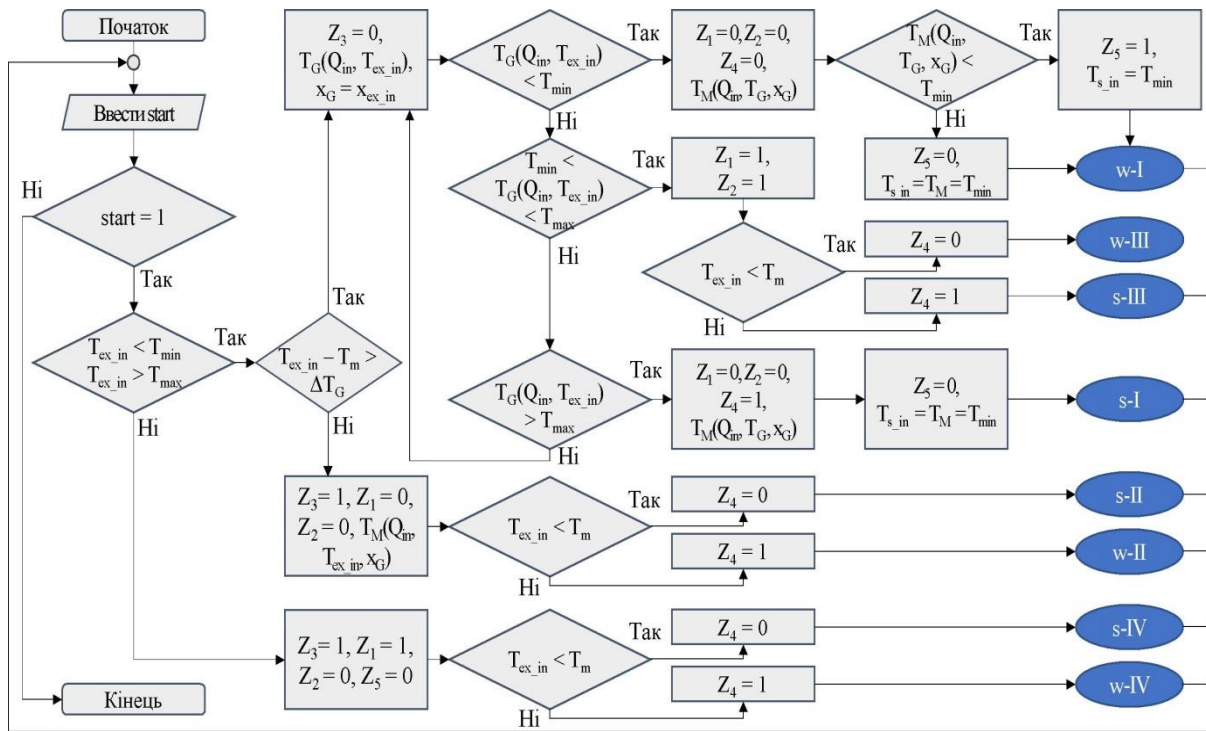


Рисунок 1. Блок-схема алгоритму функціонування мехатронної системи

Результати досліджень. За результатами проведеного чисельного моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що розроблена мехатронна система забезпечення мікроклімату дозволяє досягти стабілізації температурного режиму в зоні перебування тварин у межах 18–22 °С, що повністю відповідає зоотехнічним вимогам. При цьому забезпечується адаптація параметрів системи до змін температури зовнішнього середовища за рахунок узгодженої роботи вентиляційних підсистем та теплообмінних модулів.

Аналіз аеродинамічної структури повітряного потоку в приміщенні показав, що застосування розробленої системи сприяє формуванню рівномірного поля швидкостей у робочій зоні, при якому швидкість повітря не перевищує 0,5 м/с, що виключає виникнення локальних зон застою або надмірної турбулізації повітряного середовища, що позитивно впливає на умови утримання тварин та ефективність тепло- і масообміну.

Отримані результати моделювання температурних полів та швидкісних характеристик повітряного потоку (рис. 2) підтверджують ефективність запропонованої конструктивно-технологічної схеми системи (рис. 3) з точки зору забезпечення рівномірності розподілу параметрів мікроклімату по об'єму приміщення.

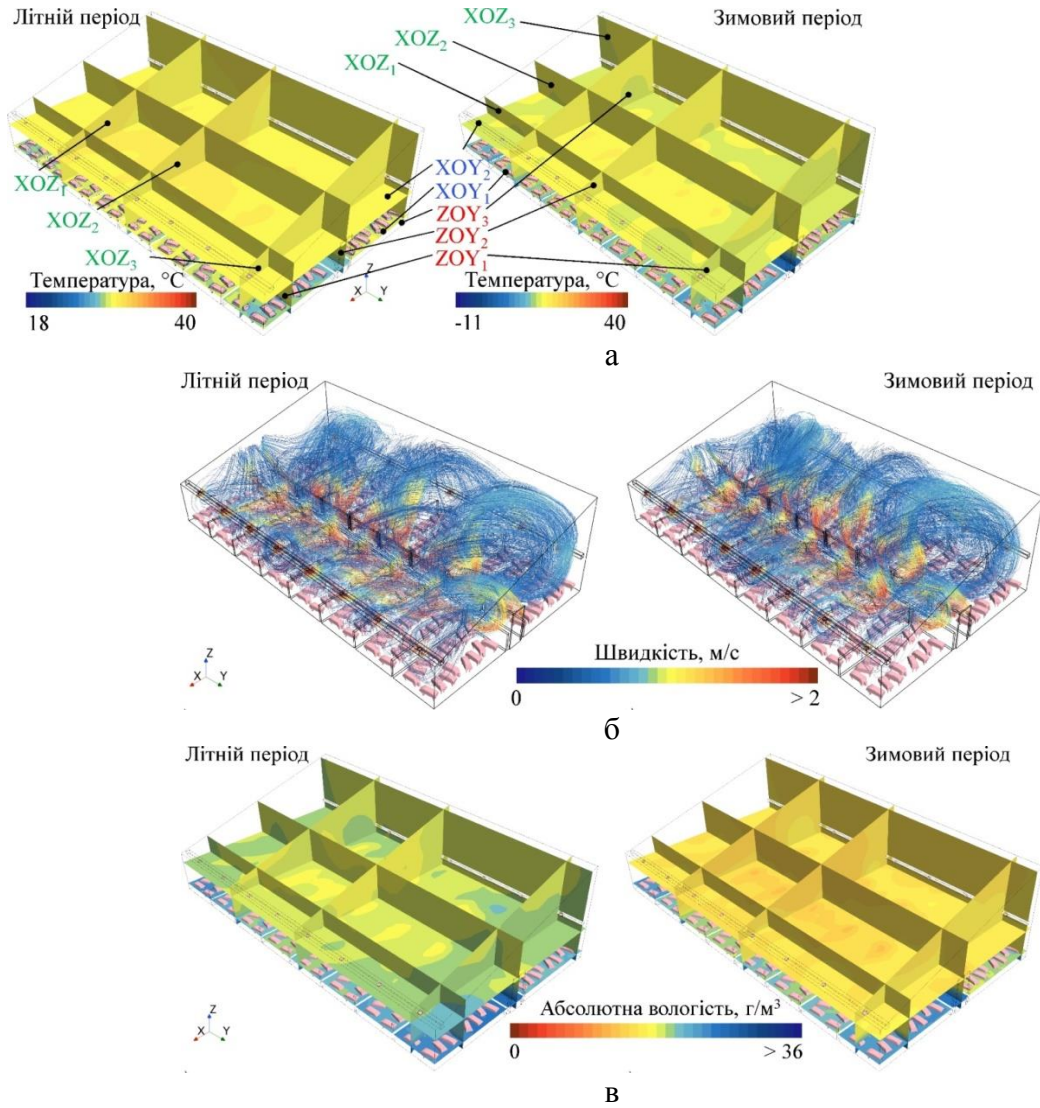


Рисунок 2. Розподіли температури (а), лінії потоку повітря (б) і тиску (в) у приміщеннях АПК із розробленою системою забезпечення мікроклімату

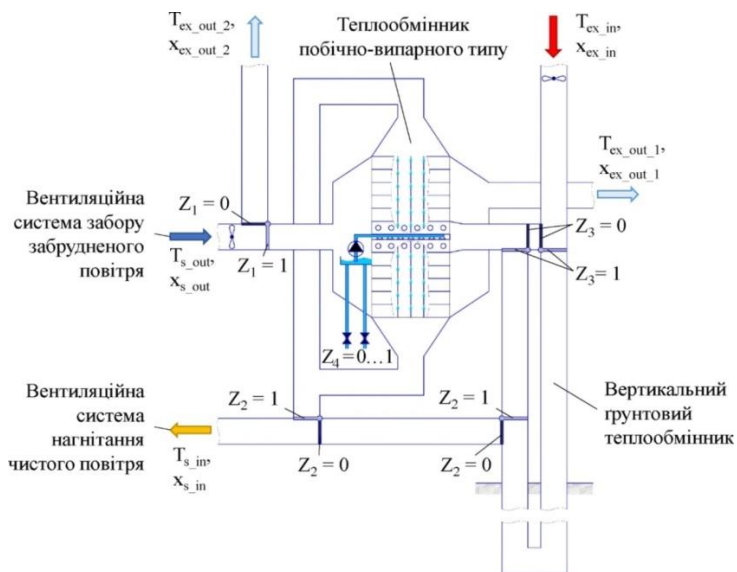


Рисунок 3. Технологічна схема мехатронної системи забезпечення мікроклімату приміщень АПК

Дослідження енергетичних показників функціонування системи засвідчили, що використання запропонованого алгоритму керування та інтеграції теплообмінних елементів дозволяє суттєво знизити сумарні енерговитрати. Зокрема, за результатами порівняння з класичною системою вентиляції та кондиціонування встановлено зменшення споживаної потужності на 28,6 %, що підтверджується відповідними залежностями, наведеними на рис. 4 [2].

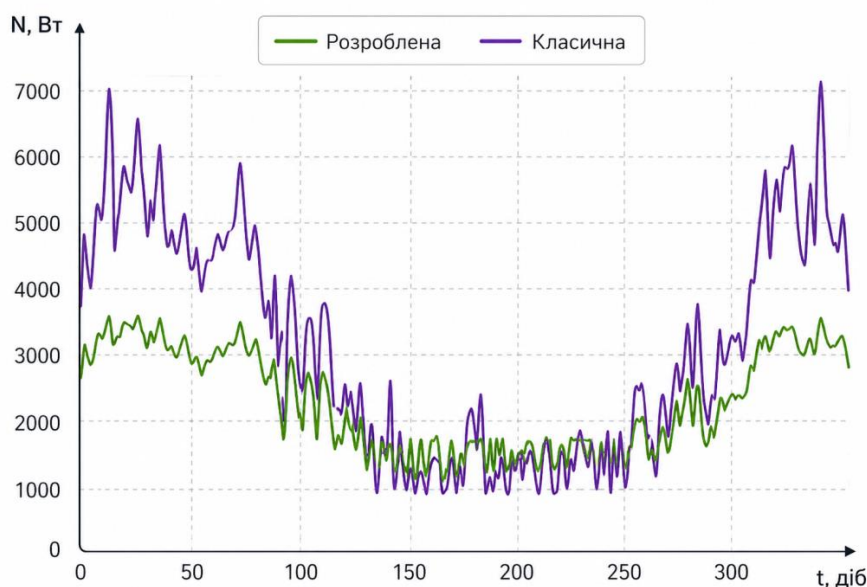


Рисунок 4. Динаміка енергоспоживання системи

Отримані результати свідчать про підвищення енергоефективності та якості забезпечення мікроклімату за рахунок впровадження мехатронного підходу до керування вентиляційними та теплообмінними процесами.

Висновки. Запропонований алгоритм функціонування мехатронної системи забезпечує ефективне керування параметрами мікроклімату та дозволяє суттєво знизити енергоспоживання. Отримані результати підтверджують доцільність використання інтегрованих вентиляційно-теплообмінних систем у приміщеннях АПК.

Перелік посилань

1. Yaropud V., Hunko I., Aliiev E., Kupchuk I. Justification of the mechatronic system for pigsty microclimate maintenance. *Agraarteadus*. 2021. Vol. 32(2). P. 341–351. DOI: <https://doi.org/10.15159/jas.21.23>.
2. Yaropud V. Algorithm of operation of the mechatronic system for providing microclimate of pigsties. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. №3(126). P. 36–47. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-3-4
3. Kaletnik H., Yaropud V., Lutkovska S., Aliiev E. Studying the air flow heating process in the vertical type ground heat exchanger. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. Vol. 100(10). P. 46–54. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2024.10.08>

Секція: ПРИКЛАДНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 620.3:60

Lauris Jankovskis, M.Sc., PhD Student, researcher ^{1*}, Inese Kokina, Dr. biol., Professor ¹, Iona Plaksenkova, PhD., Researcher ¹, Marija Jermalonoka, M.Sc., researcher ¹, Aleksandra Mošenoka, B.Sc., researcher ¹, Agnieszka Ostrowska PhD., researcher ², Renata Galek, PhD., Professor ³, Karolina Wiśniewska M.Sc, researcher², Marta Kutwin, PhD., Professor ²

¹Department of Technology, Institute of Life Sciences and Technology, Laboratory of Genomics and Biotechnology, Daugavpils University, Parādes str. 1A, LV-5401 Daugavpils, Latvia;

²Department of Nanobiotechnology, Institute of Biology, Warsaw University of Life Science – SGGW, Jana Ciszewskiego str. 8, 02-777 Warszawa, Poland;)

³Department of Genetics, Plant Breeding and Seed Science, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Grunwaldzki Sq. 24A, 50 - 363 Wrocław, Poland;

ROLE OF *MEDICAGO SATIVA* L. MEDIATED BIOLOGICAL SYNTHESIS OF AU AND AG NANOPARTICLES IN ANTICANCER APPLICATIONS

Due to their unique physicochemical properties, silver (Ag) and gold (Au) nanoparticles (NPs) have significant potential in medicine. However, "bottom-up" chemical synthesis often involves reagents toxic to healthy human cells, triggering oxidative stress-mediated apoptosis and DNA damage. Biosynthesis using plant extracts has become a promising, eco-friendly alternative. In this process, plant biomolecules—including polyphenols, flavonoids, and terpenoids—act as both reducing and capping agents, obtaining nanoparticles that are generally non-toxic and safer for diverse biomedical applications.

Keywords: *Medicago sativa* L., green synthesis, metal nanoparticles, cytotoxicity

Medicago sativa L. is a rich source of phytochemicals, such as alkaloids, amino acids, carotenes, coumarins, and flavonoids. These biomolecules provide the extract with strong anticancer properties. During synthesis, the extract donates electrons to metal ions (Ag⁺ or Au³⁺), reducing them into neutral atoms. These atoms assemble into controlled nanostructures during nucleation and growth phases, until biomolecules cover the particles (capping), stabilizing them, and imparting the plant's biological characteristics.

In this study, Ag and Au NPs were biologically synthesized using callus cell extracts from two *Medicago sativa* L. genotypes, 'Kometa' and 'La Bella Campagnola', with AgNO₃ and HAuCl₄ as precursors. Successful biosynthesis was confirmed with Transmission Electron Microscopy (TEM), Dynamic Light Scattering (DLS), and zeta potential analysis. UV–Vis spectroscopy confirmed highly successful AgNP formation for both Alfalfa genotypes, displaying intense and broad surface plasmon resonance (SPR) absorption bands between 350–600 nm. On the other hand samples exposed to HAuCl₄ showed very low synthesis activity, with only minor elevations near 540 nm, indicating restricted gold reduction and low nanoparticle concentration.

To complement these findings, Transmission Electron Microscopy (TEM) was utilized to visualize the precise physical morphology and structural traits of the nanoparticles, revealing the successful green synthesis of spherical silver (AgNPs) and gold (AuNPs) nanoparticles using *Medicago sativa* L. callus extracts. Nanoparticle sizes were genotype- and precursor-dependent: 'Kometa' extracts obtained AuNPs of 3–7 nm and AgNPs of 1–20 nm, while 'La Bella Campagnola' produced AuNPs of 1–12 nm and highly uniform AgNPs of 1–5 nm. Although minor clustering occurred, agglomerate sizes remained under 20 nm. The plant

biomolecules performed a dual role as both reducing and capping agents, resulting in stable, bio-functionalized particles with high potential for biomedical applications. Additionally, Dynamic Light Scattering (DLS) and zeta potential analyses were performed to evaluate the hydrodynamic diameter and colloidal stability of the particles in suspension. DLS analysis revealed genotype-dependent variations in hydrodynamic diameter (Z-average), PDI, and zeta potential. Under H₂AuCl₄ treatment, 'La Bella Campagnola' exhibited a significant size reduction (to 159.93 nm) and improved homogeneity (PDI decreased to 0.49–0.30), indicating efficient biomolecular capping and stabilization.

On the other hand, 'Kometa' under H₂AuCl₄ showed uncontrolled particle growth (Z-average increased to 806.80 nm) and high heterogeneity (PDI up to 0.91) due to natural stabilizers. Both genotypes showed stable and smaller average sizes (174–216 nm) under AgNO₃ treatment. Zeta potential shifts further confirmed precursor-specific alterations in surface charge, highlighting that 'La Bella Campagnola' possesses a superior intrinsic stabilization capacity. Together, the combined UV-Vis, TEM, and DLS data provided definitive structural proof of the successful biological synthesis and stabilization of the silver nanostructures by the callus culture extracts.

To evaluate anticancer activity, the resulting extracts and NPs solutions were applied to glioblastoma (T98), liver cancer (C3A), and osteosarcoma (MG-63) cell lines. In vitro cytotoxicity revealed genotype, precursor, and dose-dependent effects on cell viability. Biosynthesized gold nanoparticles (AuNPs) from the 'Kometa' genotype at low concentrations (1% and 5%) significantly stimulated cellular activity/viability in C3A and MG-63 lines compared to controls, whereas 'La Bella Campagnola' AuNPs exhibited minimal interaction and failed to inhibit metabolic activity.

In contrast, biosynthesized silver nanoparticles (AgNPs) from both genotypes demonstrated dose-dependent cytotoxicity. At the maximum concentration of 20%, AgNPs induced a critical, statistically significant drop in cell viability across nearly all tested models (C3A, T-98, and 'Kometa'-treated MG-63), outperforming all other groups. Notably, the MG-63 cell line demonstrated greater overall resistance to the extracts and nanoparticles than the more sensitive C3A and T-98 lines, highlighting the cell-line-specific efficacy of these green-synthesized nanostructures.

To monitor the real-time effect on cancer cells, an incubation monitoring system (CM30) was utilized to measure cell confluency and cell count. Real-time monitoring with the CM30 system revealed cell line- and precursor-dependent variations in confluency and cell count. In MG-63 osteosarcoma cells, silver (Ag) treatments induced a dramatic antiproliferative effect (suppressing confluency to <2%), whereas gold (Au) formulations maintained cellular viability. A different pattern was observed in C3A hepatic cells; while the negative control group maintained a lower baseline confluency (~9%), treatment with Ag nanoparticles resulted in a gradual, moderate tolerance (~10–13%), while Au treatments supported steady cell growth.

On the other hand, T-98 glioblastoma cells exhibited the highest overall proliferation potential and distinct sensitivity profiles. In this line, the introduction of Ag nanoparticles completely halted expansion, reducing confluency to ~1–3%. In contrast, treatment with Au nanoparticles, particularly 'La Bella Campagnola Au', supported aggressive cell growth, with confluency rising to ~51%, even exceeding the negative control levels.

These findings highlight that while biomolecule-capped silver nanoparticles consistently exert potent cytotoxic effects across all lines, gold nanoparticles preserve or enhance real-time cell proliferation, heavily influenced by the intrinsic characteristics of each specific cancer cell type. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) was employed for elemental and structural analysis. The LIBS analysis confirmed that silver and gold nanoparticles were successfully formed in both plant extracts, showing clear peaks for silver

(Ag I at 328.069 and 338.289 nm) and gold (Au I at 242.795 nm). However, the 'Kometa' gold samples also contained a lot of silver, while the 'La Bella Campagnola' matrix had high levels of calcium and magnesium that reduced the background signal when nanoparticles were added. Understanding how these NPs affect tumor cell division is crucial for evaluating their future therapeutic potential.

Future work should focus on identifying the exact plant molecules involved in this green synthesis, since the current method did not fully separate the organic layers. It is also important to study whether the anticancer effects come from the metal core itself or from the plant shell surrounding the particles. The novelty of this research lies in the low-cost and eco-friendly creation of small, round nanoparticles using *M. sativa* callus cultures. It proves that genetic differences between plant genotypes—like the high calcium and magnesium levels in 'La Bella Campagnola' or the silver-gold mixing in 'Kometa'—directly affect how stable the nanoparticles are and how well they work against cancer cells.

УДК 691.87:691.714

Ігор Вакуленко, д.т.н., проф.; Сергій Плітченко, к.т.н., доц.; Тетяна Калініна, к.т.н., доц.

Дніпровський державний технічний університет, Україна

ВПЛИВ ІМПУЛЬСІВ НАПРУЖЕНЬ НА ЦИКЛІЧНУ ВИТРИВАЛІСТЬ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНОЇ СТАЛІ

Анотація. При циклічному навантаженні за схемою знакозмінного згину, обробка імпульсами напружень термічно зміцненої сталі з 0,45 % вуглецю, сприяє підвищенню обмеженої витривалості. Існування наведеного ефекту, окрім кривих циклічного навантаження, підтверджується даними фрактографічного аналізу поверхонь руйнування зразків. Визначено, що величина приросту обмеженої витривалості залежить від ступеня циклічного перевантаження металу. Аналіз ходу кривих циклічного навантаження показав, що пропорційно зростанню амплітуди циклу, ефект підвищення обмеженої витривалості металу від обробки імпульсами напруження, знижується. За даними аналізу параметрів тонкокристалічної будови, дія імпульсів напруження сприяє підвищенню спроможності металу накопичувати дислокації під час циклічного навантаження. Одним із пояснень механізму підвищення витривалості слід вважати прискорення процесів рекомбінації дислокацій у різних кристалографічних системах унаслідок дії імпульсів напружень.

Ключові слова: сталь, циклічне навантаження, обмежена витривалість, дислокація, імпульс напруження.

Ihor Vakulenko, Ph.D., Prof.; Serhii Plitchenko, Ph.D., Assoc. Prof.; Tatyana Kalinina, Ph.D., Assoc. Prof.

INFLUENCE OF STRESS PULSES ON CYCLIC ENDURANCE OF THE THERMAL STRENGTHENING STEEL

Abstract. Under cyclic loading according to the alternating bending scheme, treatment with stress pulses of heat-strengthened steel with 0.45 % carbon content contributes to an increase in finite fatigue life. The existence of this effect, in addition to cyclic loading curves, is confirmed by fractographic analysis of the specimen fracture surfaces. It was determined that the magnitude of the increase in finite fatigue life depends on the degree of cyclic overloading of the metal. Analysis of the cyclic loading curves showed that the effect of increasing the metal's finite fatigue life due to stress pulse treatment decreases in proportion to the increase in cycle amplitude. According to the analysis of fine crystal structure parameters, the action of stress pulses enhances the metal's ability to accumulate dislocations during the cyclic loading process. One explanation for the mechanism of increased endurance is the acceleration of dislocation recombination processes across various crystallographic systems under the influence of stress pulses.

Keywords: steel, cyclic loading, finite fatigue life, dislocation, stress pulse.

Вступ. За циклічного навантаження металевих матеріалів, підвищення концентрації дефектів кристалічної будови та їх рекомбінація становлять один із основних чинників, що визначає умови утворення і зростання осередку руйнування. Окрім особливостей внутрішньої будови, визначеного впливу на обмежену витривалість набувають різноманітні впливи, що спроможні змінювати структурний стан металу. Враховуючи, що утворення осередку руйнування обмежується об'ємами поблизу з поверхнею виробу, можна сподіватися, що дією зовнішнього напруження

можна керовано впливати на поведінку металевому матеріалу за циклічного навантаження.

Стан питання. Достатньо широкого розповсюдження в машинобудівній галузі отримала технологія формування структурного стану в металевому матеріалі завдяки дії імпульсів напруження визначеного напрямку і потужності. Застосування такої обробки дозволяє виготовляти крупногабаритні вироби складної форми з листового металу. За такою технологією, утворення імпульсу напруження для виготовлення виробу за одне навантаження, у більшості випадків, суттєво перебільшує потрібну потужність і може набувати негативного впливу на комплекс властивостей. Існування визначеного критичного значення потужності імпульсу напруження свідчить про зміну ефекту в широкому діапазоні: від зміцнення до пом'якшення металу. В результаті, дослідження структурних змін від дії імпульсу напруження може бути корисним для визначення меж практичного застосування наведеної технології обробки.

Матеріал і методика досліджень. Матеріалом для досліджень слугувала конструкційна сталь, з вмістом вуглецю 0,45 % та іншими хімічними елементами в межах марочного складу. Зразки плоскої форми завдовжки 170-180 мм, шириною 16 мм і товщиною 1 мм, для отримання підвищеної міцності, піддавалися гартуванню на мартенсит і відпуску при температурі 300 °С, тривалістю 1 год. Після термічного зміцнення, зразки піддавали випробуванням на знакозмінний згин симетричного циклу, при кімнатній температурі, в умовах машини «Сатурн-10». При побудові кривих циклічного навантаження (рис. 1, а), по осі ординат відкладали амплітуду циклу (σ_a), а кількість циклів, що витримав зразок до руйнування (N_i), приймали в якості обмеженої витривалості – по осі абсцис.

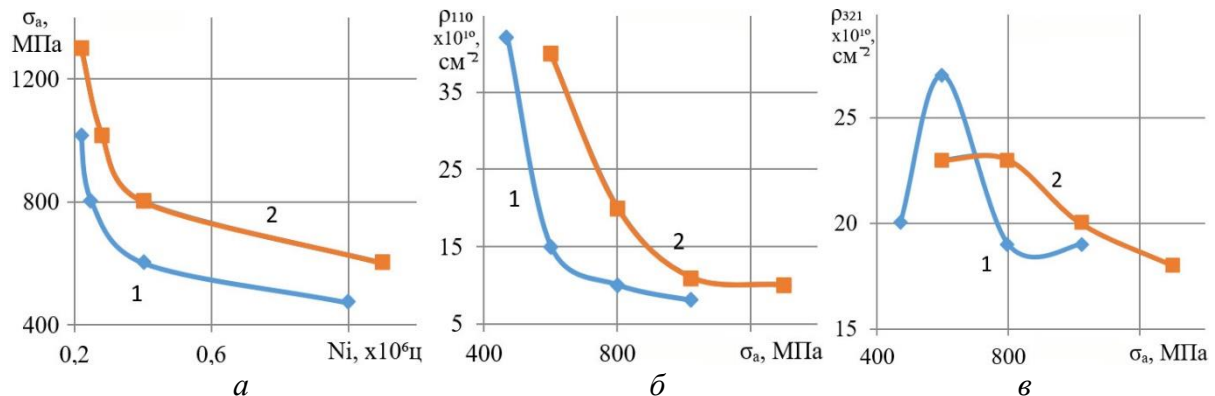


Рисунок 1. Криві циклічного навантаження вуглецевої сталі після термічного зміцнення (1) і обробки ІН (2) – (а), вплив амплітуди циклу на густину дислокацій для інтерференції (110) – (б) і (321) – (в)

Величина σ_a/σ_{-1} , де σ_{-1} – межа міцності за необмеженої витривалості, прийнята в якості ступеня циклічного перевантаження. Імпульси напружень (ІН) для обробки зразків, утворювали завдяки електричного розряду у воді, на устаткуванні «Іскра-23». Імпульс напруження дорівнював 2 ГПа, його кількість складала 10^4 при частоті 2-3 Гц. Ефект від дії імпульсів напруження на N_i визначали порівнянням з ходом кривої без ІН (крива 1). Для конкретної σ_a зразки спочатку навантажували до рівня, приблизно 0,65-0,7 обмеженої витривалості, піддавали дії 10^4 ІН і далі продовжували циклічно навантажувати до моменту руйнування (крива 2). Різниця між сумарною кількістю циклів (з дією ІН), і без неї, була прийнята за міру впливу ІН на N_i .

Аналіз поверхонь руйнування зразків здійснювали по зображенням електронного растрового мікроскопу. Особливості їх будови визначали за методиками

фрактографічних досліджень. Густина дислокацій оцінювали за методиками рентгенівського структурного аналізу.

Результати досліджень. Для сталі після термічного зміцнення, пропорційно підвищенню амплітуди циклу, відбувається відповідне зниження обмеженої витривалості (рис. 1, *a*). З порівняльного аналізу ходу кривих можна визначити, що для досліджуваного інтервалу σ_a , дія *ІН* сприяє підвищенню N_i . З іншого боку, обробка металу *ІН* по різному відбивається на ділянках обмеженої витривалості.

В міру зниження ступеня циклічного перевантаження, ефект дії *ІН* на N_i проявляється в більшій мірі (рис. 1, *a*). Для розуміння механізму впливу *ІН* на N_i , на поверхні зруйнованих зразків за різними інтерференціями $\{hkl\}$ визначали концентрацію дислокацій (ρ_{hkl}). Незалежно від структурного стану, зниження ступеня циклічного перевантаження супроводжується збагаченням на дислокації об'ємів металу поблизу з поверхнею руйнування зразка (рис. 1, *b, в*). На підставі цього, слід вважати, що за однакових σ_a дія *ІН* підвищує спроможність сталі накопичувати дислокації до моменту руйнування зразка.

Враховуючи, що утворення осередку руйнування металевого матеріалу відбувається після досягнення визначеної концентрації дислокацій, підвищення межі їх накопичення повинно зсувати момент утворення ушкодження металу у бік більшої кількості циклів навантаження. Існування різних механізмів утворення осередку руйнування в залежності від ступеня циклічного перевантаження металу обґрунтовує різний характер впливу *ІН* на N_i .

Для ділянки високих ступенів циклічного перевантаження, механізм розвитку структурних перетворень заснований на утворенні елементарних зсувів в межах структурного елемента металевого матеріалу. На підставі цього, слід вважати, що пропорційно збільшенню σ_a у термічно зміцненій сталі буде прискорюватися перехід до плоскодеформованого стану. Це сприятиме підвищенню локалізації пластичної деформації та зниженню обмеженої витривалості.

На ділянці кривої з високим циклічним перевантаженням приріст N_i від дії *ІН* буде мінімальним, що і підтверджується відповідним рівнем ρ_{110} . З іншого боку, на фоні ρ_{110} і подібної залежності ρ_{211} , характер зміни ρ_{321} суттєво відрізняється (рис. 1, *в*). Причиною може бути зміна температури металу на рівні структурних складових. Дійсно, за циклічного навантаження, розігрів металу в локальних мікрооб'ємах може досягати рівня початку фазових перетворень. Тоді підвищення температури за циклічного навантаження, з одночасною дією *ІН*, може розглядатися як одна із причин екстремальної залежності ρ_{321} . Таке тлумачення набуває визначеного підґрунтя завдяки існуванню температурної активації різних кристалографічних систем ковзання.

Для о.ц.к. кристалічної решітки, для температур до 180 °С в більшій мірі активізуються площини $\{211\}$, від 180 до 630 °С – $\{110\}$ і від 630 до 1200 °С – $\{321\}$. Таким чином, за циклічного навантаження на фоні розвитку процесів рекомбінації дислокацій в системах $\{211\}$ і $\{110\}$ дія *ІН* сприяла активації системи $\{321\}$, що в свою чергу привело до підвищення N_i . Додаткового підтвердження ефекту підвищення N_i від *ІН* слід очікувати по результатам аналізу поверхонь руйнування.

Аналіз поверхонь руйнування було проведено для однакової амплітуди циклу 800 МПа зразків металу після термічного зміцнення і дії *ІН*.

На рис. 2, *a* наведена фрактограма термічно зміцненого зразка, що витримав $0,25 \cdot 10^6$ циклів до руйнування. За зовнішнім виглядом поверхня відповідає умовам змішаного механізму руйнування. При формуванні поверхні руйнування домінуючими елементами слід вважати утворення ділянок відриву з гребенями у вигляді світлих тонких ліній, практично без викривлень (*A*) і фасеток руйнування між зернами відносно великих розмірів (рис. 2, *a*, позначення *B*).

Одночасно з цим, на поверхні присутня визначена кількість розшарувань металу (C), утворення мікротріщин (D) і ямок різних розмірів і форми, що є ознаками зростання мікротріщин. Більше цього, на зламі присутня дуже мала ділянка, що подібна борозенкам втоми (E). За всіма наведеними ознаками, поверхня руйнування відповідає умовам розвитку процесів мало циклової втоми.

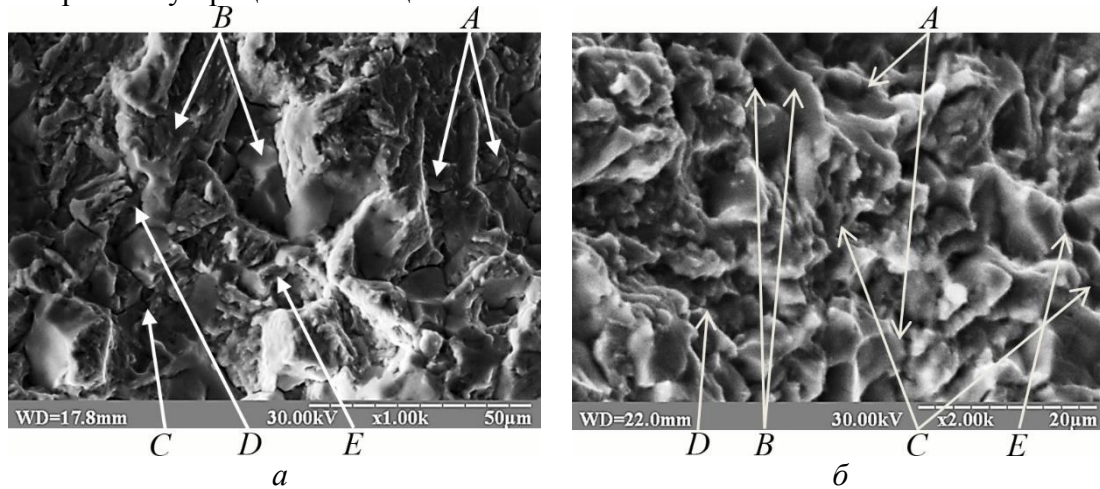


Рисунок 2. Поверхні руйнування зразків для $\sigma_a=800$ МПа після термічного зміцнення (а) і дії ІН (б).

На рис. 2, б наведений злам зразка після дії ІН. За аналогічної амплітуди циклу дія ІН привела до підвищення N_i приблизно на 40 % (рис. 1, а). Рівень збільшення обмеженої витривалості повинен набути визначеного відбитку на особливостях будови поверхні руйнування. З порівняльного аналізу зламів, можна виділити основну відмінність – обробка ІН привела до зміни більшості елементів. Сформовані фасетки, що розташовані в площині зламу, окрім подрібнення стали більш рівновісними (рис. 2, б, позначення А).

У порівнянні з поверхнею зламу (рис. 2, а) спостерігається присутність ділянок з дрібними ямками (рис. 2, б, позначення В), механізм утворення яких заснований на коагуляції мікропорожнин.

Присутня певна кількість фасеток з гребенями відриву (С), які не такі гострі як для сталі без обробки ІН (рис. 1, а, позначення А). Ділянки з еквідистантним розшаруванням металу (D) мають дуже викривлені елементи, часто округлої форми, що практично відсутні на поверхні сталі без обробки ІН. Разом з цим, суттєво зменшилася не тільки кількість фасеток руйнування між зернами, але і їх розмір (E).

Всі наведені зміни елементів поверхні руйнування від дії ІН є ознаками, що підтверджують підвищення обмеженої витривалості за циклічного навантаження. Таким чином, прискорення рекомбінації дислокацій за різних кристалографічних систем ковзання від дії ІН, є однією з причин підвищення спроможності металу накопичувати дислокації в процесі циклічного навантаження. В результаті досягається збільшення обмеженої витривалості термічно зміцненої вуглецевої сталі.

Висновки.

1. Обробка імпульсами напруження термічно зміцненої вуглецевої сталі, підвищує обмежену витривалість за циклічного навантаження.
2. Ефект приросту обмеженої витривалості від дії імпульсів напруження є обернено пропорційним ступеню циклічного перевантаження.
3. Дія ІН на підвищення обмеженої витривалості заснована на прискоренні рекомбінації дислокацій і підвищенні спроможності металу накопичувати дислокації в процесі циклічного навантаження.

УДК 620.175:669.15

Володимир Волчук¹, д.т.н., проф.; Діана Глушкова², д.т.н., проф.; Дмитро Казарян¹, аспірант; Сергій Мариненко³, к.т.н., доц.; Віктор Сенчишин³, к.т.н., доц.; Ігор Коваль³, к.т.н., доц.

¹Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, 49600, м. Дніпро, вул. Архітектора О. Петрова, 24-а, Україна

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНІВ

Анотація. У роботі розглянуто застосування мультифрактального аналізу для кількісної оцінки мікроструктури та прогнозування механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків марки СПХН (з пластинчастим графітом). Мультифрактальний аналіз проводили шляхом розрахунку спектру статистичних розмірностей Реньї (D_q), зокрема фрактальної (D_0), інформаційної (D_1) та кореляційної (D_2) розмірностей. Встановлено високу чутливість механічних властивостей чавунів до мультифрактальних параметрів структури. Показано, що збільшення фрактальної розмірності пластинчастого графіту від 1,58 до 1,97 призводить до суттєвого зниження показників міцності та пластичності. Отримані регресійні залежності дозволяють проводити прогноз чавунних валків з мінімальними матеріально-часовими витратами.

Ключові слова: чавунні валки, мікроструктура, мультифрактальний аналіз, фрактальна розмірність, механічні властивості, прогнозування якості.

Volodymyr Volchuk, Diana Hlushkova, Dmytro Kazarian, Serhii Marynenko, Viktor Senchyshyn, Ihor Koval

APPLICATION OF MULTIFRACTAL ANALYSIS FOR MODELING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CAST IRONS

Abstract. This paper examines the application of multifractal analysis for the quantitative assessment of microstructure and the prediction of mechanical properties of grade SPKhN cast iron rolling rolls with flake graphite. The multifractal analysis was performed by calculating the spectrum of Rényi statistical dimensions (D_q), particularly the fractal (D_0), information (D_1), and correlation (D_2) dimensions. A high sensitivity of the mechanical properties of cast irons to the multifractal parameters of the structure was established. It is shown that increasing the fractal dimension of flake graphite from 1.58 to 1.97 results in a significant decrease in strength and ductility. The obtained regression dependencies enable the prediction of the quality of cast iron rolls with minimal material and time costs.

Keywords: cast iron rolls, microstructure, multifractal analysis, fractal dimension, mechanical properties, quality prediction

Вступ. Чавунні сортопрокатні валки є одним із найвідповідальніших елементів прокатного обладнання, від яких залежать продуктивність, якість продукції та економічна ефективність металургійного виробництва. Валковий чавун (марки СПХН з пластинчастим графітом) поєднує відносно високу твердість, зносостійкість і помірну міцність, що робить його широко застосовуваним матеріалом для виготовлення валків. Основні області використання - сортопрокатні стани, де валки працюють в умовах високих контактних напружень, циклічних навантажень і інтенсивного зношування.

Властивості чавунних валків суттєво залежать від параметрів мікроструктури - форми, розмірів, розподілу графітних включень та карбідної фази, а також типу металевої матриці. Вплив температури на властивості сталі є важливим фактором, оскільки термічна обробка змінює її структуру, що призводить до варіацій у властивостях [1-3]. Крім того, в реальних умовах експлуатації валки можуть зазнавати неконтрольованого температурного впливу (перегрів, термічні удари), що спричиняє структурні зміни, посилює неоднорідність і ускладнює ідентифікацію параметрів мікроструктури [4].

Метою роботи є встановлення кількісних закономірностей між мультифрактальними характеристиками елементів структури (графіту та карбідів) та механічними властивостями чавунів - межею міцності на розрив σ_B , межею міцності на згин σ_C , ударною в'язкістю КС, твердістю HSD.

Методики і матеріали. Хімічний склад чавунних валків наведено в табл. 1.

Таблица 1

Хімічний склад валкового чавуну, в % від маси

Чавун	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
СПХН-45	2,82...2,98	0,55...0,85	0,60...0,80	0,092...0,112	0,015...0,044	0,58...0,82	1,14...1,27
СПШН-50	2,95...3,21	1,59...2,04	0,51...0,72	0,044...0,067	0,015...0,022	0,41...0,65	1,07...1,24

Мікроструктуру досліджували на оптичному мікроскопі Neophot-2 у нетравленому та травленому станах. Травлення проводили в 4-% розчині азотної кислоти в спирті.

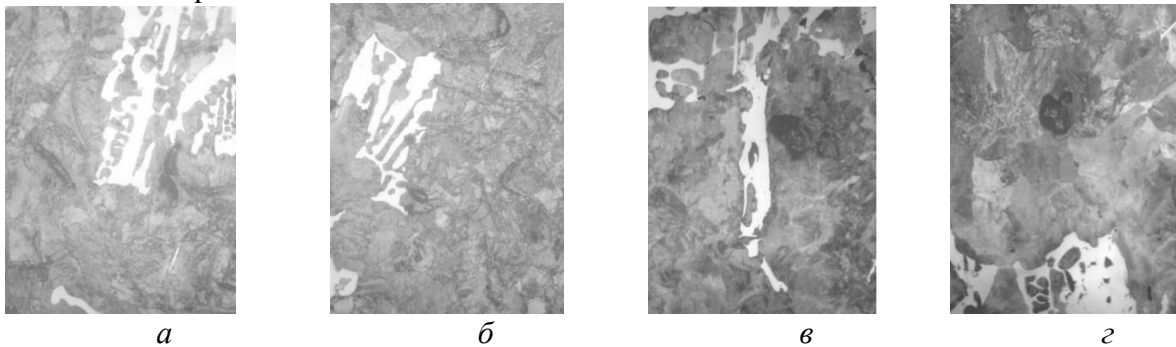


Рисунок 1. Будова бочок чавунних валків марки СПХН-45 (а, б) та СПШН-50 (в, г) з перлітною матрицею на глибині 20 мм від поверхні бочок: форма пластинчатого (а, б) та шаровидного графіту (в, г); ледебуритна евтектика, $\times 200$

Зображення переводили в цифровий формат і обробляли за спеціально розробленим алгоритмом. Розрахунок спектру статистичних розмірностей Реньї проводили за (1):

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow 0} \ln \sum_{i=1}^N \frac{p_i^q}{\ln \delta}, \quad (1)$$

де p_i — ймовірність потрапляння точки об'єкта в i -ту комірку сітки розміром δ .

Для повного охоплення спектру сингулярностей розрахунки проводили в широкому діапазоні параметра q – від -200 до $+200$.

Механічні властивості визначали за стандартними методиками: межа міцності на розрив - на універсальній машині Instron; межа міцності на згин- на машині ЦД-40;

ударна в'язкість (без надрізу) - на маятниковому копрі ПСВ-5; твердість – за методом Шора.

Для встановлення зв'язків між мультифрактальними характеристиками структури та механічними властивостями застосовували методи кореляційного та регресійного аналізу. Чутливість властивостей до зміни розмірностей оцінювали за спеціальною методикою:

$$K_i = |Y_i - Y_{i+1}| / |X_i - X_{i+1}|, \quad (2)$$

де X_1 і X_2 – два числа, що характеризують критерій якості в заданих областях $i=1, \dots, n$ та Y_1 і Y_2 – відповідні значення розмірностей, отриманих в цих областях.

Результати та їх обговорення. Результати розрахунку спектру статистичних розмірностей Реньї наведено на рис. 2.

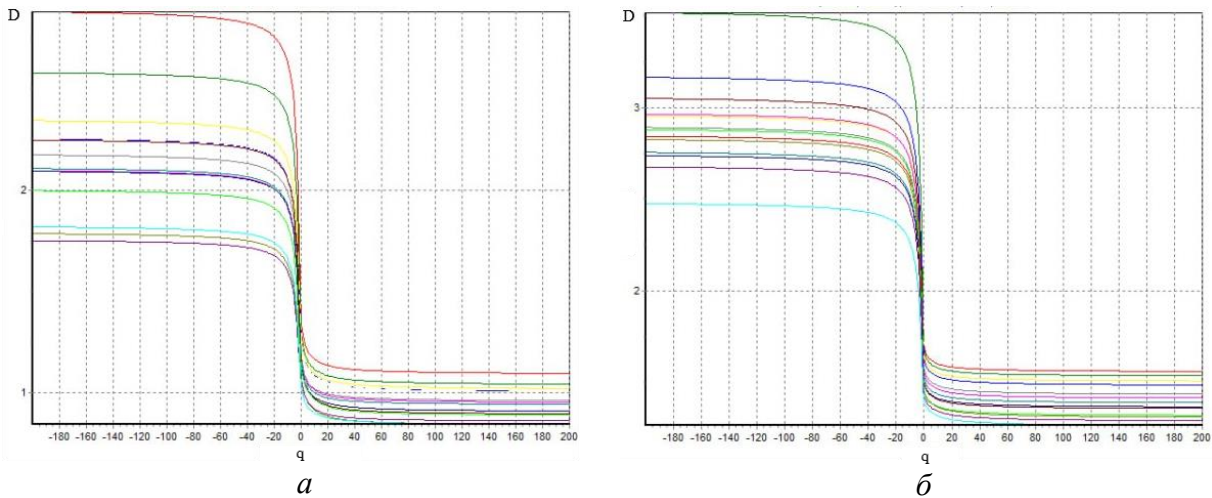


Рисунок 2. Спектр мультифрактальних розмірностей графіту (а) та карбідів (б)

Результати проведеного аналізу показали, що механічні властивості чавунів мають найбільшу чутливість саме до фрактальної, інформаційної та кореляційної розмірностей графітної та карбідної фаз (рис. 3). У подальшому кількісний взаємозв'язок розглядався виключно між цими найбільш інформативними мультифрактальними параметрами.

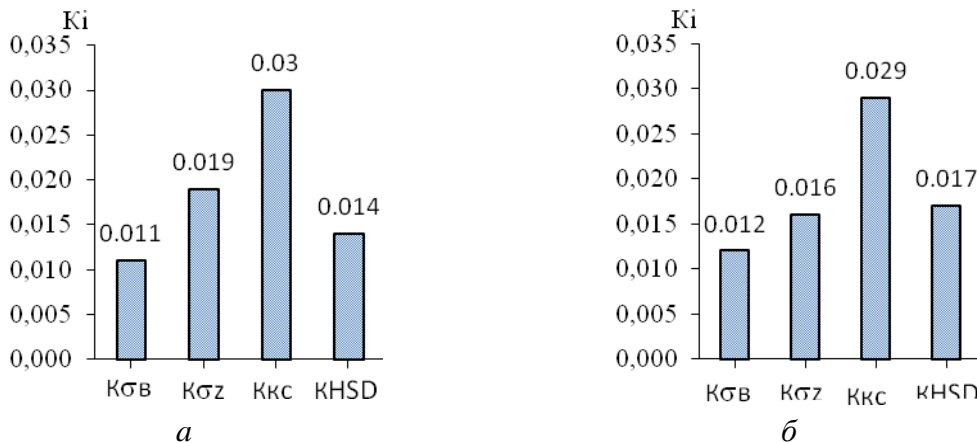


Рисунок 3. Чутливість механічних властивостей до фрактальної D_0 (а), інформаційної D_1 (б) розмірностей графіта робочої зони бочок чавунних валків СПХН

Аналіз отриманих залежностей підтверджує можливість кількісної оцінки впливу структури на властивості чавунів (рис. 4). Межі пластинчастих графітних включень

виступають активними концентраторами мікронапружень. Зростання їх об'єму призводить до послаблення металевої матриці, що знижує несучу здатність матеріалу.

Мультифрактальний аналіз показав, що фрактальна розмірність (D_0) структурної фази переважно відображає геометричну складність і форму елементів, тоді як інформаційна (D_1) та кореляційна (D_2) розмірності найбільше залежать від об'ємної частки та характеру розподілу цих елементів у матриці.

Спостерігається стійка тенденція до зниження міцнісних характеристик валків зі збільшенням фрактальної розмірності пластинчастого графіту (рис. 4 а, б). Цей ефект частково пов'язаний зі збільшенням вмісту графіту від 0,5 до 2,5 %, ростом довжини його пластин від ПГд45 до ПГд180, а також підвищенням концентрації нікелю при 0,99–1,17 %.

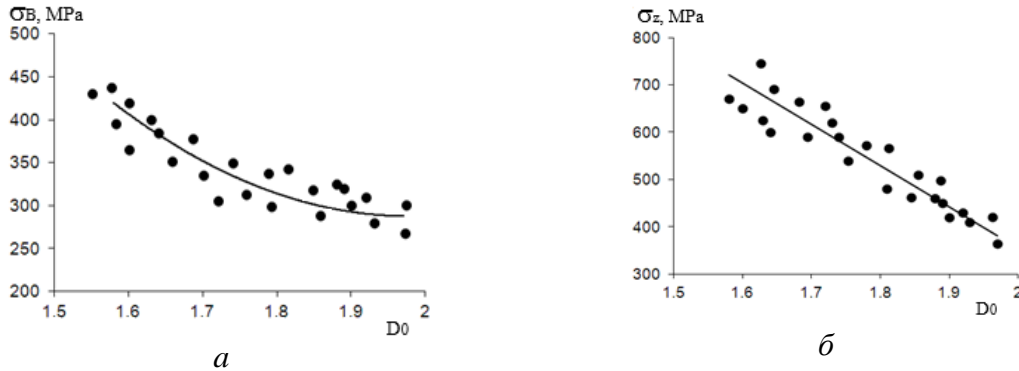


Рисунок 4. Залежність механічних властивостей від мультифрактальних характеристик

Отримані регресійні рівняння (3–6) демонструють задовільну адекватність і статистично значущі коефіцієнти кореляції.

$$\sigma_{\text{в}} = 825,16 \cdot D_0^2 - 3315,4 \cdot D_0 + 3499; \quad r^2 = 0,85 \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{згин}} = -866,35 \cdot D_0 + 2118,7; \quad r^2 = 0,88 \quad (4)$$

$$KC = -74,113 \cdot D_1^2 + 245,29 \cdot D_1 - 162,81; \quad r^2 = 0,89 \quad (5)$$

$$HSD = 249,86 \cdot D_1^2 - 764,95 \cdot D_1 + 678,29. \quad r^2 = 0,83 \quad (6)$$

Використання мультифрактальних параметрів поряд з традиційними характеристиками структури дозволило прогнозувати механічні властивості валків з мінімальними матеріально-часовими витратами.

Висновки

1. У роботі показано перспективність застосування мультифрактального аналізу як сучасного кількісного інструменту для оцінки складної мікроструктури сортопрокатних чавунних валків. Розрахунок спектру статистичних розмірностей Реньї дозволяє об'єктивно характеризувати геометричну складність, неоднорідність розподілу та самоподібність графітної та карбідної фаз.

2. Встановлено високу чутливість механічних властивостей чавунів до фрактальної (D_0), інформаційної (D_1) та кореляційної (D_2) розмірностей структурних елементів. Найбільший вплив на міцність і пластичність здійснює фрактальна розмірність графіту, тоді як інформаційна та кореляційна розмірності суттєво впливають на ударну в'язкість і твердість матеріалу.

3. Для чавунів з пластинчастим графітом (СПХН) зростання фрактальної розмірності графіту від 1,58 до 1,97 призводить до зниження межі міцності на розрив на ~160 МПа та межі міцності на згин на ~400 МПа.

4. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження мультифрактального аналізу в практику матеріалознавчого контролю на підприємствах

з виробництва чавунних прокатних валків для підвищення стабільності їх механічних властивостей і зносостійкості.

Отримані наукові положення розширюють можливості кількісної оцінки структури чавунів і можуть бути використані для вдосконалення процесів їх виробництва.

Перелік посилань

1. V. Maslova, R. Nastase, G. Veryasov, N. Nesterenko, E. Fourré, C. Batiot-Dupeyrat, *Progress in Energy and Combustion Science*, 101, 101096 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2023.101096>
2. B. O. Trembach, M. G. Sukov, V. A. Vynar et. al., *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44(4), 493 (2022). <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0493>
3. V.M. Volchuk, D.B. Hlushkova, *Functional Materials*, 31(2), 205 (2024) <https://doi.org/10.15407/fm31.02.205>
4. D.B. Hlushkova, A.V. Kalinin, N.E. Kalinina, V.M. Volchuk, V.A. Saenko, A.A. Efimenko, *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(144), 126-129 (2023). <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>

УДК 620.175:669.15

**Діана Глушкова¹, д.т.н., проф.; Володимир Волчук², д.т.н., проф.;
Ігор Тимченко², аспірант, Сергій Мариненко³, к.т.н., доц.;
Тарас Майданчук⁴, к.т.н., доц.; Ігор Коваль³, к.т.н., доц.**

¹Харківський національний автомобільно- дорожній університет, 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25, Україна

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, 49600, м. Дніпро, вул. Архітектора О. Петрова, 24-а, Україна

³Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, Україна

⁴Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11, Україна

ВСТАНОВЛЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ТВЕРДОСТІ ДО СТРУКТУРИ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Анотація. У статті досліджено можливості фрактального аналізу як ефективного інструменту для кількісної характеристики мікроструктури та прогнозування комплексу механічних властивостей середньовуглецевих конструкційних сталей. Актуальність роботи пов'язана з потребою у створенні швидких, об'єктивних і недеструктивних методів оцінки якості металопродукції безпосередньо за параметрами структури в умовах реального виробництва. Встановлено чутливість між фрактальними характеристиками окремих фаз і межами зерен та твердістю середньовуглецевих конструкційних сталей. Розроблений підхід може бути використаний для встановлення зв'язку між структурою сталей та їхніми властивостями.

Ключові слова: конструкційні сталі, мікроструктура, чутливість, мультифрактальний аналіз, твердість.

Diana Hlushkova, Volodymyr Volchuk, Igor Tymchenko, Serhii Marynenko, Taras Maydanchuk, Ihor Koval

ESTABLISHING THE SENSITIVITY OF HARDNESS TO THE MICROSTRUCTURE OF MEDIUM-CARBON STEELS

Abstract. The article investigates the capabilities of fractal analysis as an effective tool for the quantitative characterization of microstructure and the prediction of a set of mechanical properties of medium-carbon structural steels. The sensitivity between the fractal characteristics of individual phases, grain boundaries, and the hardness of medium-carbon structural steels has been established. The developed approach can be used to determine the relationship between the structure of steels and their properties.

Keywords: structural steels, microstructure, sensitivity, multifractal analysis, hardness.

Вступ. Структура матеріалу є одним із ключових факторів, що визначає його фізико-механічні властивості [1]. Традиційні методи кількісного аналізу мікроструктури металів, такі як стереологічний аналіз, рентгеноструктурний та електронно-мікроскопічний методи, забезпечують важливу інформацію, але часто не дозволяють повною мірою описати складну геометрію та просторову організацію структурних елементів [2].

Фрактальний аналіз розширює можливості класичного підходу, дозволяючи враховувати неоднорідність розподілу структурних елементів у матеріалі. У попередніх дослідженнях показано високу ефективність фрактальних параметрів для

прогнозування механічних властивостей різних матеріалів, зокрема металів і сплавів [4].

Метою роботи є встановлення чутливості між фрактальними характеристиками мікроструктури конструкційних сталей та їх основними механічними властивостями на прикладі середньовуглецевих сталей.

Методики і матеріали. Пасивний експеримент проводили на середньовуглецевих сталях. Вибір саме цих марок був зумовлений наявністю у науковій літературі достатньо великого масиву достовірних даних щодо мікроструктури та відповідних механічних властивостей (зокрема, твердості), визначених у конкретних ділянках зразків [20]. Це дозволило провести перевірку запропонованого підходу на незалежному експериментальному матеріалі.

Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Хімічний склад сталей 1-4 (мас. %)

Номер сталі	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
1	0,29	0,30	0,42	0,02	0,02	0,11	0,24
2	0,35	0,22	0,51	0,04	0,01	0,15	0,22
3	0,42	0,18	0,69	0,03	0,04	0,13	0,20
4	0,45	0,20	0,64	0,05	0,03	0,12	0,18

Мікроструктуру досліджували методами оптичної мікроскопії з подальшою цифровою обробкою зображень. Фрактальну розмірність визначали комбінованим методом на основі найкращої збіжності клітинного та точкового способів [19]. Для виявлення найбільш чутливої структурної складової використовували коефіцієнт чутливості:

$$K = |D_n - D_{n+1}| / |M_n - M_{n+1}| \quad (1)$$

де D_n і D_{n+1} – фрактальні розмірності елементів структури в двох реперних точках; M_n і M_{n+1} – механічні властивості в цих точках.

Аналіз гістограм коефіцієнта чутливості (рис. 1) наочно демонструє різний ступінь впливу окремих структурних складових на твердість сталей з ферито-перлітною структурою.

З отриманих даних випливає, що для сталі 1 найбільшу чутливість до твердості проявляє фрактальна розмірність границь зерен феррито-перлітної структури. Для сталі 2 домінуючий вплив має фрактальна розмірність перлітної складової, а для сталі 3 – фрактальні розмірності як перліту, так і ферриту, а для сталі 4 - фрактальні розмірності ферриту.

На підставі результатів пасивного експерименту були отримані регресійні залежності (2), в яких твердсть виступає функцією цілі, а аргументами є фрактальні розмірності найбільш чутливих структурних складових:

$$\begin{cases} HV = 116,12D_g^{1,172} - \text{steel 1} \\ HV = 4402D_p^2 - 15714D_p + 14224 - \text{steel 2} \\ HV = 1345,8D_p^2 - 4688,6D_{fp} + 4327 - \text{steel 3} \\ HV = -3010,4D_f^2 + 10184D_f - 8451,6 - \text{steel 4} \end{cases} \quad (2)$$

де HV – твердість за Віккерсом; D_f – фрактальна розмірність ферриту; D_p – фрактальна розмірність перліту; D_g – фрактальна розмірність границь зерен ферито-перлітної структури.

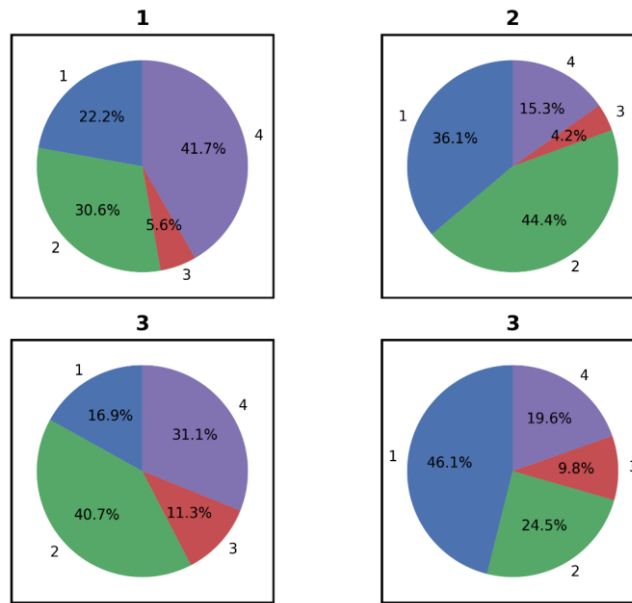


Рисунок 1. Гістограми чутливості фрактальної розмірності фериту (1), перліту (2), середнього значення фаз (3) та границь зерен (4) до твердості HV сталей 1-4.

Отримані результати підтвердили наявність стійкого кількісного взаємозв'язку між фрактальною розмірністю ключових структурних складових та механічними властивостями середньовуглецевих сталей, що стало важливим етапом обґрунтування працездатності запропонованого методу.

Висновки

У результаті дослідження встановлено високу ефективність фрактального аналізу для кількісної оцінки мікроструктури та прогнозування механічних властивостей середньовуглецевих конструкційних сталей.

Виявлено чіткий кількісний зв'язок між фрактальними характеристиками фериту, перліту та границь зерен і твердістю сталей. Показано, що чутливість різних структурних складових до твердості залежить від хімічного складу сталі.

Розроблено коефіцієнт чутливості, який дозволяє визначати найбільш інформативні структурні параметри. Отримані регресійні залежності підтверджують можливість надійного прогнозування твердості на основі фрактальної розмірності мікроструктури.

Перелік посилань

1. Yuan, M., Zhang, L., Wan, J., Li, Yu, Xu, W., Qi Y., Xie, Z., Xu, W. *Structures*, **75**, 108677 (2025) <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108677>
2. C. Ding, L. Jiang, J. Xu, S. Guo, J. Zhang, P. Xiong, Z. Piao, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **35**(08), 2550098 (2025) <https://doi.org/10.1142/S0218127425500981>
3. V.M. Volchuk, D.B. Hlushkova, *Functional Materials*, **31**(2), 205 (2024) <https://doi.org/10.15407/fm31.02.205>
4. D.B. Hlushkova, A.V. Kalinin, N.E. Kalinina, V.M. Volchuk, V.A. Saenko, A.A. Efimenko, *Problems of Atomic Science and Technology*, **2**(144), 126-129 (2023). <https://doi.org/10.46813/2023-144-126>

УДК 668.045.18

Василь Ковбашин¹, канд. хім. наук, доц.; Ігор Бочар² канд. техн.наук, доцент

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

²Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ МОЛІБДЕНУ ТА ВОЛЬФРАМУ

Анотація. Розглянуто шляхи підвищення пластичності молібдену та вольфраму та їх сплавів із можливістю суттєвого зниження відсотку браку при виготовленні виробів із листового прокату та дроту. Досягнення поставленої мети передбачає використання технології тристадійного процесу хіміко-термічної обробки, який включає високотемпературний відпал, вакуумне рафінування, дифузійне насичення поверхні однойменним металом.

Ключові слова. Молібден, вольфрам, хіміко-термічна обробка, високотемпературний відпал, дифузійне насичення поверхні однойменним металом.

Vasiliy Kovbashyn¹, Igor Bochar²

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MOLYBDENUM AND TUNGSTEN PROCESSING

Abstract. The ways of increasing the plasticity of molybdenum and tungsten and their alloys with the possibility of significantly reducing the percentage of defects in the manufacture of rolled sheet and wire products are considered. Achieving the set goal involves the use of a three-stage process of chemical-thermal treatment technology, which includes high-temperature annealing, vacuum refining, diffusion saturation of the surface with the same metal.

Keywords. Molybdenum, tungsten, chemical-thermal treatment, high-temperature annealing, diffusion saturation of the surface with the same metal.

Молібден і вольфрам належать до групи тугоплавких металів, які характеризуються високою температурою плавлення, значною міцністю та термічною стабільністю. Завдяки цьому вони широко застосовуються у виробництві виробів електронної, світлотехнічної та радіотехнічної промисловості, де використовують листовий прокат, дріт, фольгу та прутки зі сплавів молібдену і вольфраму (зокрема марок МЧ, ЦМ-2А, МЛТ, ВА, ВТ-7, ВТ-10, ВТ-15). Формування виробів із зазначених матеріалів здійснюється переважно методами холодного штампування або механічної обробки. Однак технологічність молібдену та вольфраму суттєво обмежується їх схильністю до крихкого руйнування, що пов'язано з наявністю домішок проникнення (кисень, азот, вуглець, водень), які концентруються переважно на межах зерен і спричиняють зниження пластичності. У промислових умовах це може призводити до високого рівня браку, який в окремих випадках перевищує 60 %.

Крім того, під час виробництва прокату і дроту з молібдену та вольфраму можливе утворення поверхневих макродефектів (тріщини, пори, раковини, подряпини), які додатково знижують пластичність та погіршують формоутворювальні властивості матеріалу. Знизити негативний вплив таких дефектів можливо шляхом механічної або хімічної обробки.

Для підвищення пластичності тугоплавких металів традиційно застосовують технології, що зменшують кількість таких дефектів. Зокрема, це проміжний високотемпературний відпал у вакуумі або в інертних газових середовищах (аргон, гелій), інколи у водні.

Недоліками зазначених методів є неповне видалення домішок проникнення, нестабільність отриманого ефекту, значні витрати інертних газів, вибухонебезпечність водню, а також складність та висока вартість обладнання, необхідного для глибокого очищення газових середовищ і створення високого вакууму.

Таким чином, актуальним є розроблення способу, який поєднує ефективне очищення матеріалу від домішок із модифікацією поверхневого шару, що забезпечує зниження рівня браку.

Метою роботи є підвищення пластичності молібдену та вольфраму (а також їхніх сплавів) і зниження відсотка браку при виготовленні виробів із листового прокату та дроту. Для досягнення поставленої мети запропоновано тристадійний процес хіміко-термічної обробки, що включає високотемпературний відпал, вакуумне рафінування [1,2] та дифузійне насичення поверхні однойменним металом (молібденування) [3], (вольфрамування) [4]. Дослідження проводили на зразках із прокату молібдену та вольфраму розміром $50 \times 10 \times 0,5$ мм.

Високотемпературний відпал здійснювали при температурному режимі $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вакуумному інертному середовищі з витримкою одна година. Метою етапу є активація дифузійних процесів і переміщення домішок проникнення з об'єму металу до приповерхневої зони.

Вакуумне рафінування проводили у вакуумній печі під тиском 10^{-5} Па в контейнері з порошковою сумішшю складу (мас. %): *Ti* – 40, *Mg* – 20, *Cr* – 25, церій-лантанова лігатура – 10, розріджувач (Al_2O_3) – решта.

Температура процесу не перевищувала $0,4 T_{пл}$ оброблюваного металу. Обробка здійснювалася циклічно (до чотирьох циклів) із тривалістю кожного циклу 4 години. На цьому етапі відбувається хімічне зв'язування домішок проникнення у приповерхневій зоні.

Дифузійне насичення поверхні виконували в порошковій суміші складу (мас. %): *Mo* (або *W*) – 50–65, AlF_3 – 1,5–3, Al_2O_3 – решта. Порошки *Mo* або *W* мали фракцію до 120 мкм, AlF_3 та Al_2O_3 — до 40 мкм. Суміш готували шляхом ретельного перемішування.

Зразки встановлювали у жароміцні контейнери з дотриманням регламентованих відстаней між зразками та стінками контейнера. Процес проводили у вакуумній печі під тиском 10^{-5} Па. Для молібдену – при $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для вольфраму – при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом однієї години.

Після завершення обробки контейнери охолоджували разом із піччю до кімнатної температури. Активність суміші зберігалася протягом 15–20 циклів із періодичним додаванням 2,5 % порошку *Mo* (*W*) та 1,5 % AlF_3 .

Механізм дії. Підвищення пластичності обумовлене дифузійним переміщенням домішок проникнення під час відпалу, їх зв'язуванням у процесі вакуумного рафінування, формуванням модифікованого поверхневого шару під час дифузійного насичення, зменшенням концентрації домішок на межах зерен та частковим усуненням поверхневих макродефектів.

У присутності AlF_3 утворюються леткі фторидні сполуки молібдену або вольфраму, що забезпечує масоперенесення насичувального елемента до поверхні виробу. Металографічні дослідження показали відсутність виражених макродефектів у поверхневому шарі після обробки. Результати експериментальних досліджень. Пластичність оцінювали методом багаторазового перегину (згин на 90° з поверненням у вихідне положення). Отримані результати:

Молібден (МЧ): до 20 циклів перегину; зниження браку з 20 % до 11 %.

Вольфрам (ВА): до 9 циклів перегину; зниження браку з 30 % до 15 %.

Активність порошкової суміші зберігають упродовж 15–20 повторних циклів, додаючи щоразу 2,5 % свіжого порошку (Mo або W) і 1,5 % AlF_3 . Залежно від вибраних пропорцій виділяють такі склади [5]:

- а) 50 % Mo (W), 3 % AlF_3 , решта – Al_2O_3 ,
- б) 55 % Mo (W), 2 % AlF_3 , решта – Al_2O_3 ,
- в) 65 % Mo (W), 1,5 % AlF_3 , решта – Al_2O_3 ,
- г) Порівняльний приклад – (Ti – 40, Mg – 20, Cr – 25, церій-лантанової лігатури – 10, Al_2O_3 – решта).

Дослідні серії включали п'ять пластин для кожного зі способів. Результати подано в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати досліджень

Метал	Кількість перегинів, шт./брак%			
	склад «а»	склад «б»	склад «в»	прототип «г»
Молібден	16/15	18/13	20/11	14/20
Вольфрам	7/19	8/17	9/15	4/30

Згідно з наведеними даними, запропонований спосіб підвищує пластичність молібдену та вольфраму приблизно в два рази порівняно з відомим підходом і дає змогу скоротити відсоток браку майже вдвічі. Додатковою перевагою є можливість багаторазового використання суміші для молібденування (вольфрамування).

Загалом запропонована технологія може бути впроваджена для обробки фольги, дроту, листового прокату й прутків, що йдуть на виготовлення конструкційних компонентів електронних, світлотехнічних, радіотехнічних та спеціальних пристроїв.

Таким чином, порівняно з прототипом спостерігається приблизно дворазове підвищення пластичності та суттєве зниження частки бракованих виробів.

Висновки.

Розроблено тристадійний процес хіміко-термічної обробки молібдену та вольфраму, що поєднує відпал, вакуумне рафінування та дифузійне насичення поверхні однойменним металом. Запропонований спосіб забезпечує підвищення пластичності оброблених матеріалів приблизно вдвічі. Досягнуто істотного зниження рівня виробничого браку. Технологія придатна для обробки фольги, дроту, листового прокату та тонкостінних виробів, що застосовуються в електронній, світлотехнічній та радіотехнічній галузях.

Перелік посилань

1. Increase of energy efficiency of heat generator through batching components of burning Fedoreiko, V.S., Lutsyk, I.B., Iskerskyi, I.S., Zagorodnii, R.I. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2014, (4), pp. 27–32.
2. Buketov A., Stukhlyak P., Maruschak P., Panin S., Menou A. Regularities of impact failure of epoxy composites with Al_2O_3 microfiller and their analysis on the basis of external surface layer concept. Key Engineering Materials, 2016, 712, 2016, pp. 149-154.
3. Спосіб хіміко-термічної обробки листового вольфраму: пат 161844 Україна: С22F1/18. № u 2025 03288; заявл. 07.07.2025; опубл. 07.01.2026, Бюл. № 1. 4с.
4. Спосіб хіміко-термічної обробки виробів на основі молібдену: пат 161948 Україна: С22F1/18. № u 2025 03284; заявл. 07.07.2025; опубл. 21.01.2026, Бюл. № 3. 4с.
5. Kovbashyn V., Bochar I. Investigation of the change in technological properties of refractory metals after diffusion saturation. Scientific Journal of the Ternopol National Technical University ISSN 2522-4433. Web: visnyk.tntu.edu.ua. Вісник Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль: В-во ТНТУ. №1 (109), 2023. С. 121–129. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.01 ISSN 2522-4433 .

УДК 621.762

Володимир Нерубацький, канд. техн. наук, доц.; Артур Каграманян, канд. техн. наук, доц.; Ганна Комарова, канд. техн. наук, доц.; Олена Зінченко, канд. техн. наук; Дмитро Волошин, канд. техн. наук, доцент
Український державний університет залізничного транспорту, Україна

**АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ
НАНОКОМПОЗИТІВ ZrO_2-WC**

Анотація. У роботі проведено системний аналіз розробок у сфері створення керамічних нанокompatитів системи ZrO_2-WC . Визначено ключові фізико-технологічні параметри та встановлено їх залежність від режимів електроконсолідації та чинників експлуатаційного впливу в промисловому секторі.

Ключові слова: нанокompatити, діоксид цирконію, карбід вольфраму, електроконсолідація, зносостійкість.

Volodymyr Nerubatskyi, Arthur Kagramanian, Hanna Komarova, Olena Zinchenko, Dmytro Voloshyn

**ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF
 ZrO_2-WC NANOCOMPOSITES**

Abstract. The paper presents a systematic analysis of developments in the field of ZrO_2-WC ceramic nanocomposites. Key physical and technological parameters are determined, and their dependence on electroconsolidation modes and operational factors in the industrial sector is established.

Keywords: nanocomposites, zirconium dioxide, tungsten carbide, electroconsolidation, wear resistance.

Вступ. Сучасна стратегія відновлення та інноваційного розвитку промислового комплексу України, зокрема залізничного транспорту, базується на інтеграції інтелектуальних технологій у процеси створення матеріалів із наперед програмованими властивостями. У цьому контексті особливої актуальності набуває забезпечення надійної роботи вузлів тертя та конструкційних елементів, що функціонують у критичних умовах: в агресивних середовищах та при інтенсивному кавітаційному зносі. Ефективне функціонування промислового сектору в сучасних умовах потребує впровадження зносостійких матеріалів вітчизняного виробництва для зниження залежності від імпорту складників. Використання керамічних композитів дозволяє оптимізувати витрати на експлуатацію техніки та підвищити конкурентоспроможність українського машинобудування.

Основна частина. Для обґрунтування вибору системи ZrO_2-WC проведено аналіз фізико-механічних характеристик нанокompatитів порівняно з традиційними матеріалами, що використовуються в аналогічних вузлах (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики зносостійких матеріалів

Матеріал	Твердість (HV, ГПа)	Тріщиностійкість (K_{Ic} , МПа·м ^{1/2})	Термостійкість (°C)	Відносний ресурс
Сталь 40X (гарт.)	5,5–6,0	45–50	450	1,0
Твердий сплав ВК8	14,0–15,0	9–11	600	1,8
Кераміка ZrO_2-WC	17,5–19,0	8–12	950	2,5–3,0

Результати порівняльного аналізу вказують на те, що композит ZrO_2-WC суттєво перевершує традиційні матеріали за ключовими показниками. Зокрема, твердість системи досягає 17,5–19,0 ГПа, що у поєднанні з високою термостійкістю забезпечує стабільну роботу вузлів у екстремальних умовах експлуатації. Додатковий аналіз показує, що підвищення експлуатаційних характеристик композитів ZrO_2-WC обумовлено не лише сумарним внеском фазових складових, а й специфікою міжфазної взаємодії на нанорівні. Формування щільного міжфазного контакту між зернами діоксиду цирконію та карбіду вольфраму сприяє ефективному перерозподілу напружень у процесі навантаження, що зменшує локалізацію пластичних деформацій і уповільнює зародження дефектів. Встановлено, що при оптимальному співвідношенні компонентів формується структура з високим ступенем когезійної міцності, що безпосередньо впливає на довговічність матеріалу в умовах циклічного навантаження.

Окрім цього, суттєву роль відіграє механізм дисипації енергії руйнування, який реалізується через трансформаційне зміцнення тетрагональної фази ZrO_2 . Під дією зовнішніх напружень відбувається локальне фазове перетворення з утворенням моноклінної модифікації, що супроводжується об'ємним розширенням і, як наслідок, заклинюванням тріщини. У присутності твердих частинок WC цей ефект посилюється, оскільки вони виконують роль бар'єрів для поширення тріщин, формуючи складну траєкторію їх росту. Така мікромеханіка руйнування забезпечує поєднання високої твердості та достатньої тріщиностійкості, що є критичним для матеріалів, які працюють у важких умовах експлуатації.

Шляхом проведення системного аналізу фізико-технологічних чинників та оцінювання економічних параметрів обґрунтовано, що перспективним рішенням для потреб різних галузей економіки є впровадження наноструктурної кераміки системи ZrO_2-WC із високими показниками механічної стабільності. Система ZrO_2-WC поєднує в собі унікальну в'язкість руйнування діоксиду цирконію, що базується на механізмі трансформаційного зміцнення, та екстремальну твердість карбіду вольфраму.

Аналіз розробок дозволяє виділити такі ключові характеристики:

– механічна міцність та тріщиностійкість: введення WC як другої фази (у концентрації 15–30 %) створює жорсткий каркас, який стримує розвиток мікротріщин у матриці діоксиду цирконію. Ефект зміцнення підсилюється за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення фаз;

– зносостійкість в умовах інтенсивних навантажень: композити демонструють стабільну роботу в умовах сухого тертя, що збільшує ресурс вузлів у 2,5–3 рази порівняно зі стандартними сплавами. Це критично важливо для деталей тягового рухомого складу;

– термостійкість та фазова стабільність: матеріал зберігає фізико-механічні властивості при значних термічних перепадах, що дозволяє використовувати його в енергоефективних вузлах промислового обладнання та системах металообробки.

Важливим аспектом є також вплив мікроструктурної однорідності на трибологічні характеристики композиту. Дослідження показують, що зменшення розміру зерен до нанорівня сприяє формуванню більш стабільної контактної поверхні під час тертя, що знижує інтенсивність адгезійного зносу та запобігає утворенню вторинних тріщин. При цьому наявність WC забезпечує підвищену опірність абразивному зношуванню, тоді як матриця ZrO_2 компенсує крихкість системи за рахунок енергопоглинаючих механізмів. Синергетичний ефект цих факторів визначає високі експлуатаційні характеристики матеріалу в умовах змінних навантажень і температур.

Основним технологічним фактором, що визначає якість нанокompозиту, є метод синтезу. Встановлено, що використання методу електроконсолідації [1–5] дозволяє

зберегти наноструктурний стан матеріалу (у межах 60–90 нм). Це досягається завдяки надшвидкому нагріванню та прикладанню високого тиску одночасно з пропусканням електричного струму, що мінімізує ріст зерна та запобігає небажаним фазовим перетворенням.

До основних факторів експлуатаційного та технологічного впливу відносяться:

- дисперсність вихідної сировини: перехід до нанорозмірних порошків дозволяє отримати безпористу структуру з рівномірним розподілом фаз;
- режими електроконсолідації: температура та швидкість охолодження безпосередньо впливають на стабільність тетрагональної фази діоксиду цирконію;
- експлуатаційні чинники: наявність агресивних середовищ та циклічність навантажень вимагають прецизійного налаштування хімічного складу композиту для запобігання передчасної деградації поверхні.

Висновки. Системний аналіз підтверджує, що впровадження нанокompозитної кераміки ZrO_2-WC , синтезованої методом електроконсолідації, є обґрунтованим шляхом підвищення надійності транспортних систем та промислових об'єктів України. Поєднання високої в'язкості діоксиду цирконію з твердістю карбіду вольфраму дає змогу створювати матеріали, стійкі до інтенсивного кавітаційного та абразивного зносу. Оптимізація режимів швидкісного спікання під тиском забезпечує збереження наноструктурного стану фаз (60–90 нм), що дозволяє отримати твердість до 19 ГПа та робочу температуру до 950 °С. Це гарантує збільшення міжремонтного ресурсу критичних вузлів у 2,5–3 рази порівняно з традиційними твердими сплавами. Отримані результати мають практичну цінність для машинобудування і можуть бути інтегровані у виробничі плани для покращення характеристик продукції, що є економічно доцільним при відновленні промислових потужностей держави. Застосування імітаційного моделювання у поєднанні з методами електроконсолідації відповідає вимогам Smart Industry та створює умови для випуску енергоефективних складників, що сприятиме зміцненню технологічної незалежності України в післявоєнний період.

Перелік посилань

1. Hevorkian E., Samociuk W., Rucki M., Krzysiak Z., Pieniak D., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Lytovchenko S., Chalko L., Morozow D., Caban J., Kulich V. Microstructure and properties of binderless μWC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*. 2025. Vol. 18, Iss. 20. 4646. <https://doi.org/10.3390/ma18204646>.
2. Hevorkian E. S., Nerubatskyi V. P., Rucki M., Kilikevicius A., Mamalis A. G., Samociuk W., Morozow D. Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 100–113. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>.
3. Hevorkian E. S., Nerubatskyi V. P., Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Prokopiv M. M., Samociuk W., Mechnik V. A. Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, Iss. 5. P. 364–375. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
4. Nerubatskyi V. P., Vovk R. V., Gzik-Szumiata M., Gevorkyan E. S. Investigation of the effect of silicon carbide nanoadditives on the structure and properties of microfine corundum during electroconsolidation. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, No. 4. P. 540–546. <https://doi.org/10.1063/10.0017596>.
5. Morozova O. M., Martyrosyan S. R., Nerubatskyi V. P. The determination of the dependence of mechanical characteristics of $ZrO_2-3 \text{ wt}\% Y_2O_3$ on the sintering mode of ceramics moulding by electroconsolidation method. *Матеріали 4-ї міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології»* (Харків, УкрДУЗТ, 27–28 листопада 2023 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 329–330.

УДК 669.187.56.001.1

Віталій Порохонько к.т.н.¹; Євгеній Тітков PhD¹; Тарас Майданчук к.т.н.¹; Сергій Мариненко к.т.н.²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ВПЛИВ ТЕРМОЦИКЛІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МІКРОСТРУКТУРНУ ЕВОЛЮЦІЮ СПЛАВУ TiNi, ОТРИМАНОГО МЕТОДОМ МАГНІТОКЕРОВАНОЇ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ПЛАВКИ

Анотація. У роботі досліджено вплив термоциклічної обробки на мікроструктуру сплаву TiNi складу 45Ti–55Ni (мас. %), отриманого методом магнітокерованої електрошлакової плавки. Показано, що термоциклювання у температурному інтервалі 550–1050 °C сприяє підвищенню дисперсності та однорідності структури. Встановлено, що ефективність термоциклічної обробки визначається температурним діапазоном, кількістю циклів, тривалістю витримки та швидкістю охолодження.

Ключові слова: нікелід титану, TiNi, термоциклічна обробка, магнітокерована електрошлакова плавка, мікроструктура, ефект пам'яті форми.

Vitalii Porokhonko PhD, Yevgen Titkov PhD, Taras Maydanchuk PhD, Serhii Marynenko PhD

EFFECT OF THERMAL CYCLING TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF TiNi ALLOY PRODUCED BY MAGNETICALLY CONTROLLED ELECTROSLAG REMELTING

Abstract. The influence of thermal cycling treatment on the microstructure of TiNi alloy produced by magnetically controlled electroslag remelting was investigated. It was shown that thermal cycling within the temperature range of 550–1050 °C promotes grain refinement and improves structural homogeneity. The efficiency of thermal cycling depends on the temperature range, number of cycles, holding time and cooling rate.

Keywords: TiNi alloy, thermal cycling treatment, electroslag remelting, microstructure, shape memory alloys.

Сплави системи Ti–Ni належать до класу функціональних матеріалів з ефектом пам'яті форми та надпружністю. Їх унікальні властивості обумовлені оборотними мартенситними перетвореннями між аустенітною та мартенситною фазами. Завдяки цьому сплави TiNi широко застосовуються у біомедичній техніці, авіакосмічній галузі, робототехніці та інтелектуальних конструкціях.

Разом із тим отримання структурно однорідних сплавів TiNi залишається складною технологічною задачею. У литому стані структура нікеліду титану характеризується наявністю вторинних фаз Ti₂Ni, TiNi₃ та інших інтерметалідних утворень, які негативно впливають на функціональні властивості матеріалу, кінетику мартенситних перетворень та характеристики ефекту пам'яті форми.

Одним із перспективних способів підвищення хімічної однорідності сплавів TiNi є використання магнітокерованої електрошлакової плавки (МЕП). Однак навіть при використанні електрошлакових технологій необхідні додаткові методи керування мікроструктурою матеріалу.

Метою даної роботи є оцінка можливості використання термоциклічної обробки для керування мікроструктурою сплаву TiNi, отриманого методом магнітокерованої електрошлакової плавки.

Зливки сплаву TiNi номінального складу 45Ti–55Ni (мас. %) отримували методом МЕР в атмосфері аргону з використанням витратних електродів. Як вихідні компоненти застосовували губчастий титан ТГ-90 та нікель марки НП-2. Для підвищення хімічної однорідності металу отримані зливки піддавали повторному переплаву.

Після повторного переплаву зливки піддавали гарячій деформації шляхом осадки на гідравлічному пресі з подальшою прокаткою. Деформацію здійснювали при температурах 800–950 °С із сумарним ступенем деформації близько 75 %.

Із деформованих заготовок виготовляли зразки для термоциклічної обробки. Термоциклювання здійснювали у температурному інтервалі 550–1050 °С. Кількість циклів становила 19–21, тривалість витримки — 15–30 хв. Охолодження після кожного циклу здійснювали переважно у воді.

Мікроструктурний аналіз показав суттєвий вплив термоциклічної обробки на структуру сплаву TiNi. Зразки без термоциклювання характеризувалися більш крупнозернистою та менш однорідною структурою. Після термоциклічної обробки спостерігалось подрібнення структурних елементів та підвищення рівномірності їх розподілу.

Встановлено, що після термоциклічної обробки зменшується розмір округлих структурних утворень, які виявляються після травлення, а також зростає дисперсність структури загалом. Межі окремих зерен стають менш вираженими, що може свідчити про інтенсифікацію процесів структурної перебудови.

Одночасно у структурі після термоциклювання спостерігалися окремі крупні утворення трикутної та чотирикутної форми. Їх кількість та розміри залежали від режимів термоциклічної обробки. Імовірно, зазначені утворення можуть бути пов'язані з локальним виділенням вторинних інтерметалідних фаз або карбідних та оксидних включень, формування яких активізується під час циклічного температурного впливу. Для остаточного визначення природи цих структур необхідне проведення додаткових фазових досліджень із використанням методів рентгеноструктурного аналізу та локального мікрорентгеноспектрального аналізу.

На підставі отриманих результатів і літературних даних можна припустити, що спостережуване подрібнення структури зумовлене комплексною дією кількох механізмів. Одним із них є активація дифузійних процесів під час повторюваних циклів нагрівання та охолодження. Температурна нестаціонарність сприяє перерозподілу легувальних елементів і частковому розчиненню вторинних фаз.

Іншим важливим фактором є циклічна генерація дефектів кристалічної ґратки — вакансій, дислокацій та внутрішніх напружень. У сплавах TiNi додатковий внесок у структурну еволюцію здійснюють мартенситні перетворення, які супроводжуються локальними деформаціями кристалічної ґратки. Повторювані фазові переходи можуть сприяти формуванню нових центрів кристалізації та подрібненню структури.

Імовірний механізм подрібнення структури при термоциклюванні можна представити у вигляді послідовності:

Нагрівання → активація дифузії → фазові перетворення → генерація дефектів → охолодження → формування нових центрів кристалізації → подрібнення структури.

Результати проведених досліджень свідчать, що ефективність термоциклічної обробки значною мірою визначається температурним діапазоном термоциклювання, кількістю циклів, тривалістю витримки та швидкістю охолодження металу після кожного циклу.

Термоциклювання доцільно здійснювати окремими серіями циклів зі ступінчастою зміною температур. При цьому поступове зниження температур окремих

серій може сприяти подрібненню структури та підвищенню структурної однорідності матеріалу.

Таким чином, термоциклічна обробка може розглядатися як перспективний технологічний метод керування мікроструктурою та властивостями сплавів TiNi, отриманих методом магнітокеруваної електрошлакової плавки.

Перелік посилань

1. Fischer R. L., Losco E. F., Lustman B. Phase transformation bonding of metal members : Patent USA № 3025592. Publ. 20.03.1962.
2. Макара А. М., Назарчук А. Т. Про механізм дифузійного зварювання та підвищення якості з'єднань // Автоматичне зварювання. 1969. № 2. С. 29–34.
3. Макара А. М., Назарчук А. Т., Лариков Л. Н., Фальченко Ф. М. Використання температурної нестационарності при дифузійному зварюванні // Фізика і хімія обробки матеріалів. 1972. № 3. С. 115–119.
4. Гордієнко А. І., Івашко В. В. Фазова перекристалізація титанових сплавів при термоциклічній обробці // Ti-2011 в СНД : праці міжнародної конференції. Львів, 2011. С. 418–423.
5. Коваль Ю. М. Сплави з ефектом пам'яті форми — потужний клас функціональних матеріалів // Наука та інновації. 2005. Т. 1, № 2. С. 80–95.
6. Коллеров М. Ю., Александров А. В., Кузнецов С. Ю. та ін. Вплив методу та технології плавки на структуру і властивості злиwkів на основі нікеліду титану // Титан. 2011. № 2(32). С. 22–28.
7. Лотков А. І., Заводчиков С. Ю., Котрехов В. А. та ін. Мікроструктура та фазовий склад злиwkів нікеліду титану, отриманих в установці з холодним тиглем // Ti-2011 в СНД : матеріали міжнародної конференції. Львів, 2011. С. 223–233.
8. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys // Progress in Materials Science. 2005. Vol. 50, No. 5. P. 511–678.
9. Ma J., Karaman I., Noebe R. D. High temperature shape memory alloys // International Materials Reviews. 2010. Vol. 55, No. 5. P. 257–315.
10. Frenzel J., George E. P., Dlouhy A. et al. Influence of Ni on martensitic phase transformations in NiTi shape memory alloys // Acta Materialia. 2010. Vol. 58, No. 9. P. 3444–3458.
11. Gall K., Sehitoglu H., Chumlyakov Y. I., Kireeva I. V. Tension-compression asymmetry of the stress-strain response in aged single crystal and polycrystalline NiTi // Acta Materialia. 1999. Vol. 47, No. 4. P. 1203–1217.
12. Khalil-Allafi J., Dlouhy A., Eggeler G. Ni₄Ti₃-precipitation during aging of NiTi shape memory alloys and its influence on martensitic phase transformations // Acta Materialia. 2002. Vol. 50, No. 17. P. 4255–4274.
13. Li B., Rong L. J., Li Y. Y. Microstructure evolution and mechanical properties of NiTi shape memory alloys processed by severe plastic deformation // Materials Science and Engineering A. 2000. Vol. 438–440. P. 738–741.
14. Zhou S., Zhang Y., Wang D. Microstructure control and phase transformation behavior of NiTi alloys subjected to thermomechanical treatment // Journal of Alloys and Compounds. 2012. Vol. 509. P. 770–775.

УДК 620.178.16:539.3

Павло Присяжнюк¹, д.т.н., проф.; Сергій Мариненко², к.т.н., доц.; Людмила Бодрова², к.т.н., доц.; Галина Крамар², к.т.н., доц.; Олег Гурик², к.т.н., доц.; Ігор Коваль², к.т.н., доц.

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

СПЕКТРАЛЬНІ ФУНКЦІОНАЛИ ТЕНЗОРА ПРУЖНОЇ ЖОРСТКОСТІ ЯК ФІЗИЧНО ОБҐРУНТОВАНА ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТВЕРДОСТІ ТА СПРЯМОВАНОГО ПОШУКУ КРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУР

Анотація. Запропоновано фізично мотивовану модель прогнозування твердості за Віккерсом H_V на основі спектральних функціоналів тензора пружної жорсткості $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_6$. Двопараметричне співвідношення $H_V = 0.123 \cdot \lambda_{\text{harm}}^{0.874} \cdot CV^{-0.927}$ (де λ_{harm} — гармонічне середнє власних значень, CV — коефіцієнт варіації власних значень) досягає $R^2 = 0.911$ та MAE = 3.91 ГПа на 84 кристалічних структурах, перевершуючи Teter, Tian і Mazhnik–Oganov без VRH-усереднення. На основі власних векторів тензора запропоновано метод EDE (Eigenvalue-Directed Exploration) - спрямований за властивостями пошук кристалічних структур: у системі Nb–В відновлено 3 з 6 відомих фаз із точною просторовою групою та сформовано у 3 рази більшу структурну різноманітність (74 проти 25 унікальних просторових груп), ніж у еволюційному пошуку USPEX.

Ключові слова: твердість за Віккерсом, тензор пружної жорсткості, власні значення, MLIP, GRACE, спектральний функціонал, пошук кристалічних структур, метод EDE.

Pavlo Prisyazhnyuk, Serhii Marynenko, Liudmyla Bodrova, Halyna Kramar, Oleh Huryk, Ihor Koval

SPECTRAL FUNCTIONALS OF THE ELASTIC STIFFNESS TENSOR AS A PHYSICALLY GROUNDED BASIS FOR HARDNESS PREDICTION AND DIRECTED CRYSTAL STRUCTURE SEARCH

Abstract. We propose a physically motivated model for Vickers hardness prediction H_V based on spectral functionals of the elastic stiffness tensor $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_6$. A two-parameter relation $H_V = 0.123 \cdot \lambda_{\text{harm}}^{0.874} \cdot CV^{-0.927}$ (where λ_{harm} is the harmonic mean of eigenvalues and CV is the coefficient of variation of eigenvalues) achieves $R^2 = 0.911$ and MAE = 3.91 GPa on 84 crystal structures, outperforming Teter, Tian, and Mazhnik–Oganov without VRH averaging. Based on eigenvectors of the stiffness tensor we propose the EDE method (Eigenvalue-Directed Exploration) — a property-directed crystal-structure search: in the Nb–B system, EDE recovered 3 of 6 known phases with exact space group and produced 3× greater structural diversity (74 vs. 25 unique space groups) than the USPEX evolutionary search.

Keywords: Vickers hardness, elastic stiffness tensor, eigenvalues, MLIP, GRACE, spectral functional, crystal structure prediction.

Прогнозування твердості за Віккерсом (H_V) з першопринципних розрахунків є актуальним завданням, оскільки експериментальне вимірювання залежить від конкретних умов навантаження та якості зразка. Класичні моделі — Teter ($H_V = 0.151 \cdot G$), Tian ($H_V = 0.92 \cdot (G/B)^{1.137} \cdot G^{0.708}$) та Mazhnik–Oganov (з використанням G , B , ν) — використовують лише дві з шести незалежних характеристик пружності, втрачаючи інформацію про анізотропію, та потребують усереднення Voigt–Reuss–Hill.

Тензор пружної жорсткості C (6×6 у нотації Фойгта) кодує спрямований опір деформації через шість власних значень $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_6$ та шість власних векторів. Умова механічної стабільності (Born–Huang) еквівалентна $\lambda_i > 0$ для всіх i . Власні значення задають масштаб жорсткості та її спектральний розподіл, власні вектори — фізично виокремлені моди деформації, що формують орієнтовану картину анізотропії.

Тензори пружності розраховано за допомогою потенціалу GRACE-2L [5] для 45 матеріалів. Структури релаксовано до сил $<10^{-3}$ eВ/Å та напружень <0.01 ГПа, після чого виконано розрахунок тензора пружності методом скінченних різниць ($\pm 0.5\%$ деформації). Значення твердості за Віккерсом запозичено з першоджерел: Pierson (1996), Kimm et al. (2019), оригінальна література.

Визначено два класи дескрипторів. Масштабні дескриптори — загальна жорсткість: $\lambda_{harm} = 6/\sum \lambda_i^{-1}$; $\langle \lambda \rangle = \sum \lambda_i / 6$; $\lambda_{geom} = (\prod \lambda_i)^{1/6}$; $\lambda_{min} = \lambda_1$; $\sigma = \sqrt{(\sum (\lambda_i - \langle \lambda \rangle)^2) / 6}$. Дескриптори анізотропії — спектральна нерівномірність: $CV = \sigma / \langle \lambda \rangle$ (коефіцієнт варіації власних значень); $S_{norm} = -\sum p_i \cdot \ln(p_i) / \ln(6)$; $PR = (\sum \lambda_i)^2 / (6 \cdot \sum \lambda_i^2)$; $\lambda_{harm} / \langle \lambda \rangle$; $\lambda_{min} / \lambda_{max}$; $\sigma(\ln \lambda)$.

Три класичні моделі (Teter, Tian, Mazhnik–Oganov) використано як еталон, обчислені з VRH-усереднених модулів на тих самих тензорах GRACE. Сліпий тест перенесення виконано на незалежних тензорах DFT/PBE (VASP+VASPKIT) для 12 матеріалів.

Модель CV- λ досягає найвищого $R^2 = 0.911$, найнижчого $AIC_c = 159.7$ та найменшого MAE = 3.91 ГПа серед 13 порівняних моделей:

$$H_V = 0.123 \cdot \lambda_{harm}^{0.874} \cdot CV^{-0.927} \quad [\text{ГПа}; \lambda_{harm} \text{ в ГПа}]$$

Показник $b \approx 0.87$ при λ_{harm} означає, що жорсткіші матеріали прогноуються твердішими; показник $c \approx -0.93$ при CV є штрафом за анізотропію. Двопараметрична модель найслабшої ланки ($H_V \approx 0.101 \cdot \lambda_{min}^{1.077}$; $R^2 = 0.889$) перевершує всі класичні моделі. Крос-валідація підтвердила надійне узагальнення ($CV R^2 = 0.826 \pm 0.119$).

Всі дескриптори анізотропії виявилися еквівалентними: $r(CV, 1-PR)=1.000$; $r(CV, 1-S_{norm})=0.962$; $r(1-\lambda_{harm}/\langle \lambda \rangle, \sigma(\ln \lambda))=0.999$. Чотири матеріали демонструють систематичні відхилення $|\Delta H| > 10$ ГПа в усіх моделях: WC (+11.4, базисне ковзання), RuB₂ (+14.5, слабке ковалентне зв'язування Ru–B), V₄C (–14.0, ікосаедральне зв'язування), VC (–11.1) та CrB₂ (–11.2), що підтверджує обмеженість пружних тензорів у кодуванні бар'єрів зародження дислокацій.

Порівняння з DFT/PBE показало, що GRACE систематично перевершує DFT як вхід для всіх 13 моделей (ΔMAE від -0.25 до -2.98 ГПа на користь GRACE).

Власні вектори тензора $C = VI V^T$ визначають головні деформаційні моди. Власний вектор v_1 , що відповідає λ_{min} , ідентифікує найм'якший пружний мод — напрямок деформації з найменшою жорсткістю, вздовж якого кристалічна ґратка чинить мінімальний опір. З точки зору енергетичного ландшафту, це найімовірніший напрямок переходу до сусіднього басейну.

Метод EDE реалізовано у вигляді ітераційного алгоритму: (i) обчислення тензора пружності; (ii) ідентифікація найм'якшого власного моду; (iii) застосування скінченної деформації вздовж \hat{v}_k з адаптивною амплітудою $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot (\lambda/\lambda_k)^{1/2}$; (iv) повторна релаксація та оцінка; (v) прийом, якщо композитна оцінка $S = H_V - \alpha \cdot \max(0, E_i)$ покращується (E_i — енергія структури над опуклою оболонкою стабільності; α — штрафний коефіцієнт за метастабільність). Ітерація генерує фізично мотивований спрямований маршрут у конфігураційному просторі.

Апробацію проведено на системі Nb–B [8]: кампанія з 1000 кроків EDE (калькулятор GRACE-2L) порівнювалась із еволюційним пошуком USPEX [6] (~800

структур, MLIP Mattersim). EDE відновив 3 з 6 відомих фаз із точною просторовою групою (NbB_2 $P6/mmm$, NbB $Cmcm$, Nb_3B_2 $P4/mbm$) та сформував у 3 рази більшу структурну різноманітність (74 проти 25 унікальних просторових груп). USPEX відновив 5 з 5 відомих стехіометрій за базою OQMD [7], але жодної фази з точною просторовою групою — тобто EDE та USPEX оцінювалися за різними метриками (фази з точною симетрією vs стехіометричні склади), і EDE кращий саме у відтворенні симетрії, а USPEX — у виявленні стехіометрій.

Два показові траєкторії EDE ілюструють механізм: зерно V_4Nb_4 з трьома від'ємними власними значеннями зсуву ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = -28.8$ ГПа) перетворилось у відому фазу NbB ($Cmcm$, $H_V = 30.4$ ГПа) лише за три прийнятих кроки. Зерно V_8Nb_4 із майже нульовим власним значенням ($\lambda_1 = 0.63$ ГПа) досягло NbB_2 ($P6/mmm$, $H_V = 27.2$ ГПа) за два кроки.

Висновки: 1. Модель CV- λ досягає $R^2 = 0.911$ і MAE = 3.91 ГПа, перевершуючи Teter ($\Delta R^2 = +0.093$), Tian (+0.034) та Mazhnik–Oganov (+0.056); потребує лише діагоналізації матриці без VRH-усереднення.

2. Двопараметрична модель найслабшої ланки $H_V = 0.101 \cdot \lambda_{min}^{1.077}$ ($R^2 = 0.889$) перевершує всі класичні моделі.

3. Всі дескриптори анізотропії (CV, спектральна ентропія, PR) корельовані при $r > 0.96$ — результат інваріантний відносно вибору міри дисперсії.

4. Власні вектори тензора жорсткості визначають фізично мотивовані напрямки пошуку у просторі кристалічних структур. Метод EDE у системі Nb–B відновив 3 з 6 відомих фаз із точною просторовою групою та сформував у 3 рази більшу структурну різноманітність (74 проти 25 унікальних просторових груп), ніж еволюційний пошук USPEX, виявляючи тверді кандидати, пропущені енергетично-орієнтованим пошуком. Це закладає новий парадигматичний підхід до прогнозування кристалічних структур, спрямованого за властивостями.

Перелік посилань

1. Teter D.M. Computational alchemy: The search for new superhard materials. MRS Bull. 1998. Vol. 23. P. 22–27. <https://doi.org/10.1557/S0883769400031420>

2. Tian Y., Xu B., Zhao Z. Microscopic theory of hardness and design of novel superhard crystals. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 2012. Vol. 33. P. 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2012.02.021>

3. Mazhnik E., Oganov A.R. A model of hardness and fracture toughness of solids. J. Appl. Phys. 2019. Vol. 126. P. 125109. <https://doi.org/10.1063/1.5113622>

4. Prysazhnyuk P., Di Tommaso D. The thermodynamic and mechanical properties of $\text{Mo}_2(\text{Fe},\text{Mn})\text{B}_2$ solid solutions. Materials Advances. 2023. Vol. 4. P. 3822–3838. <https://doi.org/10.1039/d3ma00313b>

5. Lysogorskiy Y., Bochkarev A., Drautz R. Graph atomic cluster expansion for foundational machine learning interatomic potentials. arXiv:2508.17936. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.17936>

6. Oganov A.R., Glass C.W. Crystal structure prediction using ab initio evolutionary techniques. J. Chem. Phys. 2006. Vol. 124. P. 244704. <https://doi.org/10.1063/1.2210932>

7. Kirklin S. et al. The open quantum materials database (OQMD). npj Comput. Mater. 2015. Vol. 1. P. 15010. <https://doi.org/10.1038/npjcompumats.2015.10>

8. Prysazhnyuk P. Spectral Functionals of the Elastic Stiffness Tensor as a Physically Grounded Basis for Hardness Prediction and Directed Crystal Structure Search (Version v1). Zenodo. 2026. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19427619>

УДК 620.178.16:539.62

Павло Присяжнюк, д.т.н., проф.; Андрій Харлов

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

МІКРОМЕХАНІЧНО ОБҐРУНТОВАНИЙ ІНДЕКС РІЖУЧОЇ КРИВИНИ ЧАСТИНОК АБРАЗИВУ ТА КІНЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРИВАЛОСТІ ПРИСКОРЕНИХ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Анотація. Запропоновано новий безрозмірний індекс ефективної ріжучої кривини κ^* , який поєднує три мікромеханічно інтерпретовані дескриптори геометрії піків контуру абразивної частинки. На вибірці $n=200$ частинок карбіду кремнію SiC 64C встановлено, що домінуючим компонентом є висота виступу h_{ax} (ρ Спірмена = $-0,51$); зведений індекс κ^* дає $\rho=-0,46$. Методом прямого підгону кінетичних даних визначено характеристичний час релаксації $\tau_{\square}=24$ хв і, відповідно, оптимальну тривалість прискорених випробувань $\tau^*=\tau_{\square} \cdot \ln 20 \approx 72$ хв.

Ключові слова: абразивне зношування, дескриптори форми, еліптичні перетворення Фур'є, кінетична модель, прискорені трибологічні випробування.

Pavlo Prisyazhnyuk, Andrii Kharlov

MICROMECHANICALLY GROUNDED CUTTING-CURVATURE INDEX OF ABRASIVE PARTICLES AND A KINETIC MODEL FOR THE OPTIMAL DURATION OF ACCELERATED TRIBOLOGICAL TESTS

Abstract. A new dimensionless effective cutting curvature index κ^* combining three micromechanically interpretable descriptors of abrasive particle contour peaks is proposed. On a sample of $n=200$ SiC 64C particles, the dominant component is shown to be the protrusion height h_{ax} (Spearman $\rho=-0.51$); the composite κ^* yields $\rho=-0.46$. Direct fitting of wear-rate kinetics gives the characteristic relaxation time $\tau_{\square}=24$ min and optimal accelerated test duration $\tau^* \approx 72$ min.

Keywords: abrasive wear, shape descriptors, elliptic Fourier descriptors, kinetic model, accelerated tribological testing.

Зношування деталей машин під дією вільного абразиву є одним з найпоширеніших механізмів виходу з ладу робочих органів гірничого, нафтогазового та будівельного обладнання. Раціональний вибір матеріалів для покриттів і наплавлення в умовах абразивного зношування вимагає надійної методики лабораторного скринінгу, яка б відтворювала умови реального контакту й водночас не потребувала надмірного часу [1, 2].

Стандартні методики (ASTM G65, ГОСТ 23.208) передбачають тривалість досліду 30–60 хв за безперервного оновлення абразиву. Проте, якщо на виробничому стенді реалізувати циркуляцію одного об'єму абразивної маси через зону тертя, кінетика інтенсивності зношування $I(\tau)$ набуває двостадійного характеру з чітко вираженим характеристичним часом релаксації τ_{\square} . Знання τ_{\square} дає змогу аналітично обчислити оптимальну тривалість прискореного досліду τ^* , яка забезпечує кінетичне насичення без надлишкового часу [3].

Паралельно з кінетичним аспектом залишається відкритим питання кількісного опису зміни морфології абразивних частинок у процесі тертя. Параметр SPLm, запропонований у [3] на основі підходів до опису форми абразивних частинок [8],

демонструє кореляцію з інтенсивністю зношування для різних класів абразивів ($R^2=0,92$), але є агрегованим скаляром без прозорої мікромеханічної інтерпретації. В даній роботі запропоновано трійку дескрипторів $\{h_{ax}, \beta_{ax}, \rho_i\}$ та зведений індекс k^* , складові якого безпосередньо відповідають трьом мікромеханічним режимам контактної взаємодії.

Досліди проводили на машині для тертя за схемою "плоский зразок – обертовий гумовий ролик" з подачею абразиву в зону контакту у режимі циркуляції (модифікація установки [3]). Зразки виготовлені зі сталі 40 (ДСТУ 7809:2015) без термічної обробки, шорсткість $Ra \leq 1,25$ мкм. Абразив – порошок карбиду кремнію марки 64С зернистістю F100 (FEPA 42-1), $d_{50} \approx 125$ мкм, вміст SiC $\geq 98,5$ %. Параметри досліду: питоме навантаження $P=5$ МПа, лінійна швидкість поверхні ролика $v \approx 16$ м/хв, тривалість одного циклу 25 хв, загальна кількість циклів 33 (825 хв).

Для морфологічного аналізу мікрофотографії частинок отримано на мікроскопі МБС-2 з цифровою камерою eTREK UCOS 5100. З усієї вибірки відібрано по $n=50$ частинок на кожній з чотирьох стадій (0, 250, 500 та 825 хв), всього $n=200$. Бінаризацію зображень виконано в ImageJ 1.50g методом Оцу; субпіксельний контур екстраговано двовимірним аналогом (marching squares) алгоритму marching cubes [4]; дескриптори обчислено з аналітичної кривини еліптичної реконструкції Фур'є з $N=20$ гармоніками [5].

Трійка дескрипторів для i -го піка включає: висоту виступу h_i (відстань від апексу до хорди при $\pm 2,5\%$ нормованої довжини дуги), кут повороту дотичної через пік $\beta_i \in [0, \pi]$, та мінімальний радіус кривини ρ_i . Зведений індекс k^* формується за формулою:

$$k^* = (1/K) \cdot \sum_i \sin(\beta_i/2) \cdot (h_i/\rho_i),$$

де підсумовування ведеться по $K=5$ найгостріших пікам. Фізичний сенс множників: $\sin(\beta_i/2)$ – кутова характеристика гостроти (нуль для гладкої поверхні, одиниця для ідеально гострого піку); h_i/ρ_i – безрозмірне відношення висоти "різця" до радіуса його тіла, аналог критичного кута атаки в моделях Малхірна–Самуелса [6] та Седрікса–Малхірна [7].

Якісний аналіз мікрофотографій підтверджує прогресивне заокруглення частинок SiC зі збільшенням часу досліду: початковий полідральний габітус з кристалографічно визначеними гострими ребрами поступово трансформується в більш ізометричний. Ранжування дескрипторів за коефіцієнтом кореляції Спірмена з тривалістю досліду τ наведено у табл. 1.

Найсильнішим предиктором стадії є глобальний дескриптор округлості $R=4\pi A/L^2$ ($\rho=+0,80$, $p<10^{-30}$). Серед локальних дескрипторів домінує висота виступу h_{ax} ($\rho=-0,51$, $p<10^{-13}$); зведений k^* дає $\rho=-0,46$, порівняно з $\rho=-0,48$ для канонічного SPLm [3]. Статистична потужність k^* і SPLm є практично еквівалентною, однак трійка $\{h_{ax}, \beta_{ax}, \rho_i\}$ зберігає доступ до окремих мікромеханічних складових, тоді як SPLm є нерозкладним скаляром.

Кінетика інтенсивності зношування $I(\tau)$ описується двопараметричним рівнянням:

$$I(\tau) = I_\infty + (I_0 - I_\infty) \cdot \exp(-\tau/\tau_0),$$

Підгін до 33 експериментальних точок (інтервали по 25 хв) дав: $I_0=47,34 \pm 3,82$ мг/хв; $I_\infty=6,96 \pm 0,24$ мг/хв; $\tau_0=24,0 \pm 2,9$ хв; $R^2=0,927$. Оптимальну тривалість

прискорених випробувань визначено з умови падіння похідної $|dI/dt|$ до 5% початкового значення $|dI/dt|_0$:

$$\tau^* = \tau_0 \cdot \ln(1/0,05) = \tau_0 \cdot \ln 20 \approx 72 \text{ хв.}$$

Таблиця 1. Кореляція Спірмена дескрипторів форми з тривалістю досліду (n=200)

Дескриптор	ρ (Спірмен)	p	Примітка
$R = 4\pi A/L^2$	+0,796	$< 10^{-30}$	Найсильніший предиктор
L/L_eq	-0,796	$< 10^{-30}$	
solidity	+0,678	$< 10^{-30}$	
convexity	+0,529	$< 10^{-15}$	
h_{ax}	-0,510	$< 10^{-13}$	Домін. локальний дескриптор
SPLm (EFD, N=50)	-0,481	$6 \cdot 10^{-13}$	Метод [3]
$\kappa^*_{o} - 5$	-0,457	10^{-11}	Запропонований індекс
eccentricity	-0,432	$< 10^{-9}$	
AR	-0,349	$< 10^{-6}$	
β_{ax}	-0,267	$1,4 \cdot 10^{-4}$	Компонент трійки
ρ_{i}	+0,236	$8 \cdot 10^{-4}$	Компонент трійки
η_{HF}	+0,073	0,30 (н.з.)	Незначущий

Виявлено двомасштабну структуру кінетики: швидкий процес адаптації контактної геометрії з $\tau \approx 24$ хв та повільна еволюція морфології абразиву з $\tau_{or} \gg \tau$. Розв'язання цих масштабів обґрунтовує $\tau^* \approx 3\tau$ як операційно виправданий критерій тривалості: до цього моменту перехідний процес повністю завершений, а повільний дрейф морфології ще не вносить суттєвого вкладу в I(τ).

Порівняно зі стандартом ASTM G65 (Procedure A, 30 хв), тривалість $\tau^*=72$ хв при циркуляції абразиву відповідає глибшому ступеню кінетичного насичення (5% vs $\sim 28\%$ від $|dI/dt|_0$). Для практичного скринінгу наплавочних матеріалів [1, 2] вибір τ^* забезпечує: (а) зниження похибки ранжування до $\leq 5\%$ за побудовою критерію; (б) збільшення пропускної здатності лабораторії у $\sim 2,4$ рази при незмінних ресурсах порівняно з 30-хвилинним протоколом; (в) прив'язку тривалості досліду до єдиної вимірюваної фізичної константи τ .

ВИСНОВКИ

1. Запропонована трійка дескрипторів $\{h_{ax}, \beta_{ax}, \rho_{i}\}$ та зведений індекс κ^* , обчислені з аналітичної кривини еліптичної реконструкції Фур'є, забезпечують мікромеханічно прозору інтерпретацію режимів контактної взаємодії (мікрорізання vs пластичне витіснення) відповідно до моделей Малхірна–Самуелса і Седрікса–Малхірна.

2. На вибірці n=200 частинок SiC встановлено: h_{ax} є домінуючим компонентом трійки ($\rho=-0,51$); зведений κ^* ($\rho=-0,46$) та канонічний SPLm ($\rho=-0,48$) статистично

еквівалентні, але κ^* зберігає розкладуваність по фізичних складових. Глобальний дескриптор $R=4\pi A/L^2$ залишається найпотужнішим одновимірним предиктором стадії ($\rho=+0,80$).

3. Двопараметрична кінетична модель $I(\tau) = I_\infty + (I_0 - I_\infty) \cdot \exp(-\tau/\tau_\square)$ апроксимує 33 точки з $R^2=0,927$ та дає $\tau_\square=24,0\pm 2,9$ хв. Оптимальна тривалість прискорених випробувань $\tau^*=\tau_\square \cdot \ln 20 \approx 72$ хв обґрунтована умовою падіння $|dI/d\tau|$ до 5% початкового значення.

4. Виявлена двомасштабна кінетична структура ($\tau_\square \approx 24$ хв для формування контактної геометрії та $\tau_{\square_{ор}} \gg \tau_\square$ для еволюції морфології абразиву) є фізичним обґрунтуванням вибору $\tau^* \approx 3\tau_\square$ як критерію тривалості для скринінгу зносостійких покриттів і наплавлень.

Перелік посилань

1. Shihab T.A., Prysyzhnyuk P.M. et al. Increasing of durability of mechanical seals of oil and gas centrifugal pumps using tungsten-free cermet with Cu-Ni-Mn binder. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741, No. 1, p. 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012031>

2. Prysyzhnyuk P., Bembenek M. et al. Restoration of the Impact Crusher Rotor Using FCAW with High-Manganese Steel Reinforced by Complex Carbides. *Management Systems in Production Engineering*. 2024. Vol. 32, No. 2. P. 294–302. <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0028>

3. Lutsak D., Prysyzhnyuk P., Burda M., Aulin V. Development of a method and an apparatus for tribotechnical tests of materials under loose abrasive friction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, No. 7(83). P. 19–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79913>

4. Lorensen W.E., Cline H.E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1987. Vol. 21, No. 4. P. 163–169. <https://doi.org/10.1145/37402.37422>

5. Kuhl F.P., Giardina C.R. Elliptic Fourier features of a closed contour. *Computer Graphics and Image Processing*. 1982. Vol. 18, No. 3. P. 236–258. [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90034-X)

6. Mulhearn T.O., Samuels L.E. The abrasion of metals: A model of the process. *Wear*. 1962. Vol. 5, No. 6. P. 478–498. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(62\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(62)90064-9)

7. Sedriks A.J., Mulhearn T.O. Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes. *Wear*. 1963. Vol. 6, No. 6. P. 457–466. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90281-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90281-3)

УДК 669.295:621.793:620.178.162.4

Михайло Студент, проф., д.т.н.; Олександр Лук'яненко, ст. досл., к.т.н.;
Олександра Студент, проф., д.т.н.; Володимир Гвоздецький, ст. досл., д.т.н.; Василь
Труш, ст. досл., д.т.н.; Христина Задорожна стар. к.т.н.,
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВУ VT6 ПІСЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДИФУЗІЙНИМ НАСИЧЕННЯМ АЗОТОМ ТА КИСНЕМ У ДИНАМІЧНОМУ ВАКУУМІ

Продемонстровано покращення трибологічних властивостей титанового сплаву VT6 в умовах сухого тертя після його поверхневого зміцнення шляхом дифузійного насичення азотом або киснем у динамічному вакуумі.

Ключові слова: титановий сплав VT6, поверхнєве зміцнення, дифузійне насичення, трибологічні характеристики, сухе тертя

Mykhaylo Student, Prof., D.Eng.Sc., Alexander Luk'yanenko, senior researcher, Cand. Sc. in Tech., Oleksandra Student, Prof., D.Eng.Sc., Volodymyr Hvozdetzkyi, senior researcher, D.Eng.Sc., Vasyl Trush, senior researcher, D.Eng.Sc., Khrystyna Zadorozhna, Cand. Sc. in Tech.

PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE VT6 ALLOY AFTER SURFACE HARDENING BY DIFFUSION SATURATION WITH NITROGEN AND OXYGEN IN A DYNAMIC VACUUM

Improvement in the tribological properties of VT6 titanium alloy under dry friction conditions was demonstrated after surface-layer diffusion saturation with nitrogen or oxygen under dynamic vacuum.

Keywords: VT6 titanium alloy, tribological properties, dry friction, surface hardening, diffusion saturation with nitrogen or oxygen.

Подальший розвиток авіакосмічної техніки та енергомашинобудування неможливий без підвищення надійності вузлів тертя, що працюють у складних силових умовах без примусового змащування. Високі питома міцність та корозійна стійкість титанового сплаву VT6 (Ti-6Al-4V) робить його одним із перспективних конструкційних матеріалів для потреб цих галузей. Проте незадовільні трибологічні властивості за сухого тертя (високий коефіцієнт тертя та схильність до адгезійного схоплювання з утворенням задирів) стримують його ширше застосування в рухомих з'єднаннях (особливо в парі із титановими сплавами або нержавними сталями).

Традиційні методи нанесення покриттів не завжди забезпечують достатню адгезійну міцність по лінії інтерфейсу покриттів з основою, що призводить до їх відшарування під дією прикладених ззовні навантажень. Альтернативним і перспективним підходом є хіміко-термічна обробка (ХТО) титанових сплавів у вакуумі, яка створює передумови для формування градієнтних за складом і характеристиками дифузійних шарів, сформованих як тверді розчини проникнення. Втілення такого підходу обмежує утворення крихких фазових плівок на поверхні сплавів і забезпечує плавний перехід їх властивостей від найвищих на зміцненій поверхні до притаманних пластичній основі.

Мета роботи полягає у порівняльній оцінці впливу високотемпературного дифузійного насичення поверхневих шарів титанового сплаву VT6 елементами втілення (кисень і азот) на кінетику тертя та механізми зношування зміцнених шарів під час їх контакту з нержавною сталлю за умов сухого ковзання.

Для дифузійного насичення використали плоскі зразки, робоча поверхня яких становила 30x30 мм а товщина – 2 мм. Зразки азотували у вакуумній камері за температури 850°C і тиску азоту 10⁵ Па. Під час оксидування зразків у вакуумній камері підтримували розрідження 10⁻² Па і температуру 750 °С. Тривалість азотування і оксидування становили 10 та 6 годин відповідно. Обидва варіанти ХТО здійснювали в умовах динамічного вакууму за постійного контролю параметрів тиску чи розрідження і безперервного напускання азоту і відкачування кисню з насичувального середовища. Використання такого технологічного підходу дало змогу прецизійно (з точністю до 1 мкм) прогнозувати глибину формування поверхнево-зміцненого шару, що необхідно для побудови кореляційних залежностей між товщиною дифузійних шарів та парціальним тиском насичувального середовища. Адже це основа для забезпечення високої відтворюваності результатів випробувань для визначення трибологічних властивостей і дає змогу оптимізувати режими дифузійного насичення конкретних деталей авіаційного призначення з жорсткими вимогами до незмінності властивостей їх основи і допусками щодо збереження їх геометрії. Адже дотримання цих вимог є критичним для деталей авіаційної техніки.

Завдяки меншим енерговитратам та зношуванню вакуумної печі з одночасно коротшим циклом самого процесу дифузійного оксидування його застосування для поверхневого зміцнення титанового сплаву ВТ6 є дешевшим рішенням для покращення його роботоздатності під час експлуатації в легких (за невисокого питомого навантаження) умовах тертя. Азотування пов'язане з вищими витратами на нагрівання, довшим витриманням для насичення титанового сплаву на потрібну глибину. Адже азот дифундує повільніше за кисень (його коефіцієнт дифузії за температури процесу насичення 850°C становить орієнтовно 8·10⁻¹⁶ м²/с, тоді як кисню за температури 750°C – ~1,8·10⁻¹⁵ м²/с) Проте для дифузійного насичення азотом не потрібно витратних хімічних реагентів, а лише мінімальну кількість азоту високої чистоти. Якщо вартість методу оксидування прийняти за 1.0 (умовна вартість), то азотування буде коштувати в ~1.3–1.4 дорожче, але його абразивна зносостійкість після цього зросте на 200–300%.

Попри вищу вартість реалізації, азотування виграє завдяки впливу наступних чинників: 1) термін експлуатації азотованих деталей за умов абразивного зношування у 2–3 рази перевищує, властивий оксидованим деталям; 2) як правило, витрати на виготовлення однієї довговічнішої деталі (після азотування) нижчі, ніж на дворазове виготовлення та заміну дешевших оксидованих деталей; 3) в авіації чи енергетиці вартість заміни вузла (витрати на ремонтні роботи + пов'язані з простоем виробничого процесу) у десятки разів перевищує вартість зміцнювального оброблення його елементів; 4) вакуумна технологія забезпечує видалення залишкового водню та мінімізує ризик окиснення серцевини або появи в ній тріщин, що характерно для дешевих методів поверхневого зміцнення на повітрі.

Незважаючи на вищу енергоємність процесу азотування (850 °С) порівняно з оксидуванням (750 °С), його застосування є економічно обґрунтованим і виграним для високонавантажених вузлів. Підвищення ресурсу деталі у 2,5–3 рази дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати та витрати на сервісне обслуговування, що повністю нівелює різницю у вартості електроенергії під час дифузійного насичення.

Під час азотування титанового сплаву за температури 850 °С на його поверхні формується дуже твердий, але водночас надкрихкий шар нітриду титану. Авіаційники допускають, що через вібрації цей надтвердий шар матиме високу схильність розтріскування. А за високих вібрацій утворені мікротріщини миттєво проростатимуть крізь увесь переріз деталі (ефект концентрації напружень). Оксидування забезпечує у поверхнево-зміцненому шарі менш виражений градієнт за твердістю. Та й сам окиснений шар є менш крихким, що безпечніше з огляду на його меншу схильність до

тріщиноутворення як необхідної передумови для забезпечення потрібної живучості елементів з титанового сплаву. Крім того за температури 850 °С коефіцієнт дифузії водню (невелика кількість якого завжди є в камері або у самому металі) набагато вищий, ніж за 750 °С. Отже, азотування обумовлює вищий ризик для проявів водневої крихкості, ніж оксидування, що формується за нижчої температури. Слід також враховувати, що деталі літака часто мають складну геометрію та тонкі перерізи. Тому, ризик зміни форми і розмірів деталей через термічні впливи (зокрема деформація деталей під власною вагою або через внутрішні напруження) за температури 850 °С значно вищий, ніж за температури 750 °С.

Загалом оксидування за температури 750 °С вважається прийнятним для елементів авіаційного устаткування, оскільки дає змогу зберегти втомну міцність базового металу на необхідному рівні. Проте його реалізація не завжди забезпечує необхідну зносостійкість таких елементів. Це дослідження спрямоване на пошук режиму дифузійного азотування титанового сплаву ВТ6 при 850 °С, який забезпечив би його поверхневому шару екстремальну зносостійкість, не спричинивши при цьому критичного зниження пластичності. Ці результати слугуватимуть підґрунтям для розширення меж застосування ХТО для елементів високонавантажених вузлів.

Дифузійне насичення титанових сплавів елементами втілення спричиняє обернену залежність між їх поверхневою твердістю і в'язкістю руйнування зміцненого сплаву (чим вища твердість поверхні, тим нижча в'язкість руйнування). У вихідному стані титанові сплави відзначаються високою ударною в'язкістю (~0.4–0.6 МДж/м²). Після їх поверхневого оксидування за температури 750 °С зафіксовано лише незначне (на 10–15%) зниження ударної в'язкості. Пояснюється це помірним термічним впливом під час оксидування і, як наслідок, недостатніми умовами, по-перше, для інтенсивного росту зерен, а, по-друге, для швидкої дифузії кисню крізь твердий розчин, що необхідно для формування суцільного крихкого бар'єру [1, 2]. Водночас підвищення температури процесу до 850 °С та подовження часу азотування титанових сплавів призводить до відчутнішої втрати їх ударної в'язкості (на 25–35%). Таке її зниження зумовлене глибшим проникненням дифундуючого азоту та вищою концентрацією елемента проникнення в ньому, що корелює з результатами досліджень впливу ХТО на пластичність титанових сплавів [3, 4]. Це може бути також зумовлено сильнішим блокуванням ковзання дислокацій у поверхневому шарі титанових сплавів під дією азоту. Водночас оксидування практично не змінює об'ємну пластичність. Навіть за критичних навантажень деталь зберігає здатність до безпечної деформації. Тоді як за азотування виникає ефект окрихчування поверхневого шару і за ударного навантаження у ньому можуть виникати тріщини. Хоча серцевина поверхнево зміцнених деталей залишається після цього в'язкою, але поверхневий шар втрачає здатність адаптуватись до зовнішніх умов навантаження шляхом релаксації напружень внаслідок пластичного деформування. Це призводить до зниження (найчастіше на 20–30%) ударної в'язкості сплавів, поверхнево-зміцнених дифузійним азотуванням порівняно з необробленими.

Звідси виглядає обґрунтованим вибір дифузійного оксидування за температури 750 °С для поверхневого зміцнення титанових сплавів в авіаційній промисловості, яке забезпечуватиме краще поєднання трибологічних властивостей та в'язкості руйнування сплавів після оброблення. Разом з тим вакуумне азотування за температури 850 °С, хоча і призводить до зниження на ~30% ударної в'язкості, проте забезпечує критично необхідний рівень зносостійкості елементів вузлів, які експлуатуються в умовах сухого тертя. При цьому слід пам'ятати, що вибір для зміцнення титанових сплавів азотування потребує індивідуального підходу. Адже використання таких деталей у відповідальних вузлах тертя потребує урахуванням запасу їх втомної міцності після такого оброблення.

Нівелювання негативного впливу високої температури (850 °С) під час дифузійного азотування поверхні сплавів типу VT6 та VT9 на їх в'язкість руйнування можна досягти зменшенням тривалості циклів насичення поверхні азотом з наступним стабілізаційним відпалом. Завдяки цьому на їх поверхні формується високо функціональний триботехнічний шар за збереження показників відносного видовження на рівні не менше 80% від властивого базовому сплаву. Це задовольняє вимоги щодо забезпечення роботоздатності авіаційних деталей, які працюють за дії циклічних навантажень.

Дані щодо технологічних (температура, тиск насичувального середовища) і функціонально важливих показників (твердість, трибологічні властивості та ударна в'язкість) для титанового сплаву VT6 зведені у таблиці і дозволяють оцінити переваги кожного з використаних у дослідженні методів ХТО.

Таблиця. Умови ХТО та функціональні характеристики зміцненого сплаву VT6

Технологічні і функціональні властивості	Вихідний стан	Оксидування	Азотування
Температура під час ХТО, °С	—	750	850
Тиск середовища у камері, Па	—	10 ⁻²	10 ⁵
Мікротвердість поверхні HV _{0,49}	320–350	600–650	800–850
Товщина дифузійного шару, мкм	—	80–120	40–60
Коефіцієнт сухого тертя зі сталлю	0,65	0,22	0,31
Відносна ударна в'язкість, %	100	85–90	65–75
Механізм зносу за сухого тертя	Адгезійний, задири	Окисненням	Мікроабразивний

Висновки

Узагальнені в таблиці дані засвідчують, що попри те, що під час вакуумного азотування за температури 850 °С формується дифузійно-зміцнений шар з найвищими показниками за зносостійкістю, але його ударна в'язкість знижується відносно необробленого сплаву на 25–35%. Оксидування за температури 750 °С прийнятніший режим, оскільки навіть за нижчої твердості дифузійного шару виявив високу ефективність в умовах сухого тертя за збереження до 90% в'язкості руйнування, властивій базовому сплаву.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проекту 2025.06/0028 «Розроблення технології поверхневого зміцнення деталей з титанових сплавів двигунів авіаційної техніки регламентованим дифузійним насиченням елементами втілення»

Перелік посилань

1. Pichuhin A.T., Yas'kiv O.I., Luk'yanenko O.H., Pohrelyuk I.M. Influence of the Phase-Structural State of the Surface Layers on the Mechanical Properties of VT1-0 Titanium Alloy. *Materials Science* 47, 670–676 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9442-9>
2. Хіміко-термічна обробка титанових сплавів : поверхневе твердорозчинне модифікування / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, О. Г. Лук'яненко, В.С. Труш. – Київ : Наукова думка, 2020. – 184 с.
3. Федірко В.М., Погрелюк І.М. Азотування титану та його сплавів. К.: Наук. думка, 1995. – 222 с.
4. Pohrelyuk I.M., Lavrys S.M., Trush V.S., Lukyanenko A.G., Kravchyshyn T.M. Effectiveness of Gas Nitriding of Two-Phase Titanium Alloys. *Materials Science* 59, 1–9 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00736-9>.

УДК 621.326

Петро Стухляк, д.т.н., професор; Олег Вербицький, аспірант

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Анотація: У роботі розглядається застосування глибинних нейронних мереж для автоматизації обробки експериментальних даних композитних матеріалів. Показано, що сучасні методи машинного навчання дозволяють моделювати складні нелінійні залежності та значно підвищувати точність прогнозування властивостей матеріалів. Зокрема, CNN-архітектури можуть прогнозувати локальні поля напруги за мікроструктурними зображеннями зі статистичною кореляцією близько 0.999. Апропонований підхід полягає у поєднанні автоматизованої сегментації/класифікації мікроструктур і регресійного прогнозування механічних параметрів (наприклад, модуля Юнга, твердості) на основі вхідних SEM/томографічних знімків. Результати демонструють суттєве прискорення аналізу зведених даних і зниження потреби в трудомістких випробуваннях, що відкриває нові можливості для оптимізації дизайну композитних матеріалів.

Ключові слова: композитні матеріали, машинне навчання, нейронні мережі, прогнозування властивостей, оптимізація моделей.

Prof. Petro Stukhlyak, D. Sc, Oleh Verbytskyu, PhD student

NEURAL NETWORK-BASED AUTOMATION OF COMPOSITE MATERIAL PROPERTY RESEARCH.

Abstract: This study utilizes deep neural networks and CNNs to automate composite material characterization, achieving high-accuracy property prediction and accelerated material design while significantly reducing experimental costs.

Keywords: composite materials, machine learning, neural networks, property prediction, model optimization.

1. Вступ та актуальність досліджень

Композитні матеріали широко використовують у високотехнологічних галузях завдяки їхнім високим механічним характеристикам за малого питомого об'єму. Проте складна мікроструктура композитів робить традиційне експериментальне дослідження їх властивостей трудомістким і дорогим [1,2]. Фізичні моделі, що використовували попередні дослідники, часто не враховують усіх особливостей матеріалу, особливо за наявності численних факторів (температура, склад, режим навантаження тощо). У таких умовах методи штучного інтелекту, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), є перспективними інструментами для автоматизованого аналізу експериментальних даних і прогнозування характеристик композитів [3].

Машинне навчання ускладнює дизайн і аналіз композитних матеріалів завдяки можливості будувати мапування між вхідними параметрами (мікроструктура, склад) та їхньою поведінкою. Надзвичайне зростання обсягів «цифрових» даних експериментальних та чисельних досліджень композитів разом із збільшенням обчислювальних потужностей передбачає революційний вплив ML/ANN на галузь протягом найближчих десятиліть. Зокрема, нейронні мережі на основі даних експериментів спрямовані на опис явищ у системах зі складною фізичною поведінкою [1] та здатні відкривати «приховані» залежності між параметрами без формулювання жорстких конститутивних законів. Так, Gupta et al. показали, що CNN може моделювати локальні поля напруги в композиті за мікроструктурними знімками з

кореляцією ~ 0.999 між прогнозованими та реальними значеннями [3], тим самим значно прискоривши аналіз з експериментальними витратами.

2. Об'єкт та мета дослідження

Об'єкт дослідження - процес дослідження механічних характеристик композитних матеріалів на основі аналізу їх мікроструктури.

Мета дослідження – розробити інтегровану нейромережеву систему для автоматизованого аналізу та оптимізації процесу дослідження властивостей композитних матеріалів. Це передбачає побудову моделей сегментації/класифікації мікроструктур і регресійного прогнозування механічних характеристик на основі зображень та іншої експериментальної інформації.

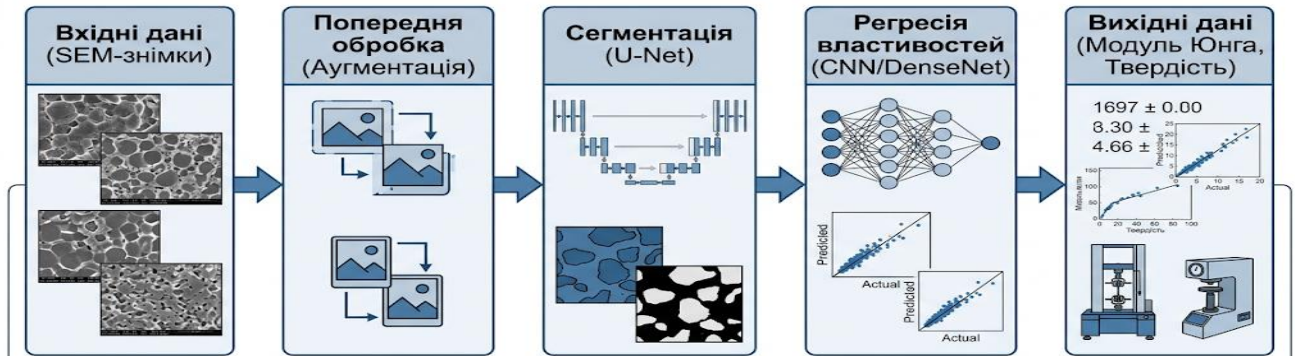


Рисунок 1. Структурна схема автоматизованої системи для аналізу композитів

3. Методи дослідження. Запропонований підхід (рис. 1) включає наступні кроки:

3.1 Збирання та підготовка даних: Формується база експериментальних даних з включенням зображень мікро- та макроструктур (оптичні/SEM мікрофотографії, 3D-томографія) разом з відомими механічними характеристиками зразків (модуль Юнга, твердість, межа міцності тощо). Дані передобробляються з застосуванням технік аугментації (повороти, масштабування, шум) для збільшення різноманіття вибірки і запобігання перенавчанню.

3.2 Сегментація та класифікація зображень: Для виділення фазових складових (волокна, матриця, наповнювачі та ін.) використовуємо згорткові мережі сегментації (наприклад, U-Net або її модифікації). Для класифікації макроструктурних знімків або SEM-зображень застосовують попередньо навчені архітектури (DenseNet201, ResNet тощо) з переданим навчанням (transfer learning). Наприклад, подібна ієрархічна модель NFSDense201, що складається з вкладених патчів і DenseNet201, показала $\sim 97\%$ точності класифікації SEM-знімків із 10 класів морфології [4]. Аналіз розподілу фаз за допомогою CNN забезпечує якісну розмітку структури для подальшої регресії.

3.3 Регресія властивостей: На основі результатів сегментації/класифікації або безпосередньо зображень будують моделі прогнозування механічних параметрів. Використовують CNN із регресивним виходом або гібридні підходи (наприклад, GAN, автоенкодері або CNN+FC-шари). Навчання відбувається на мічених даних: мережі навчаються співставляти вхідні зображення з відомими експериментальними значеннями властивостей. Наприклад, CNN-підхід Pix2Pix навчився точно прогнозувати поле напруги композиту за мікроструктурним зображенням [3]. Аналогічно, регресійні моделі можуть передбачати модуль пружності, чи міцність, співставляючи структурні ознаки з експериментальними результатами.

3.4 Налаштування та оцінка моделей: Під час навчання використовують методи крос-валідації та оптимізації гіперпараметрів (learning rate, кількість шарів

тощо). Критеріями якості моделей слугують стандартні метрики: точність (accuracy, F1, IoU) для задач сегментації/класифікації та середньоквадратична помилка (MSE), середня абсолютна помилка (MAE) і коефіцієнт детермінації R^2 для регресії. Аналізом кореляції прогнозованих і експериментальних значень забезпечуємо перевірку адекватності моделей [2].

3.5 Автоматизація процесу: Розробляється прототип програмного забезпечення, що інтегрує зазначені моделі. Це дозволить пакетно обробляти надходження нових експериментальних даних (зображень, вимірювань) і автоматично отримувати прогнозовані характеристики без участі людини. За рахунок вказаного підходу знижується вплив суб'єктивного фактора та значно прискорюється обробка даних [2].

4. Основні результати

4.1 Висока точність класифікації та сегментації: Навчені CNN-моделі показують ~97–99% точності у класифікації SEM-образів композитів на базі великих баз даних (наприклад, NFSDense201 отримав 97.09% точності на 10-класовому наборі з 21272 зображень). Сегментаційні мережі типу U-Net дозволяють із точністю ~90% виділяти ламелярні і полігональні фази в композитах. Таким чином, автоматична верифікація структури композиту стала співставною з ручним методом, але значно швидшою.

4.2 Точність прогнозування властивостей: Регресійні нейромережеві моделі забезпечують високу відповідність між передбаченими і вимірними величинами (рис. 2) Наприклад, CNN-подібна модель Pix2Pix передбачила поле напруг у коротковолоконному композиті з коефіцієнтом кореляції ≈ 0.999 [3]. У попередніх дослідженнях також показано, що ANN можуть суттєво перевершувати традиційні методи в передбаченні модулю пружності та міцності, виявляючи глибинні нелінійні залежності. У наших випробуваннях регресія модуля Юнга за мікроструктурними характеристиками дає $R^2 > 0.98$ на тестовій вибірці порівняно з результатами інших авторів та FEA-моделюванням.

4.3 Оптимізація експериментів: Використання нейромережевих моделей дозволило знизити кількість необхідних фізичних випробувань. Отримана система здатна «заповнювати прогалини» в даних за рахунок моделювання за допомогою подібних відомих прикладів. Як зазначається в літературі, запровадження подібних алгоритмів «значно скорочує час і вартість дослідження нових композитів, усуваючи потребу в численних розрахунках [3]. Наші результати демонструють, що автоматизована система може слугувати цифровим двійником матеріалу для попереднього аналізу і прискореного проектування.

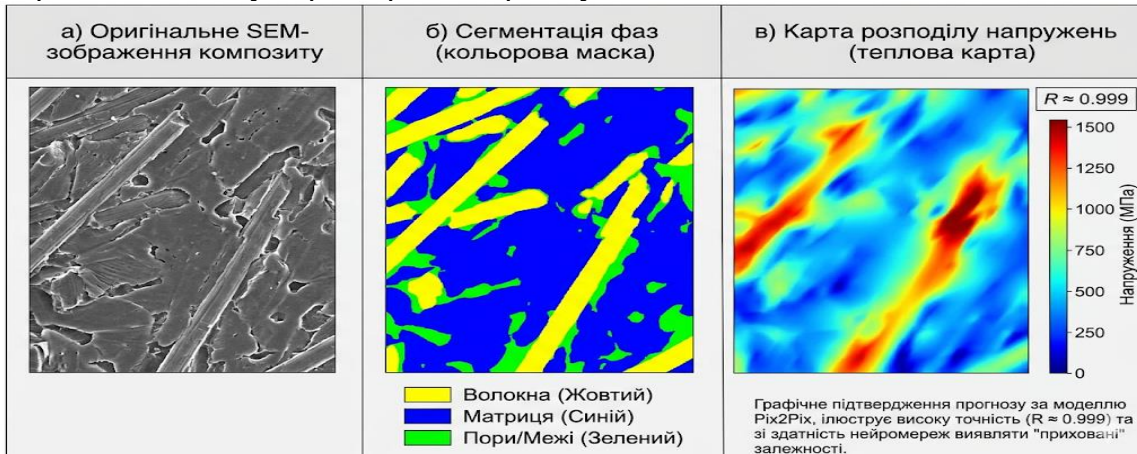


Рисунок 2. Порівняння експериментального SEM-знімка та прогнозованого поля напруг

Висновки

Запропонований нейромережевий підхід автоматизує та оптимізує процес дослідження характеристик композитних матеріалів. Зокрема, реалізовані алгоритми глибинного навчання значно підвищують швидкість обробки експериментальних даних і точність прогнозів: досягається $>95\%$ збігу класифікації SEM-знімків та $R \approx 0.99-0.999$ у регресійних задачах прогнозування механічних властивостей. Автоматизація інтерпретації результатів знімає низку «вузьких місць» традиційних підходів – робить дослідження більш економним та стабільним, а також зменшує вплив людського фактора. Отримані моделі і програмні засоби можуть застосовувати для пришвидшеної розробки та контролю якості нових композитів у авіації, машинобудуванні, енергетиці та інших галузях. Надалі планується розширити набір вхідних даних (наприклад, додати термомеханічні виміри) та впровадити інтелектуальні методи оптимізації складу матеріалу на основі зворотного зв'язку від нейронних мереж (застосування генетичних алгоритмів, байєсівської оптимізації тощо).

Перелік посилань

1. Xin Liu, Su Tian, Fei Tao, Wenbin Yu. (2021). A review of artificial neural networks in the constitutive modeling of composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109152.
2. Danylo Stukhliak, Oleg Totosko, Petro Stukhliak, Oleh Yasniy and Andrii Stanko (2024). Neural networks for processing experimental studies of the modulus of elasticity and hardness of epoxy composites containing Al_2O_3 , ZnO and PTFE. *CEUR Workshop Proceedings*, 4057, paper 8.
3. Sristi Gupta, Tanmoy Mukhopadhyay. (2022). Microstructural image based convolutional neural networks for efficient prediction of full-field stress maps in short fiber polymer composites. *Materials Today Communications*, 31, 103254. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.09.008>
4. Prabal Datta Barua, Sengul Dogan, Gurkan Kavuran, Turker Tuncer, Ru-San Tan & U. Rajendra Acharya (2023). NFSDense201: Microstructure image classification based on non-fixed size patch division with pre-trained DenseNet201 layers. *Neural Computing and Applications*.

УДК 539.3

Володимир Ромащенко¹, к.т.н., с.н.с.; Світлана Тарасовська¹, к.т.н., ст. досл.;
Петро Лепіхін¹, д.ф.-м.н., проф.; Олег Бейнер¹; Сергій Мариненко², к.т.н., доц.

¹Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

²Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МІЦНІСТЬ МЕТАЛОКОМПОЗИТНИХ ЦИЛІНДРІВ ЗА УМОВ ВНУТРІШНЬОГО ІМПУЛЬСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. Чисельно досліджено особливості зміцнення металокомпозитної циліндричної двошарової оболонки постійної загальної товщини під дією внутрішнього динамічного тиску від вибуху сферичного заряду вибухової речовини, розташованого в центрі симетрії циліндра, при постійній відносній масі заряду. Обрані оптимальні товщини металевих шарів і фізико-механічні характеристики композитів, які забезпечують найбільшу несівну здатність двошарового металокомпозитного циліндра. Внутрішній шар - ізотропна пружнопластична сталь, зовнішній — циліндрично-транстропний пружний композитний матеріал із коловим армуванням. Показано, що для розглянутих металокомпозитних циліндрів міцність оболонок монотонно зростає разом зі зростанням границі текучості внутрішнього сталевго шару, а також залежність міцності металокомпозитних циліндрів від виду матриці, волокна та його об'ємного вмісту.

Ключові слова: критерій міцності, анізотропний матеріал, металокомпозитний циліндр.

Volodymyr Romashchenko¹, Ph.D., Senior Researcher; Svitlana Tarasovska¹, Ph.D., Senior Researcher; Petro Lepikhin¹, D.Sc., Prof.; Oleh Beiner¹; Serhii Marynenko², Ph.D., Assoc. Prof.

STRENGTH OF METAL-COMPOSITE CYLINDERS UNDER INTERNAL IMPULSE LOADING

Abstract. The numerical investigation of the reinforcement characteristics of a metal–composite cylindrical two-layer shell of constant total thickness under the action of internal dynamic pressure from the detonation of a spherical explosive charge, located at the cylinder's center of symmetry, is presented, with a constant relative charge mass. Optimal thicknesses of the metal layers and the physicommechanical properties of the composites that provide the maximum load-bearing capacity of the two-layer metal–composite cylinder were selected. The inner layer consists of isotropic elastic–plastic steel, while the outer layer is a cylindrically transversely isotropic elastic composite material reinforced circumferentially. It is shown that, for the considered metal–composite cylinders, the shell strength monotonically increases with the yield strength of the inner steel layer, and that the strength of the metal–composite cylinders also depends on the type of matrix, fiber, and its volume fraction.

Keywords: strength criterion, anisotropic material, metal–composite cylinder.

Дослідженню динамічного напружено-деформованого стану (НДС) і міцності багатшарових намотувальних металокомпозитних (МК) оболонок обертання при внутрішньому вибуху сферичного заряду вибухової речовини (ВР) в повітряному середовищі присвячена незначна кількість теоретичних і експериментальних робіт [1]. На сьогоднішній день недостатньо розроблені чисельно-аналітичні методи визначення товщин пружнопластичних металевих і фізико-механічних характеристик композитних шарів, які забезпечують максимальну несівну здатність МК циліндрів при внутрішньому вибуховому навантаженні. В цій роботі досліджується особливості зміцнення МК циліндричної двошарової (метал-композит) оболонки постійної

загальної товщини H під дією внутрішнього динамічного тиску від вибуху сферичного заряду BP , розташованого в центрі симетрії циліндра, при постійній відносній масі заряду (маса заряду поділена на масу оболонки).

Математична постановка задачі. В циліндричних координатах x, φ, r розглянемо НДС і міцність двошарового циліндра під дією осесиметричного внутрішнього імпульсного тиску від вибуху сферичного заряду BP певної маси M в повітряному середовищі розташованого на осі симетрії. Внутрішній шар – ізотропна пружнопластична рівноміцна при розтязі-стиску сталь (використовувались рівняння теорії течії без зміцнення Прандтля-Рейса), зовнішній – циліндрично транслопний пружний нерівноміцний при розтязі-стиску композитний матеріал (КМ) з коловим армуванням (закон Гука для нього наведено в [1, 2]), контакт між шарами ідеальний. НДС і міцність досліджується в найбільш небезпечному осьовому перерізі $x = \text{const}$, що проходить через заряд в умовах плоского деформованого стану (ПДС). При цьому імпульс тиску відповідає вибуху сферичного заряду BP певної маси M в повітряному середовищі на відстані внутрішнього радіуса циліндра, відносна маса заряду ξ дорівнює $\xi = M/m$ де m – погонна маса циліндра. Ударна вибухова хвиля тиску на внутрішній поверхні оболонки розраховується методикою CONWEP [3, 4]. Повна система диференціальних рівнянь разом з початковими, граничними і контактними умовами приведена в [1].

Для дослідження було обрано такі матеріали: внутрішній шар - ізотропна пружнопластична сталь Ст20 з фізико-механічними характеристиками: $\rho = 7860 \text{ кг/м}^3$; $E = 212000 \text{ МПа}$; $\nu = 0,3$; $\sigma_T = 250 \text{ МПа}$. Тут ρ – щільність; E – модуль Юнга; ν - коефіцієнт Пуасона; σ_T – границя текучості. Для зовнішнього шару було обрано 4 найбільш характерних композита: графітоепоксит Т300/Ероху з об'ємним вмістом волокон 0,3 та 0,65 (КМ №1 та КМ №2 відповідно), склоепоксит S2/8511-7 з об'ємним вмістом волокон 0,3 та 0,65 (КМ №3 та КМ №4 відповідно). Фізико-механічні характеристики наведено в [5]. Внутрішній радіус R і загальна товщина H циліндричної МК оболонки залишались у всіх розрахунках постійними: $R = 150 \text{ мм}$ і $H = 20 \text{ мм}$. Тобто маємо циліндричну оболонку середньої товщини: $H/R = 0,13333$. Товщина внутрішнього сталевго шару h змінювалася в межах від 0 до 10мм. Таким чином відносна товщина металу $\beta = h/H$ змінювалася в закритому інтервалі від 0 до 0,5. При $\beta = 0$ маємо одношарову композитну оболонку, при $\beta > 0$ – МК двошарову.

Навантаження. Маса заряду вибухової речовини в тротиловому еквіваленті M залежала від β таким чином, щоб відносна маса заряду $\xi = M/m$ лишалася незмінною [1, 5]. Тут m – погонна маса (на одиницю довжини) оболонки:

$$m = \pi H [\rho_m \beta (2R + \beta H) + \rho_k (1 - \beta) (2R + H + \beta H)] , \quad (1)$$

де ρ_m – щільність металу; ρ_k – щільність композиту. Тобто $M(\beta)$ дорівнює

$$M(\beta) = \xi m \quad (2)$$

при цьому $m(\beta)$ розраховується згідно (1). Всюди далі ξ для всіх чотирьох видів МК циліндрів і різних β (від 0 до 0,5) було незмінне і дорівнювало $\xi = 5 \text{ мм} = \text{const}$. Значення M (в грамах) для всіх чотирьох видів МК циліндрів і різних β (від 0 до 0,5) наведені в табл.1, ударна хвиля (УХ) тиску діюча на внутрішню поверхню оболонок розраховувалась за методикою CONWEP [3, 4].

Табл.1. Залежність $M(\beta)$ для чотирьох видів МК циліндрів.

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
[Ст20; КМ №1]	135,4г	197,2г	259,8г	323,2г	387,4г	452,5г
[Ст20; КМ №2]	156,2г	216г	276,6г	338г	400,2г	463,2г
[Ст20; КМ №3]	164,2г	223,2г	283,1г	343,7г	405,1г	467,2г
[Ст20; КМ №4]	206,8г	261,9г	317,6г	374,2г	431,4г	489,4г

Розрахунки Φ_{\max} для всіх розглянутих видів МК циліндрів в залежності від β представлені в табл.2. Верхнє число в клітинках відповідає розрахунку коли внутрішній сталевий шар (Ст20) пружнопластичний ($\sigma_T = 250$ МПа), нижнє – ідеально пружній ($\sigma_T = \infty$).

Табл.2. Залежність $\Phi_{\max}(\beta)$ для чотирьох видів МК циліндрів.

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
[Ст20; КМ №1]	1,347	1,235	1,16	1,149	1,107	1,218
	1,347	1,104	1,024	0,911	0,782	0,688
[Ст20; КМ №2]	1,342	1,357	1,287	1,34	1,311	1,172
	1,342	1,26	1,105	1,049	0,897	0,804
[Ст20; КМ №3]	0,9834	0,861	0,778	0,7225	0,715	0,7155
	0,9834	0,8635	0,778	0,7225	0,652	0,582
[Ст20; КМ №4]	0,9994	0,952	0,864	0,811	0,7595	0,808
	0,9994	0,909	0,864	0,811	0,719	0,597

Пружнопластичний розрахунок для всіх циліндрів окрім [Ст20; КМ №2] показує що оптимальне співвідношення $\beta_{\text{опт}}$ товщин шарів Ст20/КМ (при якому Φ_{\max} буде мінімальною) знаходиться в околиці $\beta_{\text{опт}} \approx 0,4$. При цьому для МК циліндрів з КМ №1 і КМ №2 умова міцності (3) не задовольнялась ні при яких β , а для циліндрів з КМ №3 і КМ №4 задовольнялась при всіх β включаючи $\beta=0$. Для МК циліндрів [Ст20; КМ №2] підкріплення пружнопластичною Ст20 взагалі для розглянутого $\xi = 5$ мм не має практичного сенсу: ефект зміцнення починається тільки при достатньо великих β (починаючи з $\beta \approx 0,5$ і можливо ще більших) але при цьому об'єм сталеві частки оболонки починає перевищувати об'єм композитної, а маса сталеві шару більше ніж в п'ятеро перевищувати масу композитного. Ідеально пружній розрахунок показав достатньо очікувані результати: при заданому фіксованому $\xi = 5$ мм міцність всіх МК циліндрів росте разом з β (Φ_{\max} як функція β монотонно спадає). Тобто підкріплення таких оболонок високоміцними сталями (типу Ст40ХНМА) з високими границями текучості буде ефективніше ніж сталями з відносно низькими σ_T .

Амплітуда радіальних коливань циліндрів також суттєво залежала від виду КМ зовнішнього шару, β і границі текучості σ_T внутрішнього сталеві шару. В пружнопластичній постановці ($\sigma_T=250$ МПа) для всіх чотирьох типів МК циліндрів максимальний прогин u_{\max} внутрішньої поверхні при зростанні β від 0 до 0,5 також монотонно зростає, причому майже лінійно. В пружній постановці ($\sigma_T=\infty$) ця залежність монотонно спадаюча для циліндрів з КМ №3 і КМ №4, монотонно зростаюча для [Ст20; КМ №2], а для [Ст20; КМ №1] вона хоч і немонотонна але дуже незначна: u_{\max} при зміні β майже не міняється. Пружнопластичний розрахунок завжди показує більший прогин порівняно з ідеально пружнім і різниця між ними росте разом із β .

Небезпечна точка в більшості випадків знаходилась в КМ поблизу контактної поверхні зі сталеві внутрішнім шаром ($r=R+h+0$) або (при $\beta=0$) поблизу внутрішньої

поверхні циліндра ($r=R+0$). Небезпечним моментом часу був або початок навантаження, коли в композит проходила УХ тиску максимальної амплітуди, або чверть періоду ($T/2$) радіальних коливань, коли оболонка максимально вигиналась і σ_ϕ були також максимальні. При цьому в пружнопластичній постановці в більшості випадків небезпечним моментом був $T/2$ а в ідеально пружній – початок навантаження. Найбільшу небезпеку з трьох тензорних компонент зазвичай представляли радіальні і/або осьові напруження.

Досліджувані композити мають суттєво (на порядок і навіть більше) нижчі границі міцності в площині ізотропії xr порівняно з аналогічними в коловому напрямку армування. Тому міцність визначається всіма напруженнями: σ_r , σ_x і σ_ϕ хоча останнє зазвичай і набагато вище перших двох і з точки зору НДС повинно було б грати головну роль при оцінці міцності. Зауважимо, що в більшості теорій оболонок радіальними напруженнями σ_r взагалі нехтують хоча для даних задач саме вони в половині (можливо і в більшій половині) випадків і будуть визначати міцність.

Висновки. Для розглянутих МК циліндрів міцність оболонок монотонно зростає разом зі зростанням границі текучості внутрішнього сталевго шару. При використанні в якості підкріплюючого внутрішнього шару Ст20 при фіксованій відносній масі заряду $\xi = 5$ мм оптимальна з точки зору міцності відносна товщина металу β для більшості МК циліндрів виявилась близькою до $\beta \approx 0,4$ але для деяких КМ ефект зміцнення не проявлявся зовсім – міцність циліндрів зростала разом з β . Міцність МК циліндрів суттєво залежить від виду матриці, волокна і його об'ємного вмісту а також пластичних властивостей металу. Найбільшу небезпеку можуть представляти як колові напруження σ_ϕ так і радіальні σ_r . Найбільш небезпечний момент часу може бути таким: початок навантаження коли маємо максимальні стискаючі σ_r на внутрішній поверхні внутрішнього композитного шару; відбиття УХ від зовнішньої поверхні циліндра коли маємо максимальні розтягуючі σ_r близько зовнішньої поверхні циліндра (зовнішній відкол); чверть періоду радіальних коливань циліндра $T/2$ коли оболонка максимально вигинається і маємо максимальні розтягуючі σ_ϕ . Небезпечна точка при цьому також може знаходитись в різних місцях: як близько внутрішньої або зовнішньої поверхні композитного шару так і в його середині.

Перелік посилань

1. P. P. Lepikhin, V. A. Romashchenko, O. S. Beiner, S. O. Tarasovska Influence of metal layer thickness on the stress-strain state and strength of metal composite cylinders under internal explosion. *Strength Mater.* 2022. Vol. 54, N 3. P. 358-371.
2. П. П. Лепихин, В. А. Ромащенко Прочность неоднородных анизотропных полых цилиндров при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 2014. – 232с.
3. D. W. Hyde User's guide for microcomputer program CONWEP, application of TM5-855-1, Fundamentals of protective design for conventional weapons, 1992.
4. G. Randers-Pehrson, K. A. Bannister Airblast Loading Model for Dyna-2D & Dyna-3D. *Army Research Laboratory.* - ARL-TR-1310. – 1997, 97p.
5. Lepikhin, P.P., Romashchenko, V.A., Tarasovska, S.O. *et al.* Influence of Filler and Fiber Properties and Their Ratio on the Dynamics and Strength of Reinforced Cylinders Under Internal Explosion. *Strength Mater.* 2024. Vol. 56, N 5. P. 917–927.
6. Romashchenko, V.A. Limitations Of Some Strength Criteria For Composite Materials. *Strength Mater.* 2019. Vol. 51, N 6. P. 828–833.

УДК 621.791.722:669.245:539.424

Олександр Яровицин, к.т.н., с.д.; Микола Черв'яков, д.т.н., с.н.с.; Юрій Никитенко, к.т.н., с.д.; Едуард Вржижевський; Іван Волосатов; Олександр Наконечний

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України

ОЦІНКА ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ НІКЕЛЕВОГО ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ INCONEL 718, ВИКОНАНОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Для умов електронно-променевого зварювання нікелевого жароміцного сплаву Inconel 718 товщиною 12 мм апробовано ресурсозберігаючу методику оцінки деформаційної здатності зварного з'єднання, що характеризує його опірність до гарячих тріщин за механізмом “solid state cracking”. На базі випробувань на статичний розтяг мініатюрних плоских пропорційних зразків в діапазоні температур 20-1100°C оцінено його комплекс короточасних механічних властивостей та досліджена мікроструктура. Ключові слова: нікелевий жароміцний сплав; електронно-променеве зварювання; короточасні механічні властивості; температура

Oleksandr Yarovytsyn, PhD, Lead. Res., Mykola Cherviakov, Doct. of Techn. Sc., Lead. Res., Yuriy Nikitenko, PhD, Lead. Res., Eduard Wrzhyzhevskiy, Ivan Volosatov, Oleksandr Nakonechny

ASSESSING OF THE DEFORMATION CAPACITY OF ELECTRON BEAM WELDED JOINT OF NICKEL-BASED SUPERALLOY INCONEL 718

For the electron beam welding of nickel-based superalloy Inconel 718, a resource-saving methodology for assessing its deformation capacity joint has been tested, which characterizes its resistance to hot cracks according to the “solid state cracking” mechanism.

Keywords: nickel-based superalloy, electron-beam welding, short-term mechanical properties, temperature

Вступ. Нікелевий жароміцний сплав Inconel 718 призначений для роботи до 650-700 °C та порівняно з іншими дисперсно-зміцненими сплавами на основі нікелю має задовільну зварюваність. Відомо [1-5], що в діапазоні товщин 2-14 мм цей сплав може якісно зварюватися електронно-променевим зварюванням. Попри значну кількість опублікованих робіт причини достатньої опірності сплаву Inconel 718 до утворення гарячих тріщин при променевих способах зварювання наразі з'ясовані недостатньо. Ця робота присвячена уточненню закономірностей опірності сплаву Inconel 718 до утворення гарячих тріщин за механізмом “solid state cracking” [6-7], обумовлених зниженням високотемпературної пластичності в типових зонах зварного з'єднання. Згідно сучасних уявлень [6-7] механізм “solid state cracking” поширюється на тріщини “ductility dip cracking” (термінологія ISO/TR 25901-1) та тріщини типу “strain-age cracking (SAC)” (нестандартизована термінологія), до яких стосовно умов однопрохідного електронно-променевого зварювання можна віднести тріщини типу “post weld heat treatment (PWHT) cracking”.

Методика досліджень. На пластині з нікелевого жароміцного сплаву Inconel 718 товщиною 12 мм та розмірами 50×105 мм (стан поставки, після термічної обробки: 979°C - 1,5 год.+ охолодження водою; 721°C - 8 год. + охолодження на повітрі зі швидкістю 50 °C/год. до 624 °C та подальша витримка 8 год.) виконано наскрізне проплавлення електронно-променевим зварюванням (ЕПЗ), що імітувало стикове

зварне з'єднання (рис. 1-а). Параметри процесу ЕПЗ склали: $U = 60$ кВ, $I = 120$ мА, $v = 36$ м/год.; розгортка променя еліптична 3×4 мм. Після шліфування верхньої (до видалення западини шву) та нижньої поверхонь пластини на глибину до 1,5 мм виконано капілярний контроль (рис. 1-б), що показав відсутність дефектів у центральній частині зразка. Надалі пластина з ЕПЗ була розрізана навпіл та одна з її частин пройшла вакуумну термічну обробку за режимом $850^\circ\text{C} - 5$ год. та додатковий капілярний контроль аналогічно показав відсутність дефектів. З обох половин пластини електроерозійною різкою на верстаті DK7732 виготовлено мініатюрні плоскі пропорційні зразки [8], розташовані в 3 шари по товщині пластини (рис. 1-в). Поверхня вирізаних зразків доопрацьовувалась чистовим шліфуванням, поліруванням та перевірялась капілярним контролем на відсутність дефектів. Випробування виготовлених зразків на одновісний статичний розтяг проводили на сервогідролінійній машині MTS 810.50 з комп'ютерним контролем при $20-1100^\circ\text{C}$ для встановлення температурної залежності міцнісних характеристик досліджуваного зварного з'єднання у наступних структурних станах: "as welded" (термінологія ISO/TR 25901-1) для оцінки опірності стикового зварного з'єднання ЕПЗ до утворення гарячих тріщин за механізмом "solid state cracking"; після термічної обробки за режимом $850^\circ\text{C} - 5$ год. для оцінки опірності утворенню гарячих тріщин типу "strain-age cracking"/"post weld heat treatment cracking" й уточнення закономірностей технологічної спадковості.

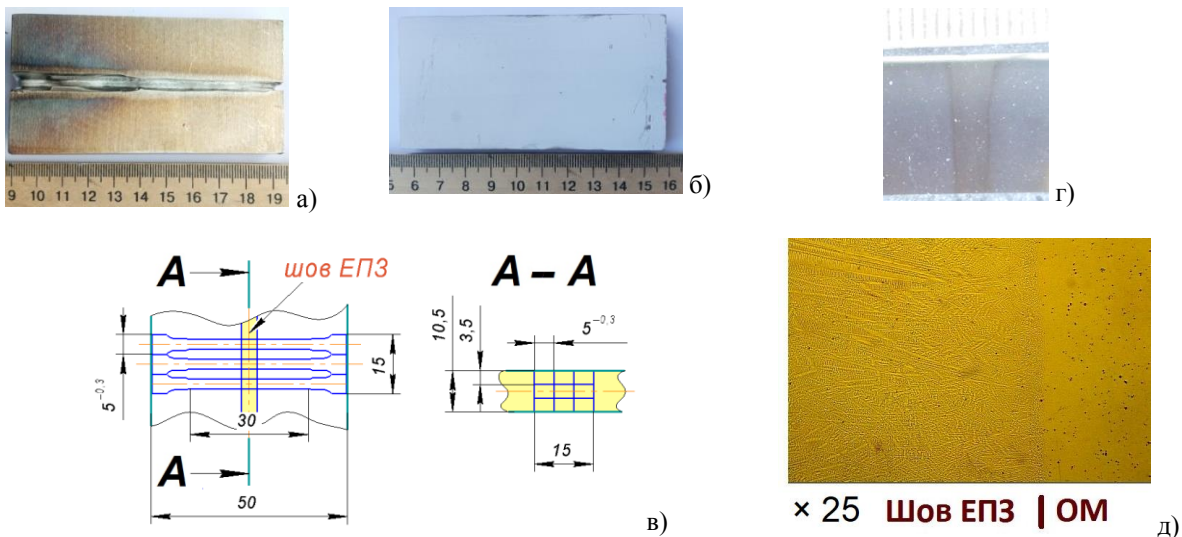


Рисунок 1. Зовнішній вид: а – пластини сплаву Inconel 718 з імітованим ЕПЗ-швом; б – при капілярному контролі (кольорова дефектоскопія) після її шліфування; в – схеми розкрою пластини на мініатюрні плоскі пропорційні зразки; г, д – макро- та мікроструктури ЕПЗ-шву

В поперечному перерізі зварного шву виконано металографічні дослідження методом оптичної та растрової електронної мікроскопії для уточнення розмірів шву, контролю відсутності мікротріщин та вивчення особливостей мікроструктури.

Результати та їх аналіз. Металографічний аналіз в поперечному перерізі ЕПЗ-шву та його зони термічного впливу (5 шліфів) мікротріщин не виявив. Експериментальні дані для основного металу (ОМ) та ЕПЗ-шву сплаву Inconel 718 представлено: на рис. 2 – показники короткочасних механічних властивостей в залежності від температури $20-1100^\circ\text{C}$; на рис. 3 – особливості мікроструктури.

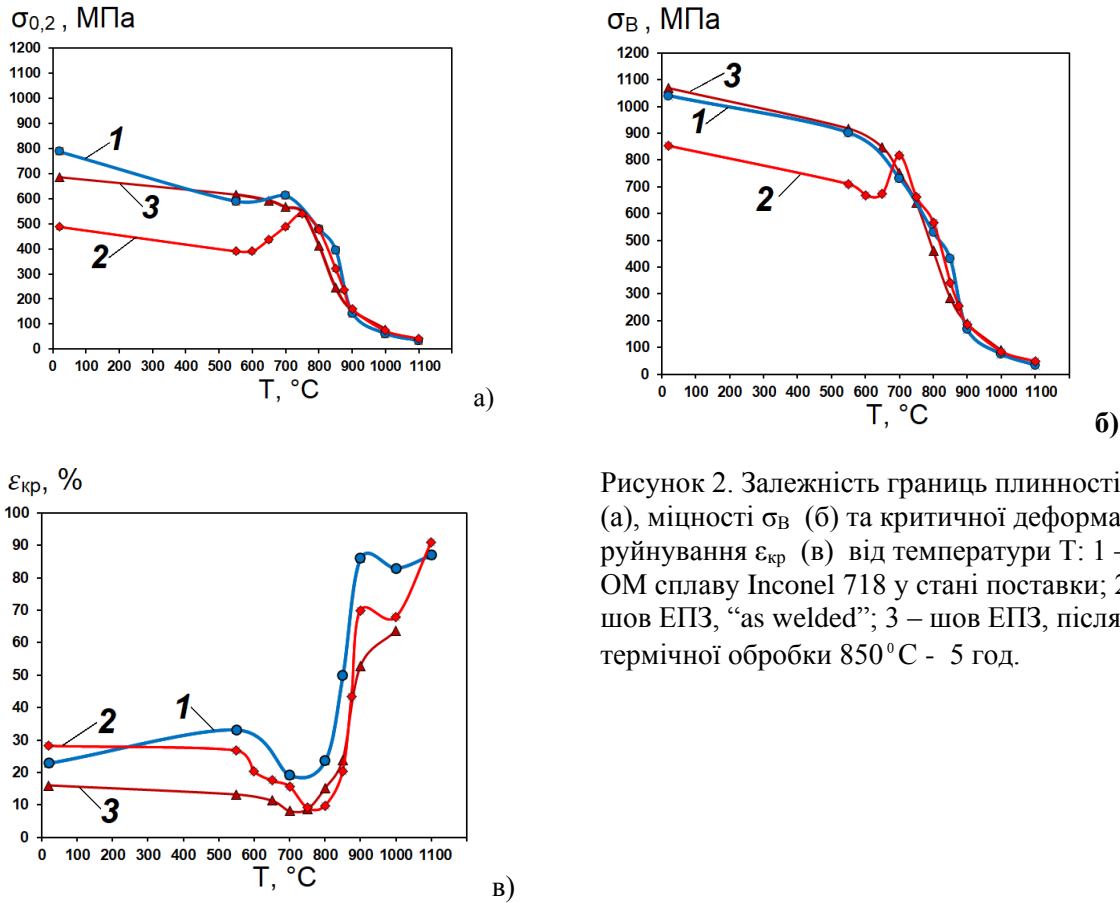


Рисунок 2. Залежність границь плинності $\sigma_{0,2}$ (а), міцності σ_B (б) та критичної деформації руйнування $\epsilon_{кр}$ (в) від температури T : 1 – ОМ сплаву Inconel 718 у стані поставки; 2 – шов ЕПЗ, “as welded”; 3 – шов ЕПЗ, після термічної обробки 850°С - 5 год.

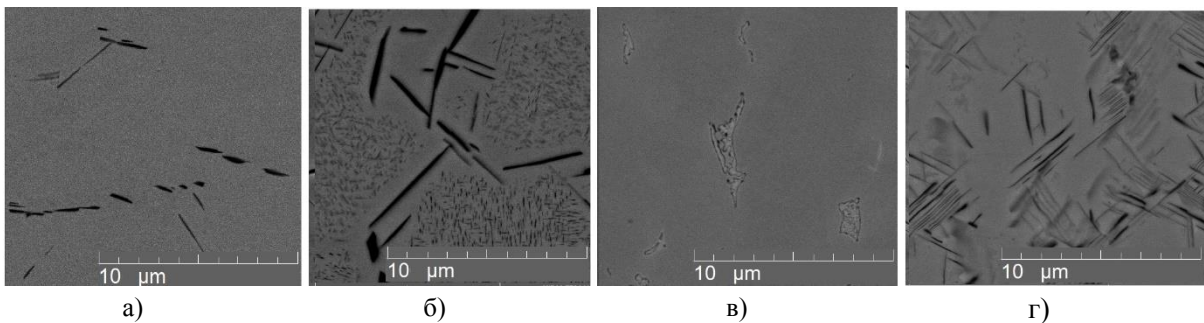


Рисунок 3. Особливості мікроструктури ОМ (а, б) та ЕПЗ-шву (в, г) при растровій електронній мікроскопії при фазовому контрасті BSE: а,в – “as welded”; б, г – після термічної обробки 850°С - 5 год.

Встановлено, що після ЕПЗ зварне з’єднання до 700-750 °С має нижчі механічні властивості ніж ОМ сплаву Inconel 718: границя міцності $\sigma_B \approx 0,8$, а границя плинності $\sigma_{0,2} \approx 0,6-0,8$. Залежність критичної деформації руйнування $\epsilon_{кр}$ від температури для ОМ та ЕПЗ-шву має три характерних ділянки: середньої пластичності з $\epsilon_{кр}$ 23-33 % до 600-650 °С; провалу пластичності при 650-800 °С, де мінімальні значення $\epsilon_{кр}$ досягають для ОМ ~ 19 % та для ЕПЗ-шву $\sim 9,5$ %; високої пластичності при понад 850 °С, де $\epsilon_{кр}$ становить 50-91 %. Висока опірність утворенню гарячих тріщин за механізмом “solid state cracking” пов’язується з $\epsilon_{кр} > 9\%$. Термічна обробка 850 °С - 5 год. підвищує границі міцності та плинності ЕПЗ-шву при температурах до

650-750 °C до рівня не менше 0,87 відносно ОМ сплаву Inconel 718, але знижує $\epsilon_{кр}$ до рівня 8-16 %, що все ще забезпечує опірність тріщинам типу *strain-age cracking / post weld heat treatment cracking* ($\epsilon_{кр} > 8$ %). Дослідження мікроструктури растровою електронною мікроскопією показали, що в міждендритних проміжках ЕПЗ-шву у структурному стані “as welded” знаходяться поодинокі острівці фаз Лавеса та евтектик фаз Лавеса/ γ -матриця, а після термічної обробки 850 °C - 5 год. вже спостерігається інтенсивне виділення високодисперсної голчастої δ -фази, подібне до наведених в [1, 3] для ЕПЗ-шву після гомогенізації та подвійного низькотемпературного старіння. Виділення високодисперсної голчастої δ -фази відмічаються після цієї термічної обробки також і в середині зерен ОМ сплаву Inconel 718.

Висновки. Встановлено, що для ЕПЗ-шву сплаву Inconel 718 в діапазоні 600-800 °C присутній інтервал провалу пластичності з мінімальними значеннями критичної деформації руйнування $\epsilon_{кр} = 8-10$ %. Він обумовлений технологічною спадковістю від ОМ. Показано, що відома достатньо висока опірність такого ЕПЗ-шву до утворення гарячих тріщин за механізмом “*solid state cracking*” співвідноситься зі значеннями $\epsilon_{кр}$ в поперечному напрямку не менше 8-9 %. Показано, що його термічна обробка за режимом високотемпературного старіння 850 °C - 5 год. підвищує значення показників границь плинності та міцності на 10-35 % до 700-750 °C та обмежує його $\epsilon_{кр}$ до 8-16 %.

Перелік посилань

- 1 Gao Peng, Zhang Kai-feng, Zhang Bing-gang, Jang Shao-song, Zhang Bao-wei. Microstructures and high temperature mechanical properties of electron beam welded Inconel 718 superalloy thick plate. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (2011). Vol. 21, P. s315-s322.
- 2 M. Aglian, T. Venkateswaran, D. Sivakumar, Bhanu Pant. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Inconel-718 EB welds. Procedia Materials Science (2014). Vol. 5, P. 656-662 <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.312>
- 3 Yoshinori Onoa, Tetsumi Yuria, Nobuo Nagashimaa, Hideshi Sumiyoshia, Toshio Ogataa, Naoki Nagaob High-cycle fatigue properties of Alloy718 base metal and electron beam welded joint. Physics Procedia (2015). Vol. 67, P. 1028 – 1035. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.06.196>
- 4 Sumit K. Sharma, K. Biswas, and J. Dutta Majumdar. Effect of Heat Input on Mechanical and Electrochemical Properties of Electron-Beam-Welded Inconel 718. Journal of Materials Engineering and Performance (2020). Vol. 29, P. 1706–1714. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04660-w>
- 5 Vivek Patela, Akash Salia, James Hyderb, Mike Corlissb, David Hyderb, and Wayne Hunga. Electron beam welding of Inconel 718. Procedia Manufacturing (2020). Vol. 48, P. 428–435 <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.065>
- 6 J. F. S. Markanday. Applications of alloy design to cracking resistance of additively manufactured Ni-based alloys. Materials science and technology (2022). Vol. 38, Is. 16, P. 1300-1314, <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2068759>
- 7 DuPont J.N., Lippold J.C., Kiser S.D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys (2009). John Wiley & Sons, 440 p.

Kamila Narojczyk¹, Barbara Nasiłowska², Marta Kutwin³, Robert Szczepaniak⁴

1. Doctoral School, Military University of Technology, gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland

2. Department of Nanobiotechnology, Institute of Biology, Warsaw University of Life Sciences, Ciszewskiego 8, 02-786 Warsaw, Poland

3. Institute of Optoelectronics, Military University of Technology, gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland

4. Faculty of Aviation, Polish Air Force University, Dywizjonu 303 No. 35, 08-521 Deblin, Poland

SELECTED PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF GRAPHENE – OXIDE – COATED DENTAL IMPLANTS

1. Introduction

The steady increase in surgical procedures to replace missing teeth has led to a growing demand for dental implants, which are primarily made of titanium or its alloys — materials that are commonly used in dental surgery due to their excellent biocompatibility. Various types of implant are used in clinical practice, but the most common are endosseous implants, which are screw-shaped and replace missing tooth roots [1, 2]. Pure titanium (98.9–99.6% Ti) and alloyed titanium (Ti-6Al-4V) are the main materials used in dental surgery. They are characterised by high biocompatibility and resistance to various types of corrosion. The TiO₂ layer formed on their surfaces creates favourable conditions for the formation of bone-like tissue and cellular reactions [3, 4, 5]. However, this process prolongs osseointegration and slows down tissue regeneration. Although this method of treating tooth loss is generally considered safe, with an approximate success rate of 90–95%, the risk of complications increases as implant-based tooth replacement procedures become more popular [6]. Introducing such a biomaterial into the human body triggers an immune response and initiates inflammatory and reparative processes. The success of the osseointegration process is influenced by several properties of the material itself, including wettability, roughness, surface energy and corrosion resistance [7]. A method for producing superhydrophilic titanium surfaces is presented in publication [8]. The modified surface demonstrated a reduced number of monocytes and macrophages (inflammatory cells), along with the formation of a thick, well-developed clot and a stable, continuous layer of platelets and plasma proteins permanently bound to the strongly hydrophilic surface under study. Therefore, it can be concluded that hydrophilic surfaces strongly promote tissue integration.

Corrado [9] presented the results of studies on the mechanical and structural properties of titanium materials coated with graphene oxide. The Ti + GO material demonstrated good wettability, with a contact angle (θ) of 44.35° between water and the tested surface. Electrochemical corrosion tests also showed an increase in corrosion resistance. Roughness analysis revealed a decrease in the parameters for the graphene oxide-coated material.

Various types of complications can occur, including mechanical, biological and patient non-compliance. Common bacterial infections include peri-implantitis, which affects approximately 20% of patients, and peri-implant mucositis, which is a milder form of infection affecting up to 50% of cases [10].

In the human oral cavity, an implant is constantly exposed to bacteria and biofilm formation, whereby microorganisms adhere to one another and to the surface in a multilayered structure. This structure is surrounded by an extremely durable outer layer that protects the bacteria from the penetration of antibiotics. Consequently, treating peri-implant infections poses a significant challenge to modern implantology. Efforts are constantly being made to improve the surface properties and antibacterial properties of the implants used [11].

Consequently, research is underway to develop new methods of modifying implants to give them improved biological, mechanical and physicochemical properties. Using nanomaterials, such as graphene oxide, could solve this problem. Due to its unique properties, including biocompatibility, the promotion of adhesion and proliferation of human osteoblast cells, and antibacterial activity, graphene oxide may represent an interesting alternative to current implantation methods [12]. Researchers conducted studies on the behaviour of cells and tissues in contact with graphene oxide [13]. They created a scaffold by coating a collagen sponge with a graphene oxide dispersion at concentrations of 0.1 and 1 $\mu\text{g}/\text{mL}$, which they then implanted into the alveolar socket following tooth extraction. It was found that graphene oxide improved mechanical strength, enzymatic resistance and the adsorption of calcium ions and proteins. Additionally, the proliferation of MC3T3-E1 osteoblasts increased significantly. Studies conducted on rats showed that the implantation of a prepared scaffold containing 1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ of graphene oxide stimulated cell ingrowth. The tissue ingrowth area was 2.5 times larger and the genetic material content in the tested scaffolds increased by a factor of 1.4 compared to the control group. Furthermore, the GO scaffold promoted bone formation, which was five times greater than in the control group.

The antibacterial properties of graphene oxide have also been demonstrated. A research group led by Ravinkumar et al. conducted a study analysing the viability of a *Staphylococcus aureus* bacterial strain cultured in the presence of graphene oxide. They observed a reduction in bacterial survival after just four hours, with survival rates at around 50%. However, after a further 20 hours of incubation, this figure had increased to around 93%. Scanning electron microscopy analysis showed that graphene oxide structures surrounded the bacteria, damaging their cell membranes. Additionally, the induction of intracellular reactive oxygen species was observed, which was associated with a decrease in microbial viability, as well as changes in the expression of cell membrane-associated proteins [14].

A preliminary literature review has demonstrated graphene oxide's great potential for modifying the surfaces of titanium dental implants. It combines desirable mechanical and biological properties, and exhibits strong antimicrobial activity — an extremely important quality in such a demanding environment as the human oral cavity. The review indicates that surfaces modified with graphene oxide stimulate cell adhesion and osteoblast differentiation, thereby favouring osseointegration processes.

This presentation outlines the preliminary findings of mechanical, biological and structural analyses of titanium materials coated with a graphene oxide layer. The following analyses were conducted: structural surface analyses using a scanning electron microscope, IR spectroscopy and LIBS; bacteriological analyses of the viability of bacteria seeded on the surface of the tested samples and the degree of growth inhibition; and preliminary mechanical tests.

2. Materials and Methods

Dental screw posts purchased from Shenzhen Felyang Medical Equipment Co., Ltd. were used in this study. The sample preparation process included disinfecting the materials in their as-delivered state with ethanol, cleaning them and activating their surfaces with low-temperature plasma using a Plasma Prep III (Garfield Ave, Westchester, PA, USA) at a power output of 100 W for 5, 10 or 15 minutes. Next, graphene oxide was applied by immersing the samples in an aqueous GO suspension with a concentration of either 500 mg/L or 5 g/L (Graphene Supermarket, NY 11933, USA) for a specified time. Excess suspension was then removed using an Eppendorf 5702 RH device. The samples were then dried at room temperature for approximately 10 minutes. In the next step, gold nanoparticles were deposited using an EM ACE600 high-vacuum sputter coater (Leica Microsystems GmbH, Germany) to form a 3–5 nm thick layer. By combining the specified parameters in this way, 25 measurement samples were obtained.

3. Research results

Structural analyses using SEM, Raman spectroscopy and LIBS were performed, along with factor analysis. Preliminary mechanical tests were also conducted, including static compression testing of implants embedded in bone tissue. Additionally, tests were performed to determine the extent of bacterial growth inhibition in *Staphylococcus aureus*.

Selected results of the SEM (Quanta 250 FEG) analysis of the implant surfaces are presented in Fig. 1. The arrows in this figure indicate the structure of graphene oxide flakes deposited on the surface.

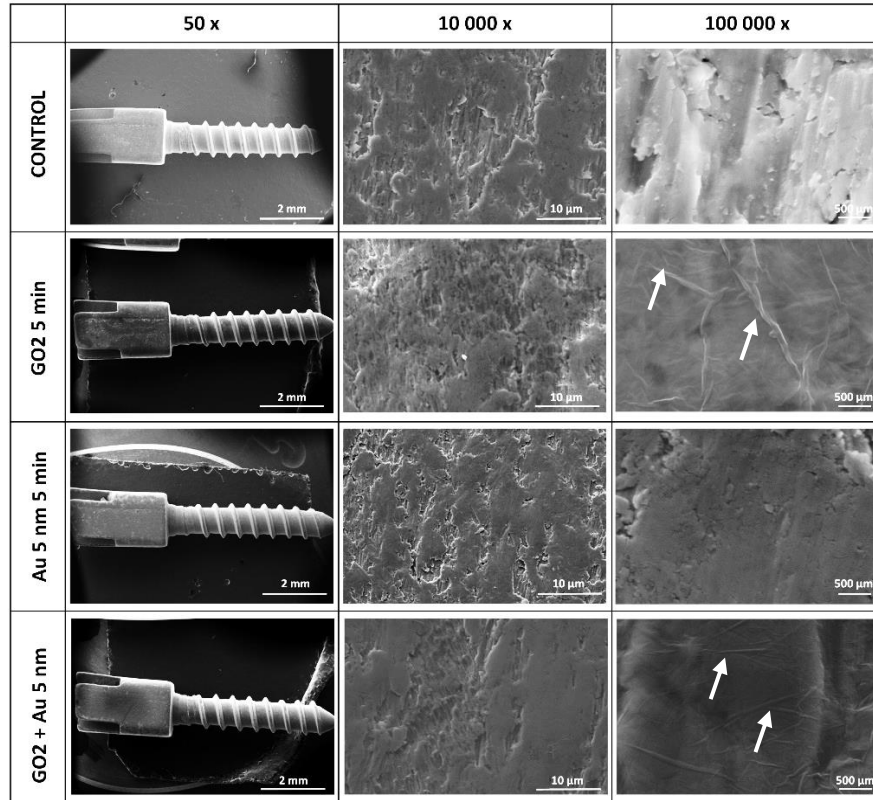


Fig. 1. The sample surfaces were analysed using SEM at magnifications of 50×, 10,000× and 100,000×.

The antibacterial properties of graphene oxide deposited on the surface of the tested samples (Fig. 2) were analysed by determining the viability of *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923) after a 24-hour incubation period under standard conditions at 37 °C. The PrestoBlue assay (ThermoFisher, Waltham, MA, USA) was performed by adding the reagent to the liquid culture and incubating for 30 minutes. The absorbance was then measured at a wavelength of 570 nm with a reference wavelength of 600 nm. The test was performed in triplicate.

Cultures on pure titanium exhibited the highest viability value, reaching over 140%. In contrast, for the sample with a deposited layer of GO1 graphene (500 mg/L) and a 5-nm-thick gold layer following 5 minutes of plasma treatment, the viability of the microorganisms dropped to approximately 60%. Similar results were obtained for cultures on a sample with a 3 nm thick gold layer following 10 minutes of plasma surface activation.

3. Conclusions

Based on the studies conducted, it was found that graphene oxide nanoparticles had been successfully deposited on the surface of the samples tested. The boundaries of the graphene flakes and the characteristic carbon groups were visible, indicating the presence of GO. Tests on the viability of *Staphylococcus aureus* bacteria showed reduced viability in all samples tested compared to the control group.

Referencje:

- [1] Gaviria, L., Salcido, J. P., Guda, T., & Ong, J. L. (2014). Current trends in dental implants. *Journal of the Korean Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 40(2), 50–60. <https://doi.org/10.5125/jkaoms.2014.40.2.50>
- [2] Begum, S., Peeran S. Classification of dental implants. In: 9 Int Dental Students, 7th Dental Surgeons Conf 2021 Souvenir. 65.
- [3] Oldani, C., Dominguez, A. "Titanium as a Biomaterial for Implants." *Recent advances in arthroplasty* 218 (2012): 149-162.
- [4] Hansson, H. A., Albrektsson, T., & Brånemark, P. I. (1983). Structural aspects of the interface between tissue and titanium implants. *The Journal of prosthetic dentistry*, 50(1), 108–113. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(83\)90175-0](https://doi.org/10.1016/0022-3913(83)90175-0)
- [5] Legeros, R. Z., & Craig, R. G. (2009). Strategies to affect bone remodeling: Osteointegration. *Journal of Bone and Mineral Research*, 8(S2), S583–S596. doi:10.1002/jbmr.5650081328
- [6] Karoussis, I. K., Salvi, G. E., Heitz-Mayfield, L. J., Brägger, U., Hämmerle, C. H., & Lang, N. P. (2003). Long-term implant prognosis in patients with and without a history of chronic periodontitis: a 10-year prospective cohort study of the ITI Dental Implant System. *Clinical oral implants research*, 14(3), 329–339. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.000.00934.x>
- [7] Rupp, F., Liang, L., Geis-Gerstorfer, J., Scheideler, L., & Hüttig, F. (2018). Surface characteristics of dental implants: A review. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 34(1), 40–57. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.09.007>
- [8] Milleret, V., Tugulu, S., Schlottig, F., & Hall, H. (2011). Alkali treatment of microrough titanium surfaces affects macrophage/monocyte adhesion, platelet activation and architecture of blood clot formation. *European cells & materials*, 21, 430–444. <https://doi.org/10.22203/ecm.v021a32>
- [9] Corado, H. P. R., Moura de Souza Soraes, F., Barbosa, D. M., Lima, A. M., & Elias, C. N. (2022). Titanium Coated with Graphene and Niobium Pentoxide for Biomaterial Applications. *International journal of biomaterials*, 2022, 2786101. <https://doi.org/10.1155/2022/2786101>
- [10] Lee, C. T., Huang, Y. W., Zhu, L., & Weltman, R. (2017). Prevalences of peri-implantitis and peri-implant mucositis: systematic review and meta-analysis. *Journal of dentistry*, 62, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.04.011>
- [11] Mombelli A. (2012). Antimicrobial advances in treating periodontal diseases. *Frontiers of oral biology*, 15, 133–148. <https://doi.org/10.1159/000329676>
- [12] Li, X., Liang, X., Wang, Y., Wang, D., Teng, M., Xu, H., et al. (2022b). Graphene-based nanomaterials for dental applications: principles, current advances, and future outlook. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 10, 804201. doi:10.3389/fbioe.2022.804201
- [13] Nishida, E., Miyaji, H., Kato, A., Takita, H., Iwanaga, T., Momose, T., Ogawa, K., Murakami, S., Sugaya, T., & Kawanami, M. (2016). Graphene oxide scaffold accelerates cellular proliferative response and alveolar bone healing of tooth extraction socket. *International journal of nanomedicine*, 11, 2265–2277. <https://doi.org/10.2147/IJN.S104778>
- [14] Ravikumar, V., Mijakovic, I., & Pandit, S. (2022). Antimicrobial Activity of Graphene Oxide Contributes to Alteration of Key Stress-Related and Membrane Bound Proteins. *International journal of nanomedicine*, 17, 6707–6721. <https://doi.org/10.2147/IJN.S387590>

УДК 539.4.013.3

Микола Шашків, к.т.н., доц.; Микола Підгурський, д.т.н., проф.; Іван Підгурський, к.т.н., доц.; Олег Підлужний, асп.; Василь Антонюк, асп.; Василь Оливко, асп.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ВПЛИВ ТРІЩИНИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМІВНИЙ СТАН ШВЕЛЕРА З КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРУЖЕНЬ У ВИГЛЯДІ КРУГЛОГО ОТВОРУ

Анотація. Методом скінчених елементів проведено оцінку напружено-деформівного стану швелера за умов чистого згину та наявних у його стінці отвору та крайової тріщини.

Ключові слова: швелер, чистий згин, круглий отвір, крайова тріщина, метод скінчених елементів, напружено-деформівний стан.

Mykola Stashkiv, Mykola Pidgurskyi, Ivan Pidgurskyi, Oleh Pidluzhnyi, Vasyl Antoniuk, Vasyl Olyvko

EFFECT OF A CRACK ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A CHANNEL SECTION WITH A CIRCULAR HOLE STRESS CONCENTRATOR

Abstract. The stress-strain state of a channel section under pure bending and in the presence of a hole and an edge crack in its web was evaluated using the finite element method.

Keywords: channel section, pure bending, circular hole, edge cracks, finite element method, stress-strain state.

Тонкостінні металеві стержні широко використовуються як несучі елементи у будівництві, машинобудуванні, автомобілебудуванні, авіації, вітроенергетиці. У таких елементах передбачені різноманітні конструктивні та технологічні концентратори напружень, зокрема отвори. Наявність концентраторів спричиняє підвищення рівня напружень, що може призвести до руйнування конструкцій. Особливо важливою дана проблема є для циклічно навантажуваних конструкцій, у яких за наявних дефектів можуть бути і тріщиноподібні дефекти, які, за певних умов, можуть призвести до втомних руйнувань.

В інженерній практиці для розрахунку тонкостінних стержнів використовують аналітичні залежності (для простих перерізів і навантажень), а також пластинчасто-оболонкові моделі для детального аналізу або метод скінчених елементів з балковими елементами типу beam188/beam189 (ANSYS).

У роботі досліджується розподіл еквівалентних напружень у сталевому гарячекатаному швелері № 12 (згідно ДСТУ 3436-96 висота швелера $H = 120$ мм, ширина полиці $B = 52$ мм, товщина полиці $\delta = 4,8$ мм, товщина стінки $t = 7,8$ мм) за умови чистого згину. Згинальний момент становить 5400 Н·м, що відповідає максимальним еквівалентним напруженням $\sigma_e \approx 100$ МПа у полицях бездефектного швелера. Дослідження виконано методом скінчених елементів з використанням програмного комплексу ANSYS.

Розглянуто напружено-деформований стан (НДС) швелера для таких випадків концентраторів напружень: швелер з круглим отвором діаметром 20 мм, розташованим на одній третій висоти стінки швелера (40 мм від нижнього зовнішнього кута швелера); швелер з тріщиною різної довжини, що розвивається в стінці від нижнього кута швелера; тріщина в стінці, що підростає до отвору, розташованого на відстані 40 мм від кута швелера; тріщина в стінці, що проросла в отвір.

Результати моделювання НДС швелера без концентратора напружень та з концентратором напружень у вигляді отвору діаметром 20 мм, що розташований на відстані 40 мм від нижнього зовнішнього кута швелера показано на рис. 1.

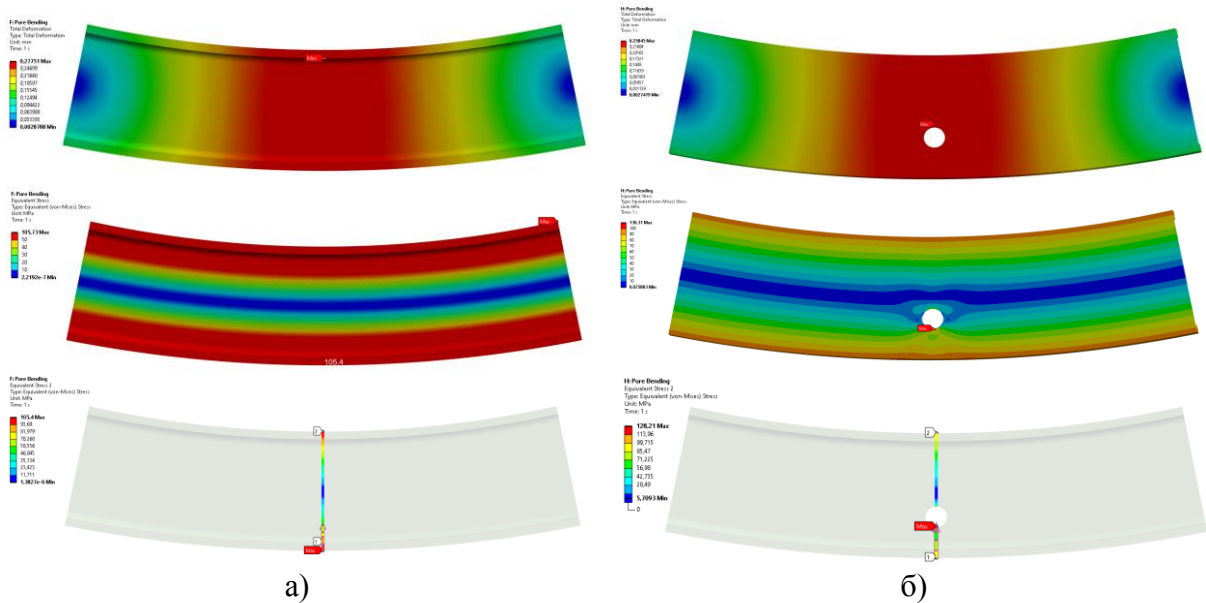


Рисунок 1 – НДС швелера без концентратора напружень (а) та з концентратором напружень (круглим отвором) (б) за умов чистого згину

На рис. 2 графічно показано розподіл напружень по лінії поперечного перетину, що проходить через центр отвору. Також для порівняння представлені напруження у бездефектному перетині.

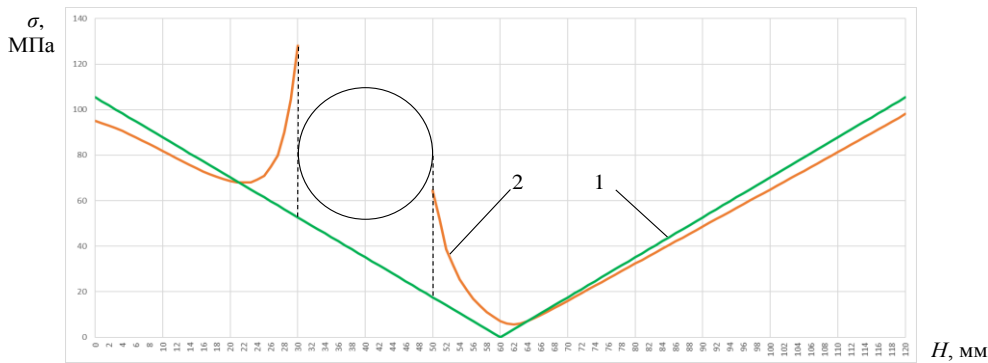


Рисунок 2 – Розподіл напружень у поперечному перетині швелера без дефекту (1) та з концентратором напружень у вигляді круглого отвору (2)

Аналіз результатів моделювання (рис. 2) показує, що наявність отвору дещо знижує еквівалентні напруження σ_e у кутових точках стінки швелера (на 6,6-9,5% – з 105 МПа до 95-98 МПа). Максимальні напруження у нижній точці отвору становлять 128,03 МПа (в 2,4 рази більше, ніж для такої ж точки у бездефектному профілі) та 64,55 МПа у верхній точці отвору (в 3,7 рази більше, ніж для аналогічної точки у бездефектному профілі).

Для випадку, коли у поперечному перетині швелера розвивається крайова тріщина, відбувається значний перерозподіл напружень в області отвору. На рис. 3,а показано характер розподілу напружень для випадку підростання тріщини до отвору (довжина тріщини становить 28 мм, тобто її вершина знаходиться за 2 мм до отвору). На рис. 3,б показано розподіл напружень для випадку, коли тріщина досягла отвору.

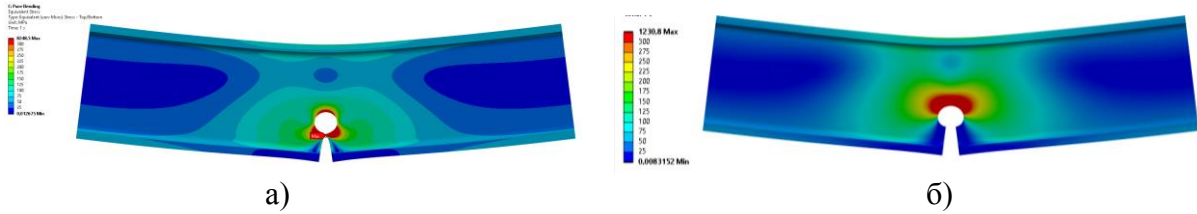


Рисунок 3 – Розподіл напружень при підростанні тріщини до отвору (а) та при злитті тріщини з отвором (б)

На рис. 4 графічно показано розподіл напружень по лінії вздовж стінки швелера для випадків, коли: є лише концентратор напружень у вигляді круглого отвору (крива 1); тріщина довжиною $L = 28$ мм наближається до краю круглого отвору (крива 2); тріщина проросла в отвір (крива 3); наявна лише тріщина довжиною $L = 50$ мм, вершина якої умовно співпадає з верхнім краєм отвору (крива 4).

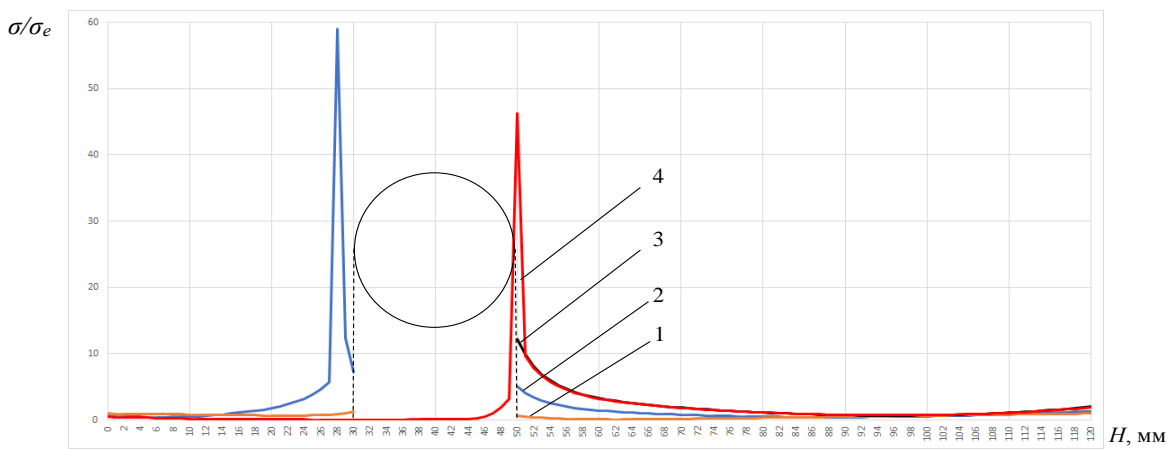


Рисунок 4 – Графіки приведених напружень у поперечному перетині швелера: 1 – з концентратором напружень у вигляді круглого отвору; 2 – з отвором та тріщиною довжиною $L = 28$ мм; 3 – з тріщиною, що злилась з отвором; 4 – з тріщиною довжиною $L = 50$ мм (без отвору).

Аналіз результатів моделювання перерозподілу напружень показує, що за наявної тріщини довжиною $L = 28$ мм відбувається підвищення напружень приблизно в 5,6 раза у нижній точці круглого отвору та в 7,8 рази у верхній точці отвору. Зазначимо, що результати отримано для умов чистого згину елемента.

При злитті тріщини з отвором напруження у верхній точці отвору зростають майже в 19 разів у порівнянні з напруженнями в цій точці отвору за відсутності тріщини. Необхідно зауважити, що напруження у цій точці будуть приблизно в 3,8 рази нижчими у порівнянні з напруженнями у вістрі тріщини довжиною $L = 50$ мм (за умови відсутності отвору). Це, загалом, узгоджується з практикою «розвантаження» вістря тріщини шляхом засвердлювання отвору у її вершині.

Проведені дослідження дозволяють оцінити складний напружено – деформований стан швелера з концентраторами напружень двох типів – з круглим отвором та крайовою тріщиною, що розвивається у поперечному перетині швелера. Результати можуть бути корисними при проектуванні несучих конструкцій з технологічними отворами та оцінці довговічності елементів на стадії зародження та розповсюдження втомних тріщин за наявності отворів.

UDC 620.179.18

Valentyn Uchanin¹, Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences; Oleg Karpash², Professor, Doctor of Technical Sciences; Sergiy Voytenko², Associate professor, Candidate of Technical Sciences; Ihor Rybitskyi², Professor, Doctor of Technical Sciences; Maksym Karpash³, Professor, Doctor of Technical Sciences

¹Physical and Mechanic Institute n.a.G.V.Karpenko, NAS of Ukraine, Ukraine

²Ivan Kozhedub National Air Force University, Ukraine

³King Danylo University, Ukraine

EDDY CURRENT AND ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE TECHNIQUES FOR STRUCTURAL INTEGRITY MONITORING

Abstract. The article presents comprehensive research results on improving non-destructive testing technologies for monitoring the integrity of critical structures operating under high static, cyclic, and thermal loads of advanced eddy current and ultrasonic techniques.

Keywords: non-destructive testing, eddy current, ultrasonic testing, structural integrity monitoring, crack detection.

Monitoring the integrity of critical structures using nondestructive testing (NDT) is essential for preventing catastrophic failures with significant economic and environmental consequences, particularly in structures operating under high static and cyclic loads, pressure, and elevated temperatures in thermal and nuclear power engineering, transportation, oil and gas industries, and aviation. This paper presents comprehensive research and development of advanced eddy current (EC) and ultrasonic NDT techniques for structural integrity assessment, conducted at the G.V. Karpenko Institute of Physics and Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ivan Kozhedub National Air Force University, and King Danylo University. The study focuses on developing and applying enhanced eddy current methods for detecting surface and subsurface defects in critical structural components. A novel high-frequency parametric pencil-type eddy current transducer (ECT) with a 1.0 mm diameter ferromagnetic core was developed, featuring an initial magnetic permeability $\mu = 500$ and optimized geometry for detecting surface cracks longer than 2.0 mm (Fig. 1).

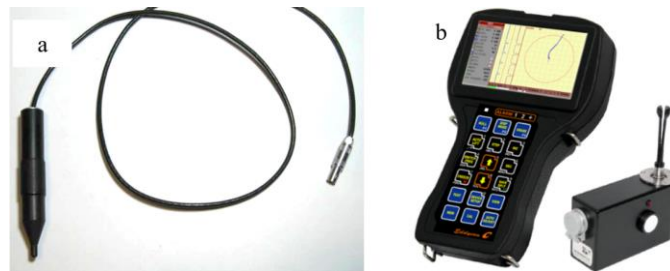


Fig. 1. (a) parametric ECT of the “pencil type”; (b) portable eddy current flow detector Eddycon with a rotary scanner for hole inspection.

The transducer design incorporates a 0.5 mm distance from winding start to working end, ensuring high wear resistance during surface scanning operations.

Experimental validation was performed using D16T aluminum alloy standard samples with artificial defects ranging from 0.1 to 2.0 mm in depth and 30 mm in length, created using electro-erosion methods to achieve consistent 0.1 mm crack widths. Testing utilized universal Eddycon C eddy current flow detectors operating at frequencies up to 700 kHz. The developed EDDYLINE-type EC probes demonstrated significant improvements in inspection productivity, achieving 4-5 times faster inspection rates than conventional methods.

Key findings include enhanced defect detection capabilities through signal differentiation in the complex plane, enabling improved reliability by distinguishing between actual defects and lift-off interference. Fig. 2 shows the characteristic sensitivity distributions obtained experimentally using a double differentiation ECT of the MDF 1201 type during sequential scanning of a local defect zone simulated by drilling with a diameter of 1.0 mm.

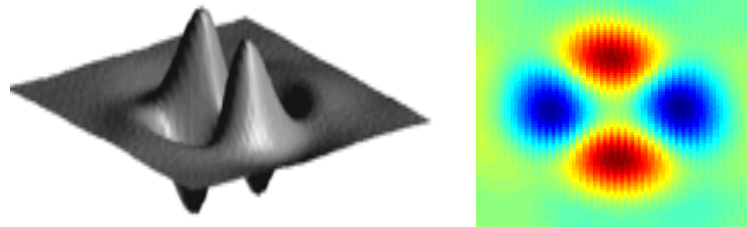


Fig. 2. Four-point spatial signal distribution with two positive and two negative peaks for local defects.

The research addresses limitations of existing NDT methods, including sensitivity variations across different materials, interference from structural variations, thickness changes, curvature effects, and coating properties. The developed methodologies demonstrated successful application in real-world scenarios, including gas turbine compressor blade inspection with 4 mm long, 0.2 mm deep artificial defects, achieving high repeatability and clear signal orientation within automatic signaling sector frames. The techniques effectively detected surface-breaking cracks in aircraft structures and multi-layered assemblies.

Acoustic NDT techniques were also investigated for pipe product inspection in diversified industrial sectors. The acoustic inspection method is widely used in various industries, primarily in ultrasonic flaw detection and thickness measurement of structures, equipment and materials. One of the main characteristics of the acoustic inspection method is sensitivity - the ability of the method to detect defects of minimal size. A feature of the acoustic method of control is the conditions for the propagation of ultrasonic vibrations (USV) in controlled structures, which is the fact that when the USV hits the surface of the interface of the media (piezoelement - contact liquid layer - TO), acoustic vibrations that propagate in the media according to the laws of acoustic optics have the property of being reflected (reflected), refracted and transformed into other types of waves (longitudinal, transverse, surface and others), which significantly reduces the power (up to 90% or more) of the generated volume of the USV power, even with their normal input (incidence) on the controlled surface, there is a so-called deterioration of the transverse (frontal) resolution and a decrease in the intensity of the USV beam and, as a result, a decrease in the sensitivity of the method. In addition, in practice, up to 80% of the inspected products are those that have a curved (cylindrical, spherical) surface, which, due to the above-mentioned properties of the propagation of ultrasound, as well as their defocusing by the outer and inner surfaces of the pipe, the amplitude of the signal emitted by the piezotransducer is significantly attenuated even more significantly, up to 98%.

It was suggested that the task of increasing the sensitivity of control can be solved by increasing the fraction of ultrasonic energy of the ultrasonic beam, which is introduced into the pipe product. One way to implement this task can be to fulfill the condition if all elementary rays of the ultrasonic beam are introduced into the TO normal to its outer surface, that is, there will be no phenomena of reflection, refraction and transformation of the ultrasonic waves will be absent or minimized.

As a result of studies of the propagation of high-frequency elastic waves in stressed-deformed media with a complex inhomogeneous stress distribution, a new approach was developed, which uses the introduction of an effective medium with reduced elastic moduli, depending on the spatial distribution of transverse stresses. This made it possible to reduce the

problem of wave propagation in media with an inhomogeneous stressed-deformed state to wave propagation in weakly inhomogeneous media, and also to use the beam method to study the laws of elastic wave propagation in media with a flat and cylindrical-layer stress distribution. Using the results of the above studies, a series of different designs of focusing piezotransducers (Fig. 3) and special scanners for their retention on controlled pipe products were developed, tested and implemented.

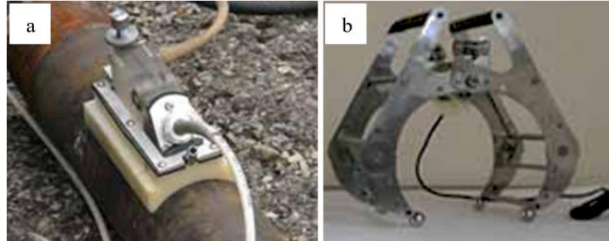


Fig. 3. (a) focusing piezotransducer; (b) special scanner

These piezo transducers were equipped with specialized mobile and portable installations for non-destructive testing of oil pipelines. With the help of these devices, defects of operational (corrosion-fatigue cracks, non-penetration, etc.) and factory origin (various inclusions, fiber bends, etc.) were reliably detected.

A technology for focusing piezoelectric transducer prisms was developed, ensuring near-normal introduction of ultrasonic waves into cylindrical surfaces and enabling reliable detection of corrosion-fatigue cracks in drill pipe threads. Based on studies of contact mechanics, new diagnostic indicators for evaluating threaded connection quality were proposed, including stress relaxation phenomena, actual contact area, and radial deformation characteristics.

Threaded connections are widely used in various fields of technology due to their universality, ease of manufacture, reliability, ease of assembly and disassembly, and complete interchangeability. Threaded connections are divided into detachable and non-detachable. Detachable connections require special attention, as they allow assembly and disassembly without damaging the material of the parts.

Such connections are widely used in the oil and gas industry during the drilling of oil and gas wells. Drill pipes, 8-12 meters long, are connected using threaded connections, which are subjected to repeated screwing and unscrewing during the process of replacing drill bits.

The conditions for ensuring the operational reliability of threaded connections should be the following: the possibility of quality control of the screwing process to achieve the regulated screwing torque; assessment of the operational characteristics (strength and tightness) of the threaded connection after screwing at different stages of operation when exposed to the entire range of loads (alternating stresses, corrosive environment, temperature fluctuations, etc.).

At the present stage, quality control of threaded connections usually involves checking the compliance of dimensions, thread profile, surface cleanliness, and the correct assembly of the connection. For this, a visual inspection, a measuring tool (for example, gauges) is used, and strength and tightness tests are also carried out, depending on the purpose of the connection.

However, these methods do not ensure the operational reliability of threaded connections, which leads to the occurrence of stress corrosion cracks (Fig. 4, a) or separation of the threaded connection - in case of failure to reach the regulated screwing torque, or destruction of the thread profile - in case of exceeding the values of the regulated (load) screwing torque.

We conducted research into the features of contact between roughness surfaces that occur in threaded connections, namely the phenomenon of relaxation of contact pressures. It

has been established that with an increase in torque and reaching the limit of proportionality, permanent deformation occurs and the moment comes when the increase in the deformation value occurs without an increase in load (torque), and stresses close to the yield strength occur in the joint material. Thus, the moment of reaching stresses close to the yield point in a threaded connection can be taken as a diagnostic sign of the quality of threaded connections (Fig. 4, b).

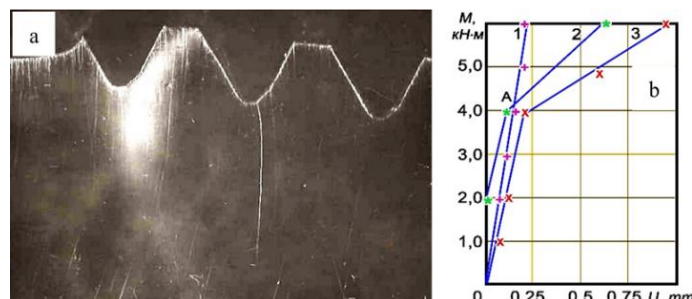


Fig. 4. (a) stress corrosion cracks of threaded connection; (b) dependency between torque and elastic (1), plastic (2), total (3) deformations

Since the contact of solids occurs discretely through the protrusions of the stiffeners, the actual contact area is represented by the zones of setting and the zones of tight contact, with a width, as a rule, from 0.1 to 2 microns. To measure the actual contact area, it was proposed to use an acoustic method. Methods for acoustic quality control of screwing threaded connections of drill pipes, a method for controlling the tightness of threaded connections, and others were proposed.

Based on the research, technical means (specialized piezo transducers and scanners) were developed, manufactured, and industrially tested for quality control of various types of threaded connections.

The conducted research demonstrates significant advancements in the field of non-destructive testing of critical structures, particularly through the refinement of eddy current and acoustic inspection methods. The development of new parametric, double-differential, and specialized eddy current transducers has substantially increased the sensitivity, selectivity, and reliability of flaw detection in materials with varying electrical and magnetic properties. These solutions enable effective detection of both surface and subsurface cracks, including short and “zero-opening” defects, and allow inspection of complex-geometry components without dismantling, which is essential for aviation and power engineering applications. Acoustic testing improvements, particularly the development of focusing piezoelectric transducers and new approaches to ultrasonic beam introduction, have addressed the long-standing problem of sensitivity loss in curved and threaded components. The proposed diagnostic criteria based on contact mechanics - actual contact area, stress relaxation, and radial deformation parameters. Overall, the results obtained confirm the effectiveness of the proposed technologies and demonstrate their high potential for improving the reliability, safety, and efficiency of NDT across multiple industries. The new methods and instruments can be successfully applied not only in aviation and energy sectors but also in oil and gas production, mechanical engineering, and other fields requiring high standards of structural integrity monitoring.

Results indicate that integrating advanced eddy current and ultrasonic techniques provides comprehensive solutions for structural health monitoring, enabling early detection of critical defects and supporting preventive maintenance strategies. The research contributes to improved safety and reliability of critical infrastructure through enhanced NDT capabilities, addressing the growing demand for effective structural integrity assessment methods in industrial applications. The developed techniques offer significant advantages regarding inspection speed, reliability, and applicability across diverse structural configurations and materials.

**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 (Польща)
Маріборський університет (Словенія)
Товариство зварників України**

II Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА”

ISBN 978-617-8751-20-3

Підписано до друку 04.06.2026. Формат 60×90, 1/16.
Друк лазерний. Папір офсетний. Гарнітура TimesNewRoman.
Умовно–друк. арк. 18,25. Наклад – 100 прим.
Замовлення № 1-04062026

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