МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Збірник наукових праць

Випуск 12
(червень, 2018)

Луцьк 2018

УДК 006, 537, 538, 546, 620, 621, 681

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 11 від 22 червня 2018 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:
Серія КВ №18466-7266Р від 15.12.2011р.

ISSN: 2313-5352

Засновник Луцький національний технічний університет

Друкується в авторській редакції

«Перспективні технології та прилади» // м. Луцьк червень 2018р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2018.-196 с.

В збірник включені статті, що відображають наукові та практичні результати сучасних розробок технології машино- та приладобудування, особливості експлуатації та повірки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та медичних приладів і систем. Представленні сучасні досягнення та перспективні напрямки розвитку технології виготовлення та складання машин і приладів в різних галузях народного господарства.

Адреса організаційного комітету:
Україна, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, Луцький національний технічний університет, технологічний факультет, кафедра приладобудування.
Телефон: (0332) 26-49-43
Факс: (0332) 74-48-40
e-mail: confkptm@gmail.com

© Луцький національний технічний університет, 2018 р.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Савчук Петро Петрович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Марчук Віктор Іванович, д.т.н., професор, Луцький НТУ (відповідальний редактор)
Заблоцький Валентин Юрійович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Шваб'юк Василь Іванович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Шабайкович Віктор Антонович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Григор'єва Наталія Сергіївна, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Ярошевич Микола Павлович, д.т.н., професор, Луцький НТУ
Андрущак Ігор Євгенович д.т.н., професор, Луцький НТУ
Пастернак Ярослав Михайлович, д.ф.-м.н., доцент, Луцький НТУ
Скоропад Пилип Ізидорович, д.т.н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»
Грицай Ігор Євгенович, д.т.н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»
Захаров Ігор Петрович, д.т.н., професор, провідний науковий співробітник ННЦ «Інститут метрології»
Ларшин Василь Петрович, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет
Федосов Сергій Анатолійович, д.ф.-м.н., професор СНУ імені Лесі Українки
Гулай Любомир Дмитрович, д.х.н., професор СНУ імені Лесі Українки
Гераїмчук Михайло Дем'янович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Антонюк Віктор Степанович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Тимчик Григорій Семенович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Куц Юрій Васильович, д.т.н. професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Лебедєв Володимир Георгійович, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет
Тонконогий Володимир Михайлович, д.т.н., професор, Одеський національний політехнічний університет
Коломієць Леонід Володимирович, д.т.н., професор, Одеська державна академія технічного регулювання та якості
Ткачук Роман Андрійович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Яворський Богдан Іванович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Ляшук Олег Леонтійович, д.т.н., доцент, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Гевко Богдан Матвійович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І.Пулюя
Пилипець Михайло Ількович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Васильків Василь Васильович, д.т.н., доцент, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Луців Ігор Володимирович, д.т.н., професор, Тернопільський НТУ ім. І. Пулюя
Пермяков Олександр Анатолійович, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Харківський політехнічний інститут»
Новіков Федір Васильович, д.т.н., професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
Джугурян Тигран Герасимович, д.т.н., професор, Щецінська морська академія (Польща)
Станіслав Іван, д.т.н., професор, декан, Щецінська морська академія (Польща)
Мірослав Пайор, д.т.н. професор, Західнопоморський технічний університет в м. Щецінь (Польща)
Збігнєв Матущак, д.т.н., професор, Щецінська морська академія (Польща)
Даріуш Тарнаповіч, д.т.н., професор, Щецінська морська академія (Польща)
Марек Опеляк, д.т.н., ректор, Любленська політехніка (Польща)
Антоній Свіць, д.т.н., професор, Любленська політехніка (Польща)
Гулай Ольга Іванівна, д.п.н., доцент, Луцький НТУ
Лапченко Юрій Сергійович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Денисюк Віктор Юрійович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Симонюк Володимир Павлович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Пташенчук Віталій Віталійович, к.т.н., доцент, Луцький НТУ
Ящинський Леонід Васильович, к.ф-м.н., доцент, Луцький НТУ
Луньов Сергій Валентинович, к.ф-м.н., доцент, Луцький НТУ
Марчук Ірина Вікторівна, к.т.н., доцент, Луцький НТУ (відповідальний секретар)

ЗМІСТ

Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.
Дослідження та розробка методів стандартних і спеціальних випробувань матеріалів на опір безударному абразивному зношуванню……...6
Божко Т.Є., к.т.н., Гальчук Т.Н., к.т.н.
Вплив умов різання на залишкові напруження 1 роду при токарній обробці пористого матеріалу……17
Verba I., Ph.D., Danylenko O., Ph.D., Yakhno A., bachelor, master's student
Machine-building technical exclusion: trends, perspectives, ways……23
Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.
Балансування обертових інструментальних систем: багато питань і деякі відповіді……30
Гевко Ів.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А.
Синтез способів навивання спіралей шнеків……39
Глухова Н.В.[1], Пісоцька Л.А.[2]
Інформаційна технологія для аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання ……..……48
Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.
Проектування технологічних модулів роботизованого складання……..53
Гулієва Н.М., к.т.н., Булига В.Р.
Особливості автоматизованого проектування процесу лиття……...……57
Данильчук С.П. , м.н.с.
Одержання та фотоелектричні властивості твердих розчинів $tl_{1-x}in_{1-x}sn_xse_2$ (x=0,1–0,25) ……62
Замуруєва О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицький А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н.
Підвищення фотопровідності кристалів халькогеніду індинату талію ($tlinse_2$) ……67
Караченцев В.Є., Денисюк В.Ю., *к.т.н.*
Основні властивості і характеристики аналогових сигналів……72
Kisil T. Yu. , Ph.D., associate professor, Kunytska L.G., Ph.D., associate professor, Tuz V.V. , Ph.D., associate Professor
Specifying the form of immersion probe in the piezoelectric liquid viscosimeters for improving measurement accuracy……77
Корбут Є.В., канд.тех. наук, доцент
Особливості обробки впкм процесом різанням ……82
Коробко А. І., канд. техн. наук, доц.
Оцінювання впливу випадкової і методичної похибок на результат вимірювання (в порядку обговорення) ……87
Кримусь А.С. , Мирончук Г.Л. , к.ф.м.н., Хмарук Г.П. , м.н.с, Мирончук Д.Б., студ.
П'єзоелектричні сенсори на основі халькогенідних монокристалів $aggage_3se_8$……..…93
Лебедев В.Г., д.т.н., проф., Фроленкова О.В., ассистент
Имитационное моделирование процесса шлифования термобарьерного покрытия zro_2 кругами из синтетических сверхтвердых материалов……..97
Ляшук О. Л. д. т. н, доц., Дячун А.Є. к. т. н. доц, О.Л. Третьяков
Дослідження деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок пристроєм із декількома різцями……..105
Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.
Технологічне забезпечення точності та якості поверхонь обертання в підшипниковому виробництві……111
Махновець Г.В. , м.н.с., Мирончук Г.Л. , к.ф.м.н., Піскач Л.В. , к.х.н., Федосов С.А. , д.ф.м.н.
Електричні та фотоелектричні властивості кристалів $tl_{1-x}ga_{1-x}sn_xse_2$ (x=0,05; 0,1) ……...119
Равська Н.С., д.т.н., проф.,Парненко В. С., асистент
Визначення мінімального допустимого діаметра дискової обкатної фрези при обробцівідрізних пил з нерівномірним кроком……...124
Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.
Програмно-апаратне забезпечення симуляторів руху на основі приводів просторового

компонування……..130

Рудик В.Ю., Терещенко М.Ф., Рудик Т.О.
Розподіл магнітної індукції на індукторах апарату фізіотерапії «мит-11т» ……138

Симонюк В.П., к.т.н., Денисюк В.Ю., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Красовський В.В.
Дослідження залежностей режимів вібрування на рух робочого середовища при вібраційній обробці……143

Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.
Удосконалена радіоелектронна система для тренуваннь біатлоністів……..150

Тимчик Г. С., д.т.н., професор, Вислоух С. П., к.т.н., доцент, Матвієнко С. М., асистент
Контроль складу речовин за допомогою «методу теплопровідності» ……157

Ткачук А.А., к.т.н., Терлецький Т.В., к.т.н., доцент, Кононенко А.С.
Розроблення інструменту для поверхневого пластичного деформування з можливістю застосування індуктивних давачів для активного контролю процесу оброблення……165

Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.
Притяжение немагнитных металлов в технологиях магнитно-импульсной обработки металлов……...173

Швець С. В., к.т.н., Криворучко Д. В., д.т.н.
Особливості конструювання протяжок з використанням cad/cam–систем……...179

Яремчук Н. А. к.т.н. проф., Года О. Ю.
Спосіб підвищення точності оцінювання комплексного показника якості складних обєктів за їх ординальними властивостями……...185

УДК 669.017:620.178.16

Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.
Запорізький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ СТАНДАРТНИХ І СПЕЦІАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАТЕРІАЛІВ НА ОПІР БЕЗУДАРНОМУ АБРАЗИВНОМУ ЗНОШУВАННЮ

Проведено аналіз і дослідження стандартних та спеціальних методів випробувань матеріалів на опірність абразивному зношуванню. Показані переваги і недоліки досліджень матеріалів на зносостійкість деталей безпосередньо в виробничих умовах на діючому обладнанні в порівнянні з лабораторними методами. Показана можливість спрощення та прискорення досліджень в промислових умовах шляхом використання зразків, вставлених в натурні деталі. Виконано порівняльний аналіз схем та конструкцій приладів та установок, створених для проведення лабораторних випробувань. Наведені схеми стендів, створених в Запорізькому національному технічному університеті для випробувань матеріалів на зносостійкість напівзакріпленим абразивом при задіянні корозійного фактору, або без його впливу та можливості зміни параметрів процесу випробувань (тиск абразиву, твердість абразивних зерен, температура) в широких межах. Показані принципи проектування обладнання та подана методика досліджень. На прикладі трьох сталей різного хімічного складу (1 – сталь 50Х; 2 – сталь 90Х3; 3 – сталь 120Х3) та різною структурою (1 – мартенсит, 2 – мартенсит та метастабільний аустеніт, 3 – переважно метастабільний аустеніт) показані результати випробувань на інтенсивність зношування.

Ключові слова: абразивне зношування, лабораторні випробування, установка для випробувань, методика випробувань.

Вступ. Однією з найважливіших складових вирішення проблеми зношування деталей машин є випробування на зносостійкість. Відомо багато способів і схем проведення випробувань, як в лабораторних, так і в виробничих умовах.

На перший погляд при вирішенні прикладних задач підвищення зносостійкості деталей найбільш достовірними і надійними можуть бути випробування деталей (матеріалів) безпосередньо в виробничих умовах на діючому обладнанні.

Однак, по-перше дуже часто практично неможливо провести випробування в умовах виробничого процесу по ряду причин. Особливо, якщо мова йде не про поодинокі випробування деталей і матеріалів, а стоїть завдання встановлення закономірностей зношування групи матеріалів в різному структурному стані.

По-друге, в виробничих умовах, якщо мова йде про тривалі випробування неминучі коливання параметрів умов зношування (тиску, температури, фракційний склад абразивних мас та ін.). Це обов’язково призводить до значних похибок результатів випробувань. Наприклад, при випробуваннях облицювальних пластин прес-форм вогнетривкого виробництва [1] з одного і того ж матеріалу (сталь Х12) в одному і тому ж структурному стані на одному й тому ж пресі коливання результатів досягали 70 %. Тому нескладні розрахунки показують, що для встановлення закономірностей зношування з точністю 90–95 %, треба було б випробувати десятки дослідних деталей одного виду і понести великі матеріальні та часові витрати. А в тих випадках, коли не виключено, що серед досліджуваних матеріалів будуть зустрічатися такі, які по зносостійкості нижче, ніж деталі діючого виробництва на даний час, вирішення питання про проведення виробничих випробувань ще більш ускладнюється.

У деяких випадках, якщо мова йде про невеликі деталі з низьким терміном служби, виробничі випробування можуть бути цілком ефективними. Так, наприклад, при пресуванні карбідкремнійових нагрівачів методом екструзії тривалість роботи деталей оснастки складає всього кілька годин [2].

У техніці дуже багато прикладів проблем зношування невеликих деталей (деякі види бил молоткових дробарок, робочі елементи машин для різання асфальту – та інші. Тому до теперішнього часу багато дослідників проводять випробування у виробничих умовах на діючому обладнанні [3].

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

Виробничі випробування можуть бути в ряді випадків спрощені шляхом дослідження зразків, вставлених в натурні деталі. Зокрема випробування вставних зразків, закріплених в зоні найбільшого зносу облицювальних пластин для пресування будівельної силікатної цегли [4], дозволили значно прискорити отримання попередніх результатів про механізм, характер зношування і зносостійкість великої групи матеріалів за відносно короткий час. Подібний підхід практикувався і при дослідженні зносостійкості матеріалів в ряді інших умов зношування. Зокрема, при вирішенні проблеми низького терміну служби прес-вальців для брикетування порошкових матеріалів, зубів ковшів екскаваторів і ін. Однак і при випробуванні вставних зразків не виключений помітний розкид результатів випробувань, оскільки неминучий вплив "тіньового ефекту", наявність зазорів між зразками, негативно впливає і масштабний фактор. Тому основний обсяг випробувань на опірність зношування виконується в лабораторних умовах.

Невелика частина з них є стандартними (як, наприклад, випробування на установці Х4-Б [5-7], а більшість – нестандартні, яких на даний час в багато разів більше, ніж стандартних. Це викликано зрозумілим бажанням дослідників якомога ближче наблизити умови лабораторних випробувань до реальних.

Різноманіття умов зношування і способів випробувань значно ускладнюють вибір найбільш прийнятного методу. Часто дослідники змушені для вирішення своїх завдань використовувати кілька лабораторних установок і проводити тривалі випробування.

Мета роботи. Дослідження стандартних та спеціальних методів випробувань матеріалів на опір абразивному зношуванню та проведення порівняльного аналізу схем та конструкцій приладів та установок, створених для проведення випробувань.

Викладення основного матеріалу. Різноманіття схем випробувань на абразивне зношування, які найбільш часто зустрічаються на практиці, можна умовно розбити на наступні групи зношування при терті [1,8-10]:

а) закріпленим абразивом;

б) напівзакріпленими абразивними частинками;

в) в абразивній масі.

До найпоширеніших схем випробування на абразивне зношування закріпленим абразивом відносяться дослідження зносостійкості на машині (установці) Х4-Б (рис. 1), яка розроблена в Інституті машинознавства Хрущевим М.М., Бабичевим М.А.

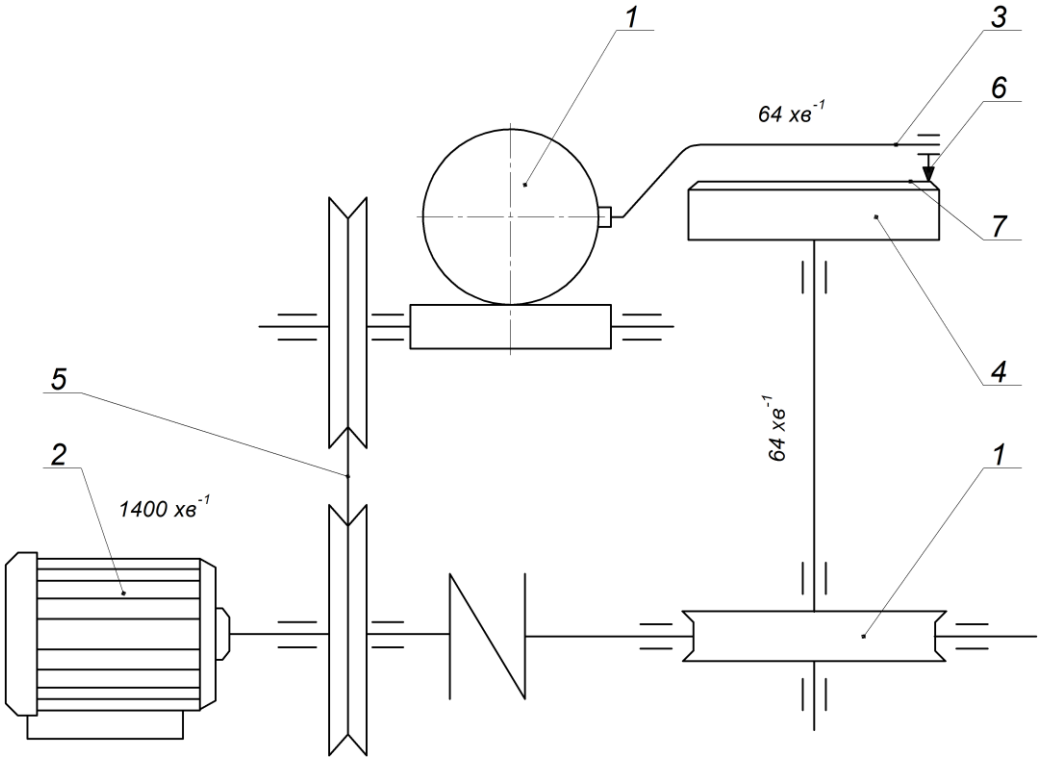


Рис. 1. Кінематична схема машини Х4-Б

1 – черв'ячна передача; 2 – електричний двигун; 3 – шток; 4 – металевий диск; 5 – проміжний вал; 6 – зразок; 7 – абразивна шкурка

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

В даній установці на плоскій стороні металевого диска який обертається, закріплена абразивна шкурка. Циліндричний зразок діаметром 2 мм і довжиною 10-15 мм, закріплений в цанговій державці, знаходиться під навантаженням, треться своїм торцем об шкурку і переміщується при обертанні диска в радіальному напрямку; шлях тертя являє собою спіраль Архімеда. Поверхня шкурки розділена на зони з однаковою довжиною шляху тертя. У цих зонах ведеться випробування досліджуваного і еталонного матеріалів. Знос визначається по зменшенню довжини зразка, або його маси.

Недоліки – це значний вплив масштабного фактору через малі розміри зразка, змінна швидкість ковзання при випробуванні одного зразка через спіралеподібний шлях тертя.

Крім випробувань на Х4-Б відомі ще ряд методів і машин для дослідження абразивного зношування. Більше за інших поширені випробування на машині НК (нерухоме кільце) (рис. 2) та за схемою Брінелля-Хаворта (рис. 3).

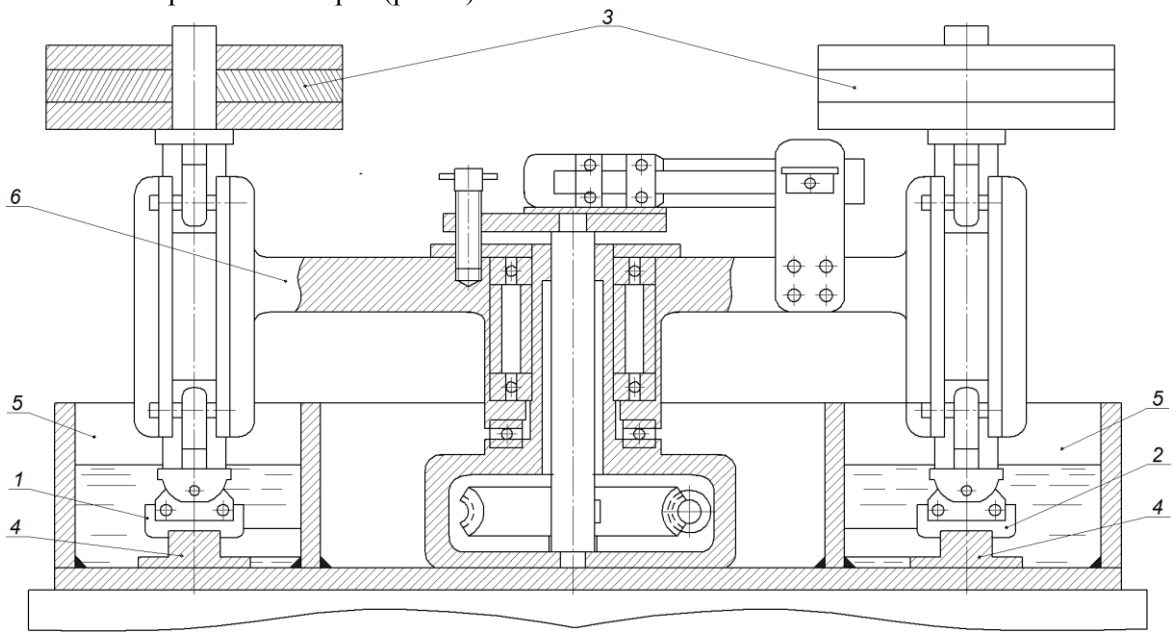


Рис. 2. Схема машини НК

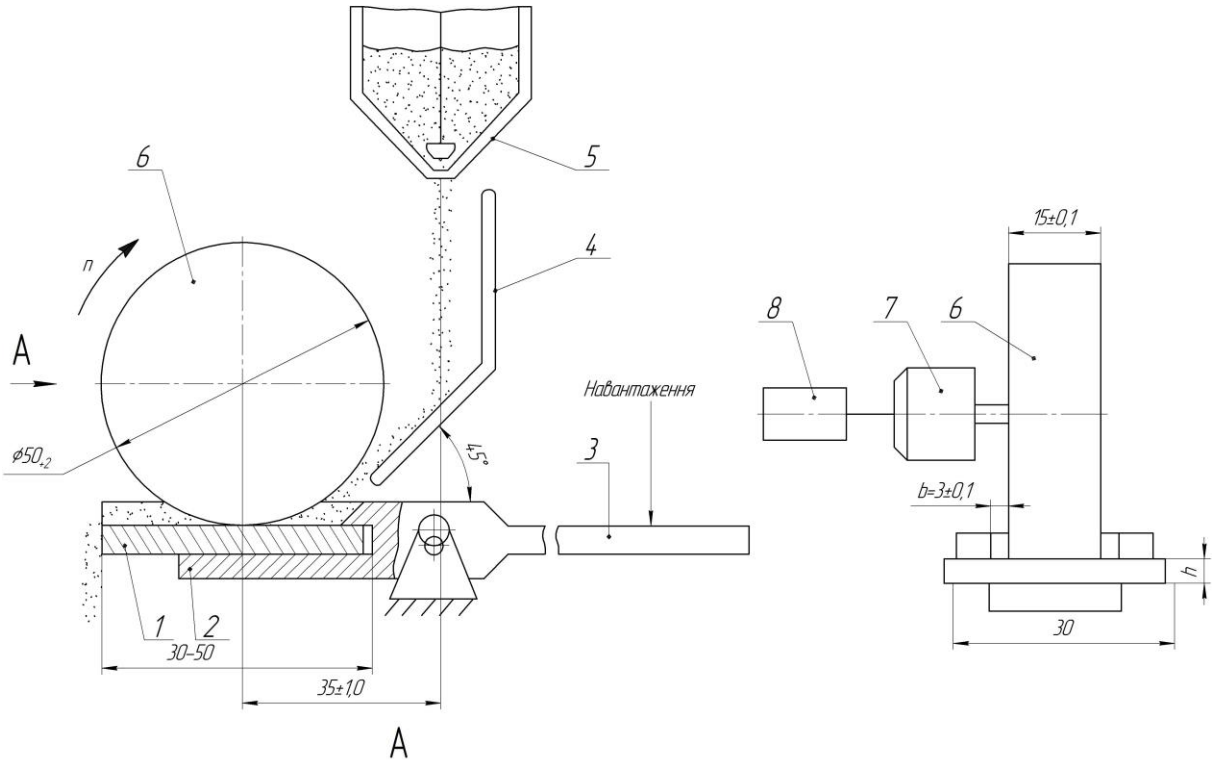


Рис. 3. Схема машини випробуванні за схемою Бринелля-Хаворта

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

Випробувальна машина НК була сконструйована Інститутом машинознавства на базі лабораторних бігунів для розмелювання кускових матеріалів [8, 9].

Одночасно випробовуються два однакових зразки 1 і 2 – перший з випробуваного, другий з еталонного матеріалу. Вони ковзають під навантаженням 3 по плоскій поверхні кільцевого диску з червоної міді 4, на дні кільцевої ємності 5, в якій знаходяться вода і пісок. Пісок попадає на поверхню тертя (за допомогою скребків, що рухаються перед зразками), викликаючи зношування. Державки зразків рухаються на кулькових опорах в вертикальних напрямних, закріплених на кінцях поперечини 6, яка обертається. Знос визначається за втратою маси зразків. Результат випробування виражається у вигляді відносної зносостійкості, рівною відношенню зносу еталона до зносу випробуваного матеріалу.

Випробування за схемою Бринелля-Хаворта (рис. 3) проводять на випробувальній установці [8], яка містить привід 7, що забезпечує обертання навколо горизонтальної осі гумового ролика 6, тримач зразків 2, важіль 3, що притискає зразок 1 до ролика, пристрій 5, який дозує подачу абразивних частинок в зону тертя по направляючому лотку 4, пристрій 8 для контролю сумарної кількості обертів ролика в процесі випробувань. Знос визначається за втратою маси зразка при певній кількості поданого абразиву. В таких же умовах випробовується еталонний матеріал. Відносна зносостійкість визначається, як відношення зносу еталонного і випробуваного матеріалів.

Зазвичай при виборі схеми і умов випробування виходять з необхідності відтворення експлуатаційних умов зношування натурних деталей. Зручною ознакою для класифікації методів випробування на зношування в абразивній масі є інтенсивність зношування, яка залежить від навантажувального режиму і співвідношення властивостей випробуваного металу і абразиву. Умовно випробування за величиною питомого навантаження на поверхню тертя можна розділити на три групи: випробування при малих, середніх і великих питомих навантаженнях [9].

При дуже малих питомих навантаженнях зношування може проходити з надзвичайно малою інтенсивністю, з тенденцією переходу до окислювального характеру зношування.

При дуже великих питомих навантаженнях може інтенсивно руйнуватися сам абразив. Найменша інтенсивність навантаження зношування металевого зразка спостерігається при його ковзанні по поверхні ущільненої сипучої абразивної маси 5 під малим навантаженням. Серед машин для випробування на зношування цього типу найбільш відома машина типу «чаша, яка обертається» (рис. 4) [9]. У машині є два конічних катки 1, які ущільнюють і вирівнюють шар абразивної маси. Чаша 2 обертається навколо вертикальної осі з частотою 60 хв$^{-1}$.

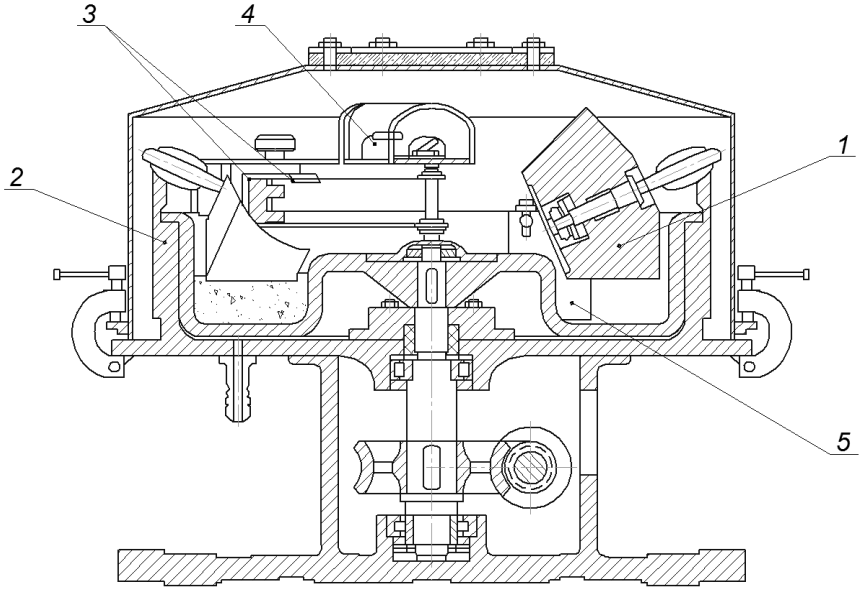


Рис. 4. Схема машини типу «чаша, яка обертається»

Дві державки зразка 3 утримують його на відстані 150 мм від осі обертання чаші. Число обертів фіксується лічильником 4. Для отримання свіжої абразивної поверхні служать розпушувачі. Товщина шару абразивної маси дорівнює 40 мм.

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

При випробуванні на шнековій машині, розробленій В. Н. Ткачевим (рис. 5) [9, 10], різець з випробуваного матеріалу ріже безперервно ущільнену абразивну масу, що підводиться до нього. Цим випробуванням в лабораторних умовах відтворюється зношування леза різця, аналогічне зношування лез ґрунтообробних машин. Конструкція машини передбачає можливість змінювати щільність абразивної маси, яка подається до різця, в широких межах. Абразивна маса певного складу і вологості, засипана в бункер, подається обертовим вертикальним шнеком в нижню частину машини, де за допомогою іншого обертового вертикального шнека ущільнюється до заданого ступеня щільності і потім витискається через кільцеву горловину. Зразок у вигляді різця спеціальної форми, закріплений в диску обертається навколо осі, яка співпадає з віссю кільцевої горловини. При цьому він ріже витиснену з горловини абразивну масу і поступово зношується. Показником зносу служить зміна довжини зразка. Ця схема, як і попередня не передбачає кількісного регулювання тиску абразивної маси на поверхню.

В деяких випадках абразивна маса працює в сполученні з вологою агресивною складовою. Тому в Запорізькому національному технічному університеті створена лабораторна установка (рис. 5) для визначення зносостійкості матеріалів в умовах, які відтворюють реальні процеси абразивно-корозійного зношування шнеків стрічкових пресів для виготовлення вогнетривів, або будівельних виробів методом пластичного пресування. В даному випадку крім дії абразиву, значний вплив на опір робочих поверхонь деталей зношуванню може надавати корозійний фактор, оскільки абразивна маса при пластичному пресуванні значно зволожена. Проектування установки проводилося з урахуванням наступних вимог:

- максимальне наближення кінематики процесу зношування шнеків до виробничих умов;
- можливість проведення дослідів в більш широкому діапазоні режимів, в порівнянні з виробничими умовами;
- відтворюваність результатів дослідів;
- простота і низька трудомісткість дослідів при достатній надійності їх результатів із застосуванням простих зразків та невеликої кількості абразивної маси.

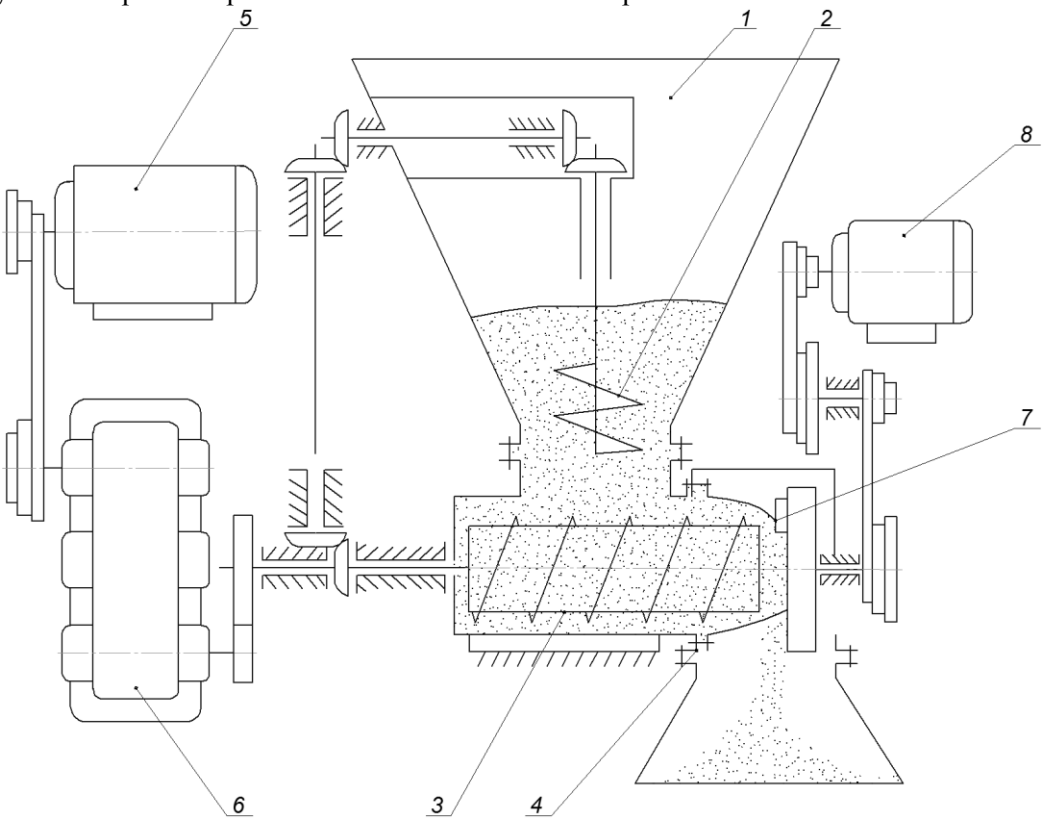
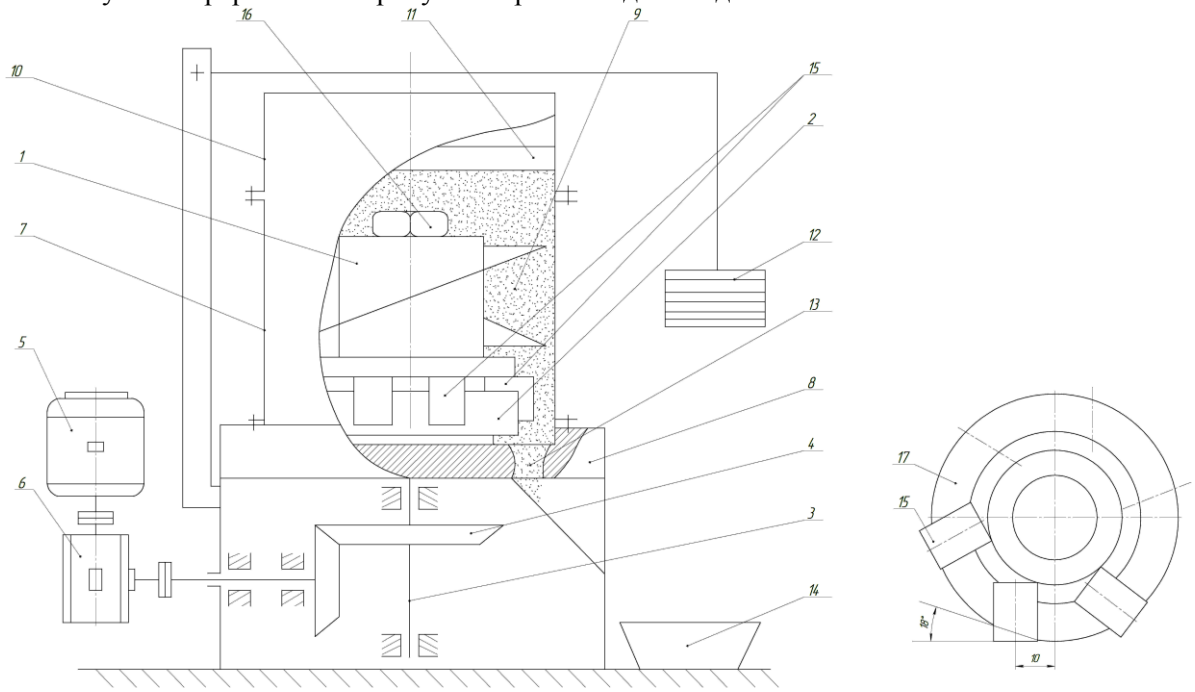


Рис. 5. Схема шнекової машини для випробувань на абразивне зношування
1 – бункер; 2 – вертикальний шнек; 3 – горизонтальний шнек; 4 – пружинне кріплення горловини; 5 – електродвигун, що приводить в рух шнеки; 6 – редуктор; 7 – зразок, закріплений в обертовому диску; 8 – електродвигун, що приводить в рух диск із зразками

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

Установка (рис. 6 а) складається з двозаходового шнеку 1, обойми 2, жорстко закріплених на вертикальному валу 3 конічного редуктора 4, який приводиться до обертання від електродвигуна 5 потужністю 2 кВт, через черв'ячний редуктор 6. Шнек з обоймою обертаються в камері 7, яка вставляється у виточку кришки (бункера) 8 і закріплюється болтами. Зразки 15 розміром 10 мм × 10 мм × 15 мм в кількості 12 штук затискаються гайкою 16 між нижнім і верхнім дисками обойми 17 за схемою, наведеній на рис. 6 б. Абразивна маса 9 вологістю 18 % при знятому поршні 11 завантажується в бункер 10, і потім подається до шнеку вставленим на місце поршнем під дією вантажу 12, який може ступінчасто змінюватись. Далі маса ущільняється і витискається через отвір 13 зразками, які обертаються, та по похилому жолобу надходить до ємності 14. Таким чином, зразки постійно зношуються свіжою абразивною масою, як і у виробничих умовах. Одинарне завантаження маси в кількості 5 кг забезпечує безперервність випробувань протягом двох годин.



а б

Рис. 6. Схема лабораторної установки для випробування зразків відповідно до умов експлуатації шнеків стрічкових пресів (а) та схема розміщення зразків в обоймі (б)

Одним із загальних недоліків наведених вище схем випробування, є незначні розміри зразків. Це збільшує негативний вплив масштабного фактора на рівень відповідності результатів лабораторних випробувань рівню зносостійкості натурних деталей. Тому в ЗНТУ був створений стенд для моделювання процесів зношування, перш за все, деталей оснастки для пресування вогнетривких та будівельних виробів (рис. 7).

На цьому стенді випробовуються зразки розмірами 90 мм × 30 мм × 10 мм, тобто за товщиною вони практично такі ж, як і пластини прес-форм для виготовлення силікатної цегли. Принцип роботи лабораторного стенду полягає в наступному. Зношування зразка 2, що здійснює зворотно-поступальний рух, виконується стовпом стиснутої пуансоном 6 абразивної маси 5, що знаходиться в нерухомій обоймі 8, яка армована твердим сплавом. Зусилля на пуансон від вантажу 10 передається через важільну систему 9. З кожним ходом зразка шар абразиву, що безпосередньо контактує з поверхнею тертя, автоматично видаляється із обойми через проміжок (зазор) між її торцем і зразком.

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

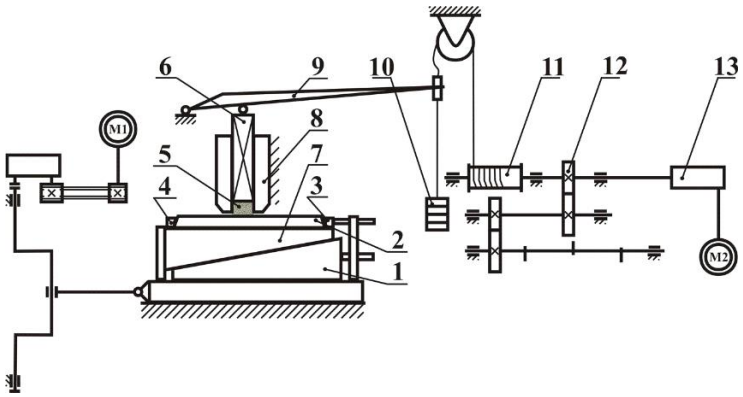


Рис. 7. Схема лабораторного стенду
1 – нижній клин; 2 – зразок; 3 – рухомий упор; 4 – нерухомий упор; 5 – абразивна маса; 6 – пуансон; 7 – верхній клин; 8 – обойма; 9 – важільна система; 10 – вантаж; 11 – барабан; 12 – блок шестерень; 13 – редуктор

В загальному вигляді основними критеріями відтворюваності процесів, які протікають в поверхневому шарі натурних деталей і на дослідних зразках були:
- характер мікрорельєфу зношеної поверхні (наявність, або відсутність рисок, чи подряпин);
- повнота фазових перетворень в поверхневому шарі (частіш за все це метастабільного аустеніту в мартенсит деформації);
- рівень самозміцнення поверхні тертя (мікротвердість до і після зношування);
- порівнянність рядів зносостійкості зразків і натурних деталей із різних матеріалів і однакових структурних станах, або одного і того матеріалу з різними структурами).

Основними параметрами режиму випробувань, які варіювалися з метою знаходження необхідного рівня відтворюваності процесів при зношуванні поверхні тих чи інших деталей та зразків є:
- тиск;
- тип і фракційний склад абразиву;
- початкова висота стовпа стиснутої абразивної маси;
- число ходів зразка на одну засипку абразивної маси і ступінь оновленості абразивної маси (регулюється величиною зазору між обоймою і зразком);
- температура поверхні тертя.

Усереднений тиск стовпа стисненої абразивної маси і відповідно середні напруження регулюються шляхом зміни навантаження вагами 10 (див. рис. 7). В той же час напруження, які виникають в поверхні зразка в одиничному контакті з абразивним зерном визначити складно. Проте, судячи з характеру зношуваної поверхні робочої кромки (наявність рисок, подряпин), можна судити, чи прикладеного тиску достатньо, або не вистачає для створення напруження в місці контакту абразивного зерна з поверхнею, які перевищують межу плинності, або міцності металу, який випробовується.

Дуже важливою складовою умов випробувань являється тип абразиву. Його зерна характеризуються мікротвердістю, формою і розміром зерен.

У загальному вигляді відомо, що одним з основних показників системи «матеріал–умови зношування», що впливає на зносостійкість, є відношення мікротвердості абразиву $H_а$ до твердості матеріалу $H_м$, точніше $H_{птм}$ – мікротвердості поверхні тертя, придбаною матеріалом зразка або деталі в процесі зношування. Різке підвищення зносостійкості може бути досягнуто, якщо твердість поверхні тертя наближається до твердості абразивних зерен.

В роботі [11] для прогнозування механізму зношування поверхні матеріалу зернами абразиву (мікрорізання або полідеформаціонний процес), при достатньо високому значенні параметра $H_а/H_м$, було запропоновано також використовувати коефіцієнт форми зерен:

$$K_ф = \frac{M(n_i)M(D_i - d_i)}{M(R_i)}, \quad (1)$$

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

де $M(n_i)$, $M(R_i)$, $M(D_i\text{-}d_i)$, – математичне сподівання, – відповідно: числа вершин, їх радіусів і різниць діаметрів кіл, описаного навколо контуру і вписаного в контур зерна.

Аналіз геометрії зерен шамоту (рис. 8), при розмірах порівнянних з розмірами зерен піску показав, що коефіцієнт їх форми знаходиться в межах 45-70 в залежності від вихідної сировини (родовища), яка застосовується для виготовлення цього абразиву. У той же час, зерна піску більш обкатані (див. рис. 8, а), коефіцієнт їх форми незначно перевищує значення 11, а цей же коефіцієнт для карборунду досягає 70-80. Але все ж таки головним чинником впливу на інтенсивність зношування являється мікротвердість зерен. Наприклад, при збільшенні мікротвердості від 13 ГПа (шамот) до 32 ГПа (карборунд) інтенсивність зношування сталі 140Х12 в переважно аустенітному стані збільшується більше чим в 100 разів.

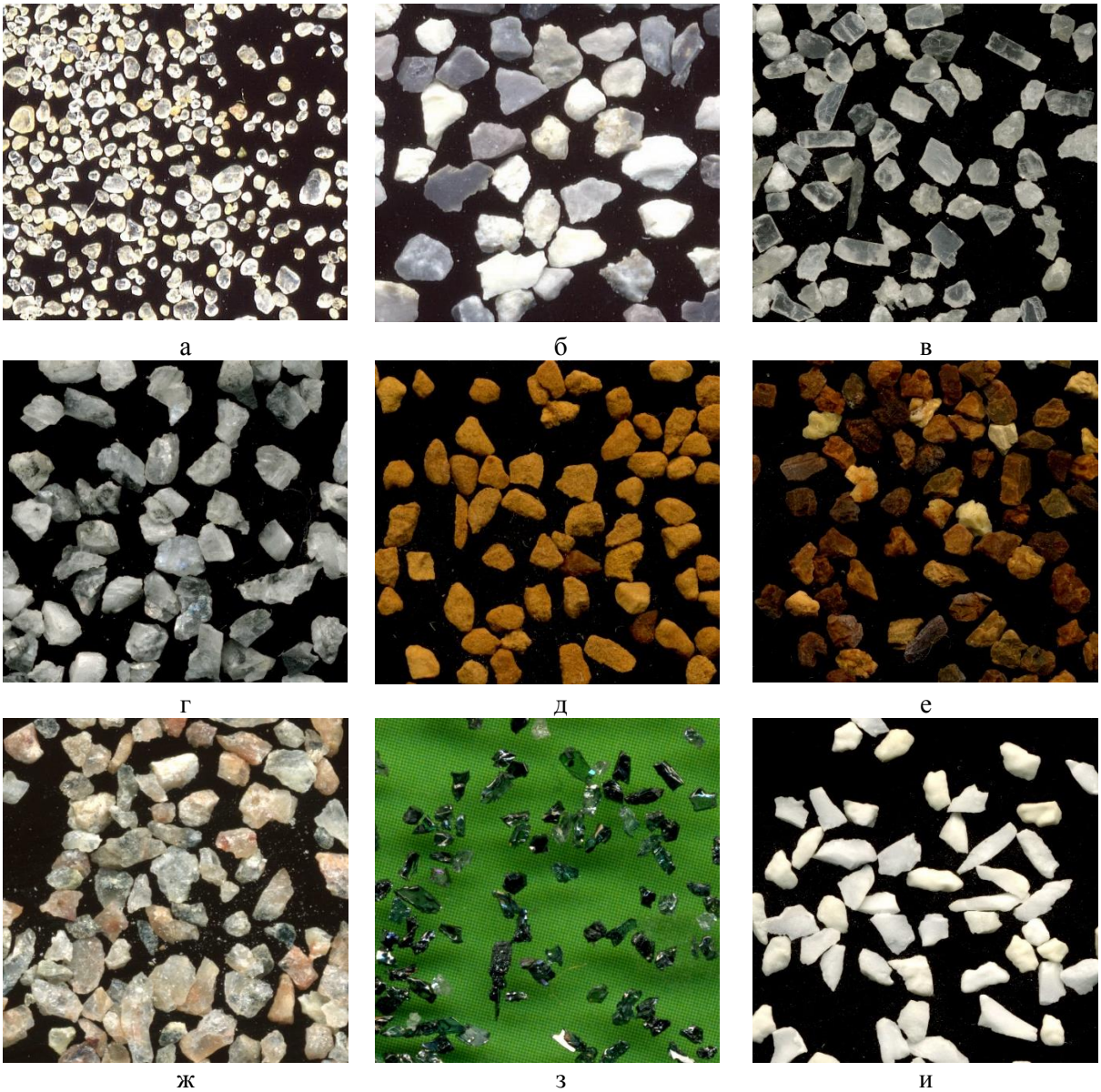


Рис. 8. Зерна абразивних мас
а – пісок кварцевий; б – шамот (Запорізький); в – периклаз (Японія); г – периклаз; д – магнезит; е – магнезит відпалений; ж – граніт; з – карборунд; и – клінкер

Було встановлено, що оптимальна початкова висота стовпа абразивної маси над зразком при зношуванні, наприклад, шамотом повинна складати 17 мм, а розміри зерен знаходитись в межах 0,6-1,0 мм. При цьому співвідношенні розмірів зерен і висоти засипки абразиву зазор між обоймою і зразком повинен бути таким, який дозволяє здійснювати десять ходів зразка на одну засипку при досить повній відновлюваності абразивної маси. Середня швидкість переміщення зразка – 24,8 мм/с. При таких параметрах режиму випробувань температура

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

поверхні зразка не перевищує 60 °С. Для інших видів абразивів ці показники можуть змінюватись, але як правило не в значній мірі.

Кількість ходів за один цикл випробувань (між зважуваннями) вибирається таким чином, щоб втрата маси складала не менше 0,008 г, що забезпечує при зважуванні похибку не більше 5 %. Наприклад, при зношуванні шамотом, частіш за все, для цього достатньо 100 ходів. Для інших абразивів цей показник, в залежності від інтенсивності зношування, може змінюватись в той чи інший бік (встановлюється в ході експерименту).

Дослідження проводяться в наступній послідовності:

1. Зразок без зважування закріплюється на стенді і виконується 200-300 ходів (20-30 заповнень обойми).

2. Далі проводиться перше зважування, перед яким зразки розмагнічуються, щоб виключити вплив взаємодії магнітного поля зразка і деталей вагів.

3. Зразок закріплюється на верхньому клині повзуна стенда і виконується необхідна кількість ходів (перший цикл).

4. Здійснюється зважування зразка після першого циклу зношування.

Всього здійснюється 3-6 циклів випробувань кожного зразка (залежно від щільності результатів). За показник інтенсивності зношування досліджуваного матеріалу береться середнє значення втрати маси зразка за усі цикли випробувань.

Як приклад використання лабораторного стенду можна навести результати випробувань дослідних матеріалів в різних структурних станах при зношуванні шамотом на режимах, наведених вище (рис. 9). Встановлено, що для кривих зношування всіх матеріалів характерні дві ділянки – початкового (до двохсот ходів) процесу і сталого процесу. Наявність першої ділянки і обумовлює необхідність виконання першого пункту послідовності випробування наведеній вище. Серед цих матеріалів найбільшим опором зношуванню характеризується сталь 120Х3.

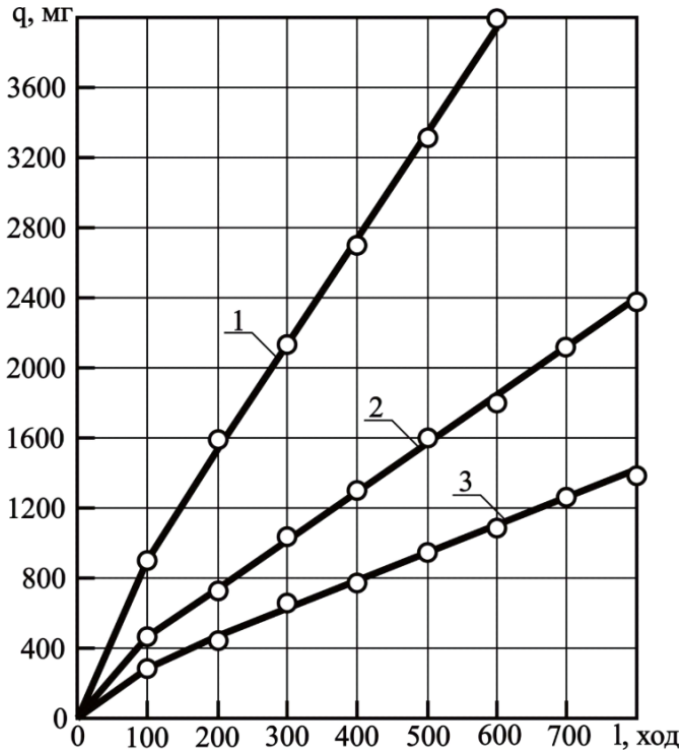


Рис. 9. Абсолютний знос (q) досліджуваних зразків при зношувані шамотом в залежності від кількості ходів зразка (l)

1 – сталь 50Х (мартенсит); 2 – сталь 90Х3 (мартенсит та метастабільний аустеніт); 3 – сталь 120Х3 (переважно метастабільний аустеніт)

В даному випадку це обумовлено перш за все двома факторами – найбільш високим вмістом вуглецю в сталі 120Х3 і наявності в структурі великої кількості метастабільного залишкового аустеніту.

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

В цілому серія випробувань на даному стенді дозволила вибрати, або розробити матеріали для виготовлення деталей, які працюють в різних умовах безударного абразивного зношування (деталі оснастки для виготовлення вогнетривких та будівельних матеріалів, абразивного інструменту та ін.), вибрати структурний стан і способи управління структурою та розробити технологічні процеси виготовлення та зміцнення деталей, що дозволило підвищити їх строк служби від двох до десяти разів.

Висновки

1. Однією з найважливіших складових вирішення проблеми зношування деталей машин є випробування на зносостійкість. Різноманіття умов зношування і способів випробувань значно ускладнюють вибір найбільш прийнятного методу дослідження.

2. Відомо багато способів і схем випробувань, як в лабораторних, так і в виробничих умовах. Всі вони мають переваги і недоліки. Універсальних методів не існує.

3. Промислові випробування часто характеризуються значним розкидом результатів, похибками. Вони як правило трудомісткі.

4. Для лабораторних приладів характерні незначні розміри зразків, наприклад для Х4-Б, тому масштабний фактор негативно впливає на відтворюваність результатів лабораторних випробувань в виробничих умовах, особливо коли досліджуються матеріали з гетерогенною структурою, наприклад заевтектичний наплавлений метал.

5. Зразок для випробувань на стенді, розробленому в Запорізькому національному технічному університеті за площею робочої поверхні в п’ятдесят раз більше, чим площа поверхні зразка для Х4-Б, тому рівень відповідності результатів лабораторних випробувань промисловим значно вищий. Крім того позитивно впливає на результат можливість створювати на стенді умови зношування зразка відповідно умовам роботи поверхонь деталей в широкому діапазоні значень параметрів, які впливають на інтенсивність зношування.

6. Випробування зразків хромистих сталей з різним вмістом вуглецю і різних за структурою показали високу щільність результатів.

Інформаційні джерела

1. Зносостійкість сплавів, відновлення та зміцнення деталей машин. Навчальний посібник. Під ред.. Попова В.С. – Запоріжжя: ВК ВАТ «Мотор Січ», 2006. – 420 с.

2. Попов В.С., Билоник И. М., Бережный С.П., Капустян А.Е. Исследование износостойкости ножей камнекольных станков // Нові матеріали і технології в металлургії і машинобудуванні. – 2002. - №2. – С. 45-48.

3. Долговечность оборудования огнеупорного производства / Попов В.С., Брыков Н.Н., Дмитриченко Н.С., Приступа П.Г. – М.: Металлургия, 1978. – 232 с.

4. Андрущенко М. И., Куликовский Р. А., Брыков М. Н., Савонов Ю. Н. Анализ современного состояния проблемы срока службы деталей оснастки для изготовления силикатного кирпича // Problems of Tribology. – 2010. – № 2. – С. 37-44.

5. ГОСТ 17367-71 Металлы. Метод испытаний на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы.

6. ГОСТ 30480-97 Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования.

7. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.

8. Шведков Е. Л., Ровенский Д. Я., Зозуля В. Д., Браун Э. Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. – К.: Наук. думка, 1990. – 188 с.

9. Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы. – М.: Металлургия, 1981. – 648 с.

10. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. – 2-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.

11. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

Андрущенко М.И., к.т.н., Капустян А.Е. старш. препод., Осипов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акрытова Т.А., старш. лаб.
Запорожский национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СТАНДАРТНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ БЕЗУДАРНОМУ АБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ

Проведен анализ и исследования стандартных и специальных методов испытаний материалов на сопротивляемость абразивному изнашиванию. Показаны преимущества и недостатки исследований материалов на износостойкость деталей непосредственно в производственных условиях на действующем оборудовании по сравнению с лабораторными методами. Показана возможность упрощения и ускорения исследований в промышленных условиях путем использования образцов, вставленных в натурные детали. Выполнен сравнительный анализ схем и конструкций приборов и установок созданных для проведения лабораторных испытаний. Приведенные схемы стендов созданных в Запорожском национальном техническом университете для испытаний материалов на износостойкость полузакреплёнными абразивом при задействовании коррозионного фактора, или без его влияния и возможности изменения параметров процесса испытаний (давление абразива, утверждает абразивных зерен, температура) широких пределах. Показаны принципы проектирования оборудования и представлена методика исследований. На примере трех сталей различного химического состава (50Х, 90Х3, 120Х3) и различной структуры (мартенсит, мартенсит и метастабильный аустенит, преимущественно метастабильный аустенит) показаны результаты испытаний на интенсивность изнашивания.

Ключевые слова: *абразивный износ, лабораторные испытания, установка для испытаний, методика испытаний*

M. Andrushchenko, Ph.D., O. Kapustian, M. Osipov, Ph.D., R. Kulikovsky, Ph.D., T. Akrytova
Zaporozhye National Technical University

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF METHODS OF STANDARD AND SPECIAL TESTS OF MATERIALS ON RESISTANCE TO ABANDONIZED ABRASIVE WRAP

The analysis and research of standard and special methods of materials testing for resistance to abrasive wear are carried out. The advantages and disadvantages of researching materials on wear resistance of parts directly in production conditions on operating equipment as compared to laboratory methods are shown. The possibility of simplifying and accelerating research in industrial conditions is shown by using samples inserted in full-scale details. A comparative analysis of the designs and designs of instruments and installations designed for laboratory testing has been performed. The resulted schemes of the stands created in Zaporozhye National Technical University for testing materials for wear resistance with semi-fixed abrasives with or without the influence of the corrosive factor and the possibility of changing the parameters of the test process (abrasive pressure, asserts abrasive grains, temperature) are wide. The principles of designing the equipment are shown and the research methodology is presented. On the example of three steels of different chemical composition (50X, 90X3, 120X3) and different structures (martensite, martensite and metastable austenite, mainly metastable austenite), the results of tests on the wear rate are shown.

Keywords: *abrasive wear, laboratory tests, testing facility, test procedure*

Стаття надійшла до редакції 14.05.2018.

© Андрущенко М.І., к.т.н., Капустян О.Є. старш. викл., Осіпов М.Ю., к.т.н., Куликовський Р.А., к.т.н., Акритова Т.О., старш. лаб.

УДК 621.922
Божко Т.Є., к.т.н., Гальчук Т.Н., к.т.н.
Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ УМОВ РІЗАННЯ НА ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ 1 РОДУ ПРИ ТОКАРНІЙ ОБРОБЦІ ПОРИСТОГО МАТЕРІАЛУ

Залишкові напруження є важливим фактором впливу на якість поверхні, втомну міцність і зносостійкість деталей. Напруження першого роду, які виникають в результаті механічної обробки, мають найбільший вплив на якість поверхонь, технологічні і експлуатаційні властивості деталі. Механічна обробка пористого матеріалу відрізняється від обробки компактного, внаслідок неоднорідної, пористої структури металу. В даній роботі розглянуто вплив умов різання на залишкові напруження 1 роду при токарній обробці пористого матеріалу. Досліджено, що глибина проникнення напружень І роду для матеріалів з різною пористістю зменшується в міру зростання швидкості різання, що пов'язано зі скороченням зони деформації, що веде до зменшення глибини проникнення залишкових макронапружень. При збільшенні подачі зусилля і температура різання зростають, що викликає зростання залишкових макронапруження, що розтягують.

Ключові слова: токарна обробка, макронапруження**,** пористий матеріал**.**

Постановка проблеми. Надійність експлуатації деталей машин визначається станом поверхневого шару і залежить від характеру їх контактування одна з одною. Аналіз причин і характер руйнування деталей машин свідчить, що здебільшого руйнування починається в поверхневому шарі, а опір руйнуванню визначається сукупністю характеристик якості поверхневого шару деталей машин: мікрогеометрією, зміцненням та залишковими напруженнями.

Залишкові напруження є важливим фактором впливу на якість поверхні, втомну міцність і зносостійкість деталей. Напруження першого роду, які виникають в результаті механічної обробки, мають найбільший вплив на якість поверхонь, технологічні і експлуатаційні властивості. Виникнення залишкових напружень першого роду зумовлено неоднорідною пластичною деформацією металу при його механічному обробленні і нерівномірним нагрівом поверхневих шарів. Механічна обробка пористого матеріалу відрізняється від обробки компактного, внаслідок неоднорідної, пористої структури металу.

Тому, дослідження впливу умов різання на залишкові макронапруження при механічній обробці пористого матеріалу є актуальною задачею.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є вплив умов різання на залишкові напруження 1 роду при токарній обробці пористого матеріалу.

Методика дослідження. Експерименти проводились на зразках із порошків заліза марки ПЖР-3. Для дослідів використовувались зразки пористістю 10%, 20% та 30%, які виготовлялись методом гідростатичного формування та спікалися при температурі 1050 C^o в захисному середовищі. залишкові напруження І-го роду визначають за методикою [1]. Вимірювання деформації вироблялося на універсальному вимірювальному мікроскопі ДИП-1 з точністю відліку 0,0005 мм. Товщина стінки вимірювалася мікрометром з індикатором зі сферичною вимірювальною поверхнею з точністю 0,005 мм.

Пошарове видалення металу проводилося за допомогою електротравлення в електроліті наступного складу: 350 $см^3$ H_3PO_4, 150 $см^3$ H_2SO_4 і 60 г хромового ангідриду. Видалення металу проводилося при напрузі 12В і силі струму близько 6А.

З втулок (Ø52× Ø25×25 мм) виточувалися кільцеві зразки розмірами Ø42×Ø32×10мм, потім вони відпалювалися при температурі 700 °С протягом 2 год в атмосфері водню з метою зняття внутрішніх напружень.

Як різальний інструмент для токарної обробки, використовували різці, які оснащені твердосплавною різальною частиною: різець прохідний з пластиною з твердого сплаву Т15К6 з параметрами різальної частини: головний кут в плані ϕ = 45°; головний задній кут α = 8°; передній кут γ = 15°; допоміжний кут в плані ϕ_1 = 10°; кут нахилу різальної кромки λ = 0°. Геометрія різця у всіх серіях дослідів була однакова, за винятком дослідження впливу переднього кута різця на розподіл напружень 1 роду, коли передній кут різця змінювався по ряду +15; 0; -15 °.

Основні результати дослідження. Результати дослідів з дослідження впливу швидкості різання на макронапруження для матеріалів з пористістю 10, 20 і 30% показані на рис. 1.

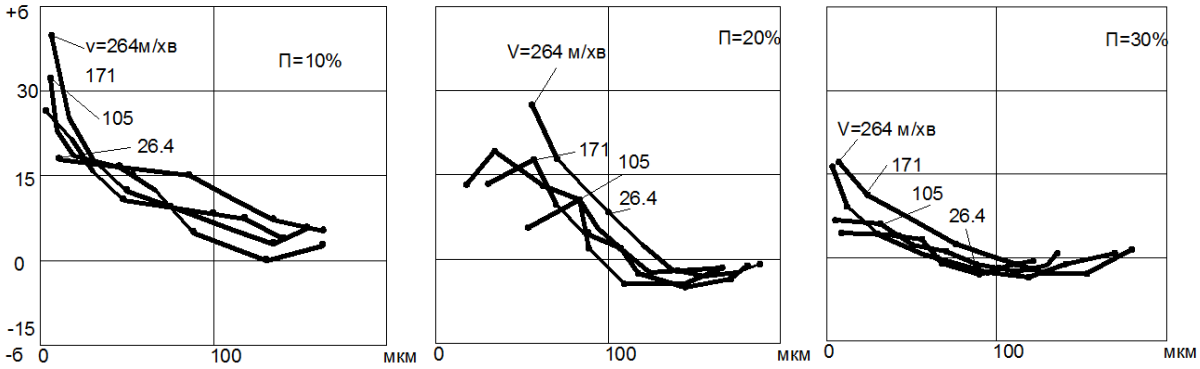


Рис. 1. Вплив швидкості на зміну залишкових напружень I роду по глибині при обробці залізних зразків з різною пористістю

З рисунку 1 видно, що обробка пористих матеріалів різанням при даних режимах супроводжується появою в поверхневих шарах матеріалу досить високих розтягуючих залишкових напружень I роду (до 45 МПа). Далі видно, що напруження I роду плавно знижуються, переходячи з розтягуючих в стискаючі на деякій глибині залягання. Величина залишкових напружень і глибина їх проникнення залежать від швидкості різання і пористості досліджуваного матеріалу.

Зі збільшенням швидкості різання (рис. 2) величина залишкових напружень, які вимірювались на глибині 20 мкм, інтенсивно зростають для всіх зразків. Чим вище пористість, тим нижче величина залишкових напружень 1 роду. Так, якщо для зразків з пористістю 10% при швидкості різання 26,4 м/хв величина залишкових напружень становить 17,5 МПа, для зразків з пористістю 30% при тій же швидкості - 25 МПа, то при швидкості 264 м/хв величина напружень відповідно досягає 32,0 і 12,5 МПа.

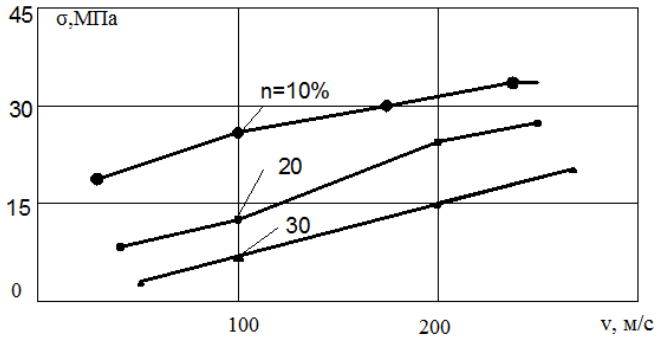


Рис.2. Вплив швидкості різання на величину залишкових напружень в поверхневому шарі (на глибині 20 мкм) в матеріалі із різною пористістю

Глибина проникнення залишкових напружень I роду змінюється зі зміною швидкості різання (рис. 3). Глибина залягання макронапружень зменшується в 2 рази при збільшенні швидкості різання від 26,4 до 264 м/хв для всіх трьох досліджених матеріалів.

Відмічено, що глибина проникнення залишкових напружень по перерізу зразків з різною пористістю, обточених при одній швидкості, дуже близькі один до одного. З цього випливає, що пористість майже не впливає на глибину проникнення макронапружень.

В процесі обробки пористих матеріалів зі змінною подачею так само, як і зі змінною швидкістю, в поверхневих шарах матеріалу проводяться досить високі розтягуючі залишкові напруження.

© Божко Т.Є., к.т.н., Гальчук Т.Н., к.т.н.

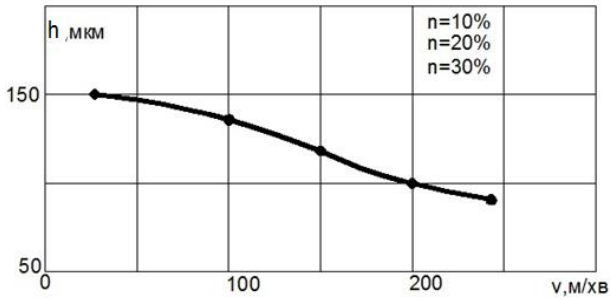


Рис.3.Залежність глибини проникнення залишкових напружень від швидкості різання

На рис. 4 показані криві зміни величини залишкових напружень I роду по глибині для залізних зразків з різною пористістю (10, 20 і 30%), звідки видно, що в поверхневому шарі зразків, як і при зміні швидкості різання, виникають напруження розтягу I роду, що переходять потім в напруження стиску.

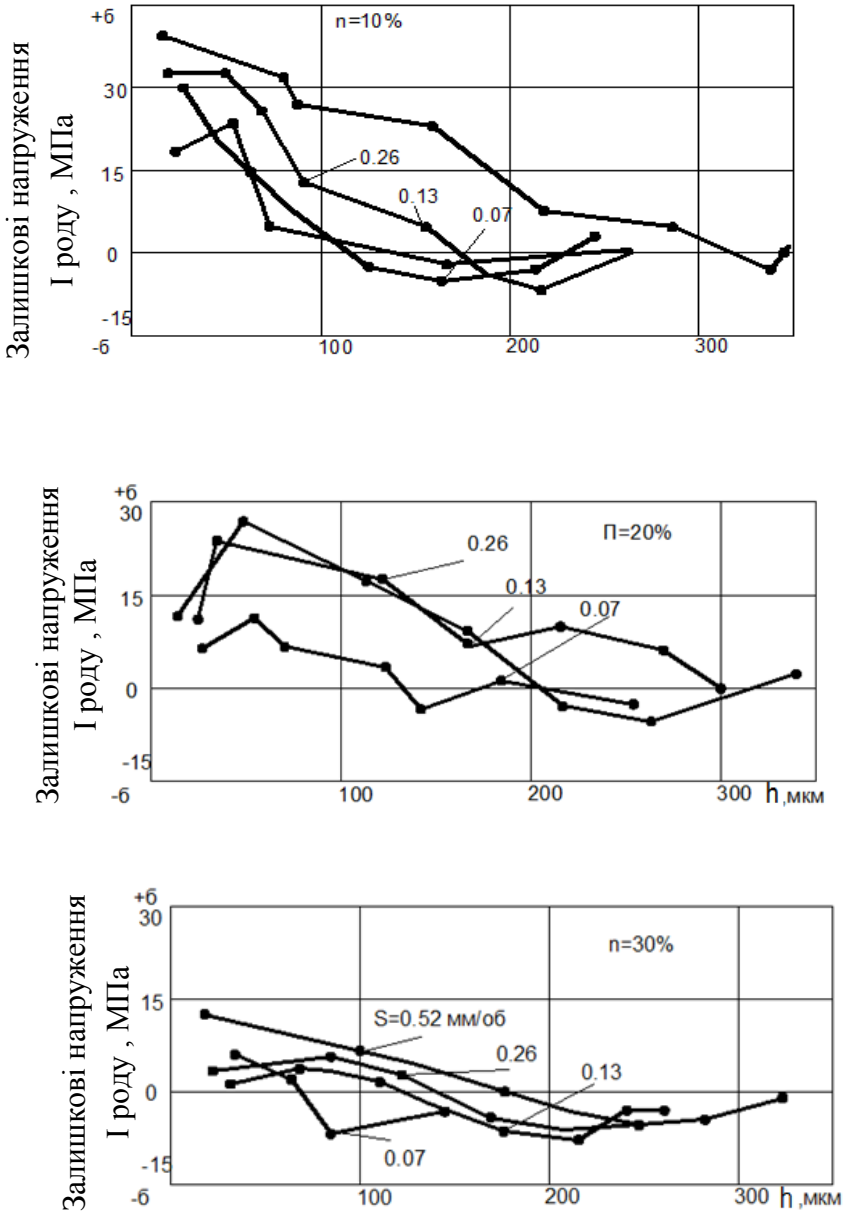


Рис.4. Вплив подачі на зміні залишкових напружень I роду по глибині в залізних зразків із різною пористістю

Відзначено, що на поверхні макронапруження можуть бути нижче, ніж в більш глибоких шарах. Пояснюється це тим що, більш істотний вплив подачі в порівнянні зі швидкістю різання на чистоту обробленої поверхні.

Зі збільшенням подачі величина залишкових напружень I роду, визначених на глибині 20 мкм, монотонно зростає для всіх, причому (рис. 5), чим вище пористість, тим менше величина макронапружень, що виникають в зразках при даній подачі. Так, величина залишкових напружень I роду для зразків з пористістю 10% становить при S = 0,07 мм/об - 27 МПа, при S= 0,52 мм/об - 36,0 МПа, а для зразків з пористістю 30% при першій подачі - 4 МПа, при другій - 12,5 МПа.

Значення залишкових напружень I роду для зразків з пористістю 20% займають проміжне положення між значеннями макронапружень, що виникають в поверхневому шарі матеріалу з пористістю 10 і 30%.

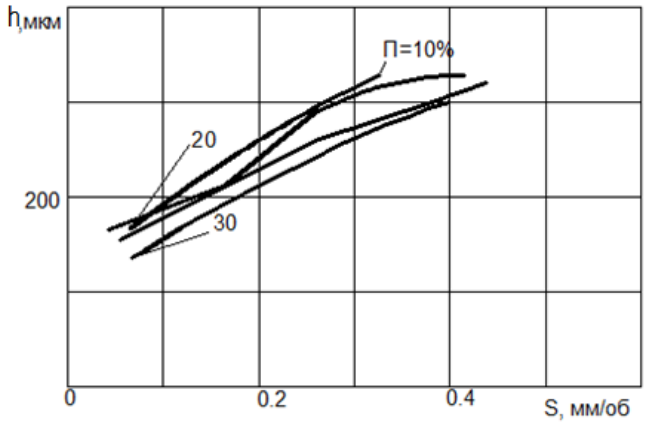


Рис.5. Вплив подачі на глибину проникнення напружень при обробці залізних зразків із різною пористістю

При зміні подачі змінюється і глибина проникнення внутрішніх напружень I роду, як це видно з рис. 5.

При збільшенні подачі від 0,07 до 0,52 мм/об глибина проникнення залишкових напружень I роду для низької пористості (10%) зростає від 125 до 350 мкм. а для високої (30%) - від 200 до 350 мкм. Глибина залягання напруження, що розтягують I роду збільшується зі зростанням подачі.

Досліди показують, що зміна попереднього кута різця при інших рівних умовах виникають незначні зміни напруження I роду (рис. 6).

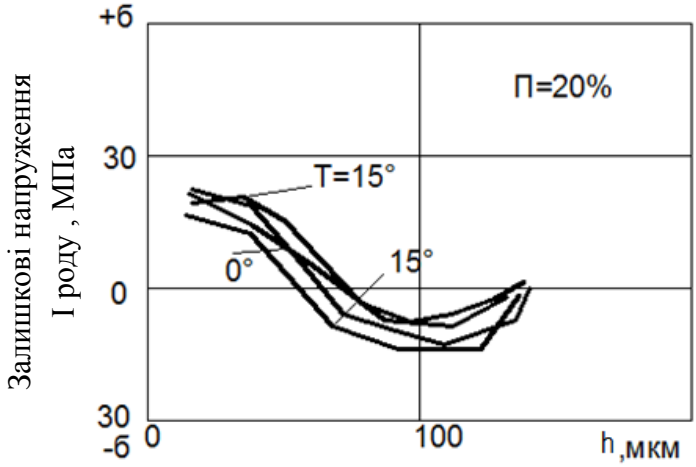


Рис.6. Вплив переднього кута різця на зміни залишкових напружень I роду по глибині

Незначно впливає величина переднього кута і на глибину проникнення залишкових напружень, яка становить для зазначеної пористості 150 - 180мкм. Для порівняння (при одних і тих же умовах різання) були визначені залишкові напруження по глибині в зразках із сталі 30.

Результати цих дослідів показані на рис. 7, з якого видно, що в поверхневому шарі як пористих залізних зразків, так і в зразках зі сталі 30 виникають напруження розтягу I роду, що переходять на деякій глибині в напруженнях стиску.

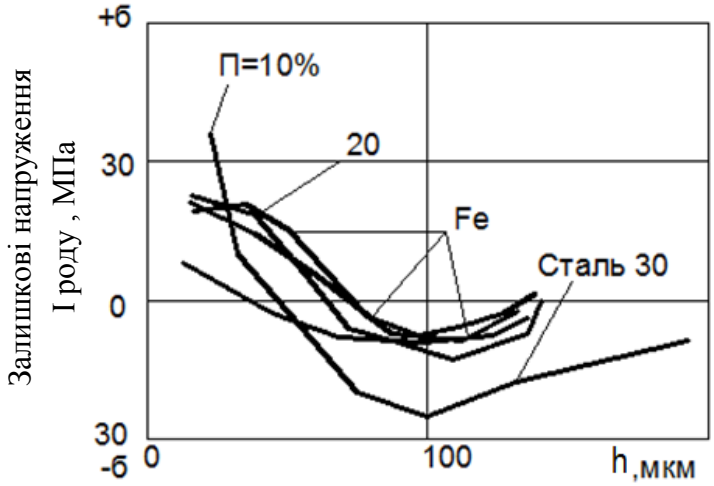


Рис.7. Порівняння напруження по глибині в пористому і компактному матеріалах

Величина напружень, що розтягують на глибині 20 мкм в сталевому зразку нижче напруження, яке виникає в залізному зразку з пористістю 10%, але вище напружень для зразків з пористістю 20 і 30%.

Глибина переходу розтягуючих напружень, що стискають, для залізних пористих зразків становить приблизно 80-90 мкм, а для сталевих - 50 мкм. Слід зазначити, що глибина проникнення залишкових напружень I роду в сталевому зразку вище майже в 2 рази глибини залягання макронапружень в пористих залізних зразках. Величина стискаючих напружень I роду в зразку зі сталі 30 досягає 25,0 МПа, що у багато разів перевищують стискаючі напруження в пористих зразках.

Як показали наші експерименти, в поверхневому шарі пористих залізних зразків, які обточували при різних режимах різання, з'являються також розтягуючі напруження I роду. Це дає підставу припускати однакову природу виникнення залишкових напружень.

Відомо [2], що знак залишкових напружень визначається переважним впливом на процес виникнення напружень теплового або механічного фактору. Наявність напружень, що розтягують в поверхневих шарах пористого матеріалу можна пояснити домінуючим впливом теплового фактора.

Зі збільшенням швидкості різання [3] відбувається зростання кількості тепла в зоні різання і зменшення зусилля різання. Перше сприяє підвищенню величини залишкових напружень, що розтягують, друге - зменшення стискаючих напружень. У підсумку обидва чинники зміщують залишкові напруження розтягу в сторону більших величин.

Висновки. Глибина проникнення напружень I роду для матеріалів з різною пористістю зменшується в міру зростання швидкості, що пов'язано зі скороченням зони деформації, що веде до зменшення глибини проникнення залишкових макронапружень. При збільшенні подачі зусилля і температура різання зростають, що впливає на зростання залишкових макронапружень, що розтягують. Даний процес відбувається більш інтенсивно, ніж збільшення зусилля різання. Інтенсивність теплоутворення в зоні різання також пов'язана і з низькою теплопровідністю пористих матеріалів.

Інформаційні джерела

1. Давиденков Н.Н. Механические свойства материалов и методы измерения деформаций: Избранные труды: в 2-х т. Т. 2. / Н.Н Давиденков. Киев: Наукова думка, 1981.- 656 с.

2. Розенберг, А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М. Розенберг, Ю.А. Розенберг. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 158 с.

3. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

Божко Т.Е., Гальчук Т.Н.
Луцкий национальный технический университет

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РЕЗАНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ 1 РОДА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Остаточные напряжения является важным фактором влияния на качество поверхности, усталостную прочность и износостойкость деталей. Напряжение первого рода, возникающие в результате механической обработки, имеют наибольшее влияние на качество поверхностей, технологические и эксплуатационные свойства детали. Механическая обработка пористого материала отличается от обработки компактного, вследствие неоднородной, пористой структуры металла. В данной работе рассмотрено влияние условий резания на остаточные напряжения 1 рода при токарной обработке пористого материала. Доказано, что глубина проникновения напряжений I рода для материалов с различной пористостью уменьшается по мере роста скорости резания, что связано с сокращением зоны деформации, что ведет к уменьшению глубины проникновения остаточных макронапряжений. При увеличении подачи усилия и температура резания растут, что вызывает рост остаточных растягивающих макронапряжений.

Ключевые слова: токарная обработка, макронапряжения, пористый материал.

T. Bozhko, T. Halchyk
Lutsk National Technical University

INFLUENCE OF CUTTING CONDITIONS ON THE RESIDUAL TENSIONS OF 1 TYPE WHEN TURNING PROCESSING THE POROUS MATERIAL

Residual tensions are the important factor of influence on surface quality, tireless durability and wear resistance of details. The first type of tensions that occurs as a result of mechanical processing have most influence on surfaces quality, technological and operational properties of the details. Mechanical processing of the porous material differs from the processing of the compact, as a result of heterogeneous, porous structure of metal. In this paper consider the influence of cutting conditions on the residual tensions of 1 type when turning processing the porous material. Investigation, that the depth of penetration of tensions of I type for materials with different porous decreases with increase of cutting speed, that it is related to reduction of the deformation zone, that conduces the depths of penetration of remaining macro tensions to reduction. At the increase of serve of effort and cutting temperature grow, that causes the increase of residual stretching macro tensions.

Keywords: turning processing, macro tensions, porous material.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2018.

© Божко Т.Є., к.т.н., Гальчук Т.Н., к.т.н.

УДК 621.9.06: 621.9.08: 621.797

I. Verba, Ph.D., O. Danylenko, Ph.D., A. Yakhno, bachelor, master's student
National Technical University of Ukraine „Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky“

MACHINE-BUILDING TECHNICAL EXCLUSION: TRENDS, PERSPECTIVES, WAYS

The article is devoted to the problems connected with the maintenance of functioning (survival?) in the conditions of the modern economy of enterprises or business structures, whose activities are aimed at the production of material assets, which is associated with the use of machine tools. Taking into account that it is mainly small and medium-sized enterprises, the equipment with modern high-performance but also high-cost equipment for them may not be feasible. Therefore, modernization and repair of existing universal equipment is becoming topical. Repairs „alone“ require the creation of a powerful repair service, which again involves significant costs. The problem will also be personnel issues: providing a repair service to the workers needed for this high qualification, which need to provide the necessary amount of work and the corresponding wages.

Another direction is participation in the secondary equipment market. Realization of the existing equipment allows to receive even small funds, but the combination of them with unused repair and modernization costs simplifies the purchase of the necessary equipment.

A special position is occupied by large-sized equipment, the bearing system which in itself has a significant value (not only material), and it serves as a basis for the modernization or at least the restoration of such machines.

Key words: *modernization, repair, expediency of restoration, methods of repair, secondary market, large-sized machines.*

Introduction. The level of development of machine tools in any country determines the state of its industry, that is, its state of the economy and eventually the level of welfare of the population. Speaking about Ukraine, the development of machine tools, as well as machine building as a whole, does not give grounds for cloudless optimism. The situation is rather controversial: there are enterprises that are at a fairly decent level in terms of equipment (mainly imported), which is used in the production of its own products, and even among these products there are even domestic machines, and there are others - with a very outdated machine tool park, which determines quality and cost of produced products and requirements for the qualification of machine operators. One of the causes of the crisis in mechanical engineering is the uncertainty of the market situation and economic development, which determines the demand for rising decision-making speed. Added to this is the unpreparedness of enterprises to modernization, unqualified management, low management, technology, marketing literacy, ineffective information provision, lack of a systematic approach to the problem of modernization. And as a consequence - the deterioration and loss of competitiveness in the market both domestic and world, lowering the technical level and the potential of machine-building enterprises. In order to solve the problem of technical re-equipment of machine-building enterprises with a view to transfer to an innovative way of development, a radical renewal of the active part of fixed assets must be made, and, for this, a mandatory condition is the restoration and expansion of domestic competitive enterprises capable of assuming the delivery of equipment that is functionally can be used instead of imported.

Formulation of the problem. The import dependence in the volume of the machine tool park is now about 98% (Germany's largest share is 21.6%, followed by Italy and China), and in the beginning of 2013, domestic machine-building products were even exported (≈40% of the produced) [1]. Imported equipment is very expensive and it is not possible to quickly solve the problem of technical re-equipment of enterprises. Consequently, the problem of replacing imported equipment of machine-building plants in the short term in the conditions of the decay of domestic machine tools, limited investments and limited human reserves (the share of skilled workers in finishing operations is ≈ 50% and half of them of retirement age, that is, existing chronic personnel deficit for existing technological equipment).

Analysis of recommendations and possible actions. The market conditions put Ukrainian machine building and, in particular, machine tools, the task of quality, volume and cost of production, which can not be solved by the existing park of technological equipment, first of all - equipment for cutting. The reasons for this are significant physical and mental deterioration (the average age is more

© I. Verba, Ph.D., O. Danylenko, Ph.D., A. Yakhno, bachelor, master's student

than 20 years), that is, the impossibility of implementing modern technology. The structure of the park also does not meet modern requirements and trends, for example, a large proportion of equipment with manual control in a shortage of labor resources, especially skilled personnel. Even that machine park, that is, is not maintained in proper condition because of the reduction of the scope of the system of planned and preventive repairs in modern conditions, and so on.

In [9] the possible ways of solving the problem are given:

- creation of machine tool enterprises, jointly with leading manufacturers of machine tools, as a way to produce costly special, heavy and precision (precision of 1.0-0.1 microns) equipment required by the defense and aerospace industries;
- the restoration and technical re-equipment of their own machine-tool enterprises with the focus on the production of CNC machines of traditional layout, average cost and medium accuracy (0.02-0.001 mm);
- development of small and medium-sized enterprises focused on the production of small-scale industrial, household and educational equipment and mechatronic knots for different purposes of comparatively low accuracy (0.05-0.02 mm) and significantly lower value.

That is, one of the main tasks is the creation and expansion of their own enterprises that are capable of producing machines that can be used instead of imported and cheaper, while simultaneously contributing to the development of the domestic economy and providing jobs. But all this is complicated by limited financial and human resources and timing.

Presentation of the main material. Technical re-equipment of the enterprise, which will ensure the growth of its competitiveness, is aimed at:

- introduction of new (progressive and flexible) technology and modernization of the existing, which will change not only the age structure of the park, but also technological and standard size and level of automation of production;
- introduction of up-to-date technologies and, accordingly, increasing production volumes and reducing the labor-intensive production processes and reducing the number of skilled personnel;
- upgrading of personnel skills, which will result in increased productivity and quality of processing, as well as qualified equipment operation;
- improving the structure and organization of production (for example, increasing the loading of equipment and, accordingly, returning assets, eliminating bottlenecks, etc.).

Technical re-equipment of existing enterprises may involve a partial reorganization and extension of production space due to significant equipment dimensions or vice versa. For example, technological design of the project involves the use of rationally sound and non-standard equipment, which is chosen on the principle of "optimal technological specialization" and may result in a significant reduction of the area (in practice, up to 2-5 times [2]), which will lead to a decrease in the cost of production and, accordingly, will increase its competitiveness.

In general, the technical re-equipment of the enterprise may have different goals: commercial or strategic, the implementation of which is determined by the type of modernization. For example, complete re-equipment of production and the introduction of advanced technologies provides long-term competitive advantages, lower costs, improving product quality, modernizing and replacing certain obsolete and physically worn out equipment - reducing costs for individual operations and improving their quality, and improving the support and economic services - reducing indirect costs and reducing the number of workers that are not directly involved in production [2].

The choice of technological equipment to replenish and refurbish the machine tool park is a rather challenging task. Provides an assessment of the competitiveness of the technical characteristics and performance indicators and cost, but also on non-price indicators, such as authority and business reputation of the manufacturer, product certification, availability and level of maintenance, the ability to obtain, if necessary, nodes or parts for replacement and repair services, etc. . In information sources, information is available on the methodology for predicting the development of a machine gun, determining the rating of enterprises, estimating the technological structure of the park and its flexibility. A. Korniyenko [4] shows inconsistencies that are possible between an array of parts to be processed (characterized by type of processing, dimensions, precision, labor intensity), and capabilities of the machine tool park:

The choice of technological equipment to replenish and refurbish the machine tool park is a rather challenging task. Provides an assessment of the competitiveness of the technical characteristics and performance indicators and cost, but also on non-price indicators, such as authority and business

reputation of the manufacturer, product certification, availability and level of maintenance, the ability to obtain, if necessary, nodes or parts for replacement and repair services, etc. In information sources, information is available on the methodology for predicting the development of a machine gun, determining the rating of enterprises, estimating the technological structure of the park and its flexibility. A. Korniyenko [4] shows inconsistencies that are possible between an array of parts to be processed (characterized by type of processing, dimensions, precision, labor intensity), and capabilities of the machine tool park:

- dimensional - when there is no equipment of the required standard size and processing is carried out using a larger size, which results in an increase in the cost of processing (occupies a larger area and consumes more energy). A very significant increase in cost can be a justification for the purchase of equipment of the required standard size;
- structural - when there is no equipment of the required technological group and it has to be purchased or leased;
- productive - when an existing park does not provide the required productivity.

A. Kornienko introduces the notion of a harmonious park, that is, a park that is capable of ensuring the implementation of a promising volume of work with minimal cost. Thus, the purpose of the enterprise is to transfer the park to a harmonious state. As criteria for choosing ways to eliminate inconsistencies, one can consider the costs and time to harmonize the park provided that the production program is being carried out.

Modern machine-building production differs significantly from the Soviet era and not only the quality, capabilities, technical characteristics of equipment, automation of logistics, and above all the level and principles of organization and management.

In conditions of mass and large-scale production, it was impossible to introduce a constructive change in the machine-tool existing in the enterprise or its technical characteristics, and any adjustment was not related to other products, but to other standard sizes of products (with the exception of aggregate machines), it took a considerable amount of time and yet it was limited.

The requirement to ensure the flexibility of equipment and quick adjustment for the production of small batches of other products has led to the widespread use of the modular method in design. Modern machine-tool plants are oriented more quickly to the assembly of finished purchase modules or aggregates that combine several modules and are also functionally independent, rather than the development and production of the machine and its components directly. Exception is the carrying systems, which are projected directly at the plant. The modules of different manufacturers of the same functional purpose are represented on the market and the designer should (on the basis of comparative analysis, using methods of system analysis, etc.) to select the components that are best suited for the execution of the technical task. It is clear that the assembly and layout of the machine may be different, and the tasks will be solved similar, or, conversely, technical specifications will be provided that will differ significantly and the area of the used equipment will be different. Modular equipment can be developed by the manufacturer for a specific order and needs of future operation and significantly accelerate the development of new products. The next step is the additive modular machines that are oriented not to processing with the removal of unnecessary material, but to "cultivate" the details of the desired shape and size. Thus, small and medium-sized businesses, which are tasking with the production of mechatronic modules, is a rather promising direction, all the more so that much smaller areas and human resources are required for its implementation, and the shortage of skilled personnel is offset by the high level of equipment automation.

Development of the concept of equipment upgrades, project documentation, selection of components and assembly and adjustment may be carried out by engineering centers already operating in Ukraine and offering their services. However, modernization and repair may engage a specialized company and directly to the enterprise user, if it allows the qualification of its employees who know the products and capabilities of the enterprise, used equipment (especially specialized) and can identify problems arise.

In [5], the character of the decline in the utility index (contains relative factors of productivity and accuracy) for the user with the operating time on the example of turning and milling machines with manual control are given. Equipment loses half of its usefulness at the age of 15 years, so existing machines at their age have usefulness no more than 30% of the nominal. So is it worth to repair them and still have a loss from idle time? Maybe it's better to dispose of it and get very little money? Losses from simple art equipment (CNC machines, machining centers, flexible manufacturing modules, etc.)

© I. Verba, Ph.D., O. Danylenko, Ph.D., A. Yakhno, bachelor, master's student

20-30 times higher than the losses from idle tools universal, which leads to increasing demands for quality and duration of repairs.

Of the total cost of repair, 60-65% is spent on the manufacture of spare parts, while the greatest cost are the spare parts made in the repair shop of the plant, which machine is operating: they are more expensive than those produced by the manufacturer-manufacturer, approximately 4.5 times. Progressive methods for restoring parts (vibro-impulse surfacing, different types of coatings, the use of epoxy compounds and polymeric materials, etc.) can restore worn surfaces to nominal sizes, but these methods are often used in a primitive form due to the fact that they are implemented for small batches and a limited range of parts. But unequivocally the task of choosing a centralized or specialized form of repair organization is not resolved because of the many varieties of equipment and components that need to be replaced depending on whether the production of equipment continues and in which country (for example, a number of US, Hungary, Germany, Japan and some companies other countries supply the user with any details of the equipment 10-12 years after the cessation of production [7]).

Machine tools that have been in service for a long time and are worn out and outdated have a certain value for the enterprise: they can be sold (secondary equipment market) and use the funds received to purchase state-of-the-art equipment, but the amount received requires a substantial additional payment, which the entrepreneur may not be is capable So many of the entrepreneurs are forced to restore the machines with simultaneous modernization, especially when it comes to large-sized machines that produce them limited and they do not have a constant load (that is, it is more expedient to apply also to execute orders of other firms). The secondary market of machines is constantly expanding. American and German firms have a great deal of experience in the restoration and modernization of machine tools [7]. For example, in the United States it is considered inappropriate to rebuild and modernize machines, the cost of which is less than 125 thousand - more profitable to dispose of and buy new ones. American firms are trying to repair and upgrade very large machines (horizontally boring, turning carousels aged 30-40 years), which have well-preserved base parts and are thermally stabilized. Manufacturers can repair and upgrade both their own machine tools and machines of other firms. With increasing complexity of repairs consider different types and categories of repairs [4]. Repair firms even compete with direct manufacturers (replacing everything except casting, the components use the same ones as the manufacturers), some 60% of the company's turnover is spent on the purchase of large horizontal boring and turning carousel machines, their restoration, modernization and subsequent realization, and this process lasts no more than 4 months. The cost of a completely refurbished machine is 55-60% of the cost of the new and pays off at its cost from 250 thousand dollars [7]. The repair firm (for example, New Century Remanufacturing) even performs the appropriate calculations and, if possible, satisfies the requirements and wishes of the customer who need to make constructive changes, qualitatively restores the technical documentation, especially hydraulic and electrical schemes, which, of course, increases the cost of repair and modernization.

In Germany, the limits of the efficiency of repair and modernization are significantly lower than in the United States: from 150 thousand marks. The upper limit (500 thousand marks) exists for large milling and multipurpose machines (the companies Heyligenstaedt, Schiess, Dorries-Scharmann, Wotan and Skoda), the cost of refurbished the machine is 30-50% of the cost of the new. In Germany, the modernization of machines, even their only equipment with CNC systems of varying degrees of complexity, has broad prospects [7].

In [8] the recommendations and results of the survey of leading specialists, the priorities of buyers and customers of the United States are given. The analysis showed that the greatest value of the buyers provide reliability and performance characteristics of machines and accuracy of processing. Considerable attention is paid to the availability of spare parts (priority 91.9%) and the system of factory maintenance and technical support (priority 89.7%), and the cost of spare parts (priority 59.9%) is more important than the cost of the machine (priority is 56.9 %)

Thus, we will note the possible directions of action for the purpose of technical re-equipment of the enterprise or industry as a whole:

- complete replacement of the machine tool park - the road is very costly, requires justification of economic feasibility, even in the case of the creation of a new enterprise;
- use of the necessary equipment purchased on the secondary market (ie upgraded and renewed) or its own repaired;
- full orientation to the equipment, repaired and modernized more desirable with the involvement

© I. Verba, Ph.D., O. Danylenko, Ph.D., A. Yakhno, bachelor, master's student

of specialists of a specialized enterprise;

– Major repairs of equipment by themselves - the worst option.

Of course, it is unlikely that any of these options will be implemented so to say "in its pure form", but the consequences can be indicated immediately as to the cost associated with the introduction of modern technologies. But in any case it is expedient to develop the secondary market of technological equipment.

The second question (and most importantly!) Is to determine the composition of the required equipment.

To evaluate the technological potential and needs of the enterprise, technological audit is used, which is one of the most widely used methods of complex express-analysis, and involves a combination of quantitative and qualitative estimates of the enterprise, that is, in essence, considered as a method of system analysis. But the purpose of technological audit is specific: it does not indicate the way of solving problems of the enterprise, but assesses the ability to understand and implement necessary changes, in particular, to the introduction of new technologies.

Even assuming that the specialists of the enterprise know the future production program, which in itself is not realistic in the conditions of market conditions and small-scale production, then choose the necessary equipment not at cost, but on indicators of efficiency at a considerable volume of offers in the market is not the same simple task. The study of foreign scientists relates to stable market conditions and to apply their results and, in particular, the methods proposed for managing market relations and ensuring non-crisis development, in Ukraine is impossible.

Now a number of scientific studies on the application of methods of system analysis have appeared, but they mainly concern issues of economics and production management. However, we can call it an example [1, 3, 6]. However, despite these results, these and other open source information do not include specific generalized recommendations.

Conclusions As a result of the analysis, it has been established that in the first place there is a need to develop a methodology for determining specific output data for the technical re-equipment of the enterprise, namely the assessment of the technological potential and needs of the enterprise (determining the required technological groups and standard sizes of equipment according to the future production program), taking into account the analysis market for machine tools and products in demand. To this end, it is expedient to use the capabilities of information systems and operating databases. Without such information, everything will be reduced to intelligent conversations and games with words about how to perform a comparative and competitive analysis of what is unknown, some conditionally chosen equipment that is suitable in all cases, and in practice will not be loaded sufficiently.

There is a problem in structuring information and recommendations on the application of methods of system analysis in a particular engineering industry, for the consideration of specific tasks, which requires, for example, a comparison of technical characteristics similar to the functional purpose of products of different manufacturers.

So the problem posed requires consideration, and not individual researchers for some specific cases, but generalizations.

Information sources

1. Асанов, Р. Э. Выбор мехатронных модулей по их технологическому уровню / Р. Э. Асанов, М. Г. Косов, А. П. Кузнецов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – с. 68–75.

2. Боровский В. Г. Методология управления модернизацией предприятий машиностроительных отраслей: автореф. дис.. д-ра. экон наук : 08.00.05 / Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – М., 2017. – 35с. – URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01006657406.

3. Гриценко И. В. Выбор конкурентоспособной продукции для адаптации станкостроительного завода к требованиям рынка: автореф. дисс. канд. техн. наук – Москва, 2004 – URL: http://tekhnosfera.com/vybor-konkurentosposobnoy-produktsii-dlya-adaptatsii-stankostroitelnogo-zavoda-k-trebovaniyam-rynka#ixzz4bb6pF14m

4. Корниенко А. А. Разработка организационных принципов развития парка технологического оборудования с целью технического перевооружения машиностроительного производства автореф. дис. д-ра. технич. наук : 05.02.22/ Моск. гос. технологич. ун-т «Станкин» – М.: 2007 – 36 с.

© I. Verba, Ph.D., O. Danylenko, Ph.D., A. Yakhno, bachelor, master's student

5. Кутин А.А., Корниенко А.А. Современные проблемы и концепция повышения конкурентоспособности продукции отечественного станкостроения // Вестник МГТУ «Станкин» №2 (6), 2009 – с. 68-72.

6. Лазаренко Г. П. Сравнительный анализ металлорежущих станков при технологическом проектировании март 2013 DOI: 10.7463/0313.0541242 – URL: http://technomag.bmstu.ru/doc/541242.html.

7. Потапов В.А. Опыт американских и германских фирм по ремонту, восстановлению и модернизации станочного оборудования URL: http://stanki-katalog.ru/st_4.htm

8. Потапов В.А. Требования потребителей к обрабатывающим центрам. // Эксперт – Оборудование (рынок, предложение, цены) – март, 2003 – URL: http://stanki-katalog.ru/st_11.htm

9. Современные тенденции создания модульного оборудования и перспективы модернизации имеющегося станочного парка – URL: https://www.tecorp-group.com.ua/sovremennye-tendencii-sozdaniya-modulnogo-oborudovaniya-i-perspektivy-modernizacii-imeyushhegosya-stanochnogo-parka.

Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н., Яхно А.С., бакалавр, студент магістратури
Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського“

ТЕХНІЧНЕ ПЕРЕОЗБРОЄННЯ МАШИНОБУДУВАННЯ: ТЕНДЕНЦІЇ, ПЕРСПЕКТИВИ, ШЛЯХИ

Стаття присвячена проблемам, пов'язаним з забезпеченням функціонування (виживання?) в умовах сучасної економіки підприємств чи бізнесових структур, діяльність яких спрямована на виробництво матеріальних цінностей, яке пов'язане з використанням верстатного обладнання. Враховуючи, що це переважно підприємства дрібного і середнього бізнесу, оснащення сучасним високопродуктивним але й з високою вартістю обладнанням для них може бути нездійсненним. Тому актуальним стає забезпечення модернізації і ремонту існуючого універсального обладнання. Здійснення ремонту „самотужки“ потребує створення потужної ремонтної служби, що знову ж таки пов'язане з значними витратами. Проблемою також буде і кадрове питання: забезпечення ремонтної служби працівниками потрібної для цього високої кваліфікації, яким потрібно забезпечити необхідний обсяг роботи і відповідну заробітну плату.

Інший напрямок – участь у роботі ринку вторинного обладнання. Реалізація наявного обладнання дозволяє одержати хоча і невеликі кошти, але поєднання їх з не використаними витратами на ремонт і модернізацію спрощує придбання потрібного обладнання.

Особливе положення займає великогабаритне обладнання, несуча система якого має сама по собі значну цінність (не тільки матеріальну) і це слугує підставою для модернізації чи принаймні відновлення таких верстатів.

Ключові слова: *модернізація, ремонт, доцільність відновлення, методи ремонту, вторинний ринок, великогабаритні верстати.*

И.И. Верба, к.т.н., А.В. Даниленко, к.т.н., А.С. Яхно, бакалавр, студент магистратуры
Национальный технический университет Украины „Киевский политехничесий институт имени Игоря Сикорского“

ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: ТЕНДЕНЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ПУТИ

Статья посвящена проблемам, связанным с обеспечением функционирования (выживания?) в условиях современной экономики предприятий или бизнес-структур, деятельность которых направлена на производство материальных ценностей, связанное с использованием станочного оборудования. Учитывая, что это в основном предприятия мелкого и среднего бизнеса, оснащение современным высокопроизводительным но и с высокой стоимостью оборудованием для них может быть невозможным. Поэтому актуальным становится обеспечение модернизации и ремонта существующего универсального оборудования. Осуществление ремонта „самостоятельно“ требует создания мощной ремонтной службы, это опять же связано со значительными затратами. Проблемой также будет и кадровый вопрос: обеспечение

© I. Verba, Ph.D., O. Danylenko, Ph.D., A. Yakhno, bachelor, master's student

ремонтной службы работниками необходимой для этого высокой квалификации, которым нужно обеспечить необходимый объем работы и соответствующую заработную плату.

Другое направление - участие в работе рынка вторичного оборудования. Реализация имеющегося оборудования позволяет получить хотя и небольшие средства, но сочетание их с не использованными затратами на ремонт и модернизацию упрощает приобретение необходимого оборудования.

Особое положение занимает крупногабаритное оборудование, несущая система которого имеет сама по себе значительную ценность (не только материальную) и это служит основанием для модернизации или хотя бы восстановления таких станков.

Ключові слова: *модернізація, ремонт, доцільність відновлення, методи ремонту, вторинний ринок, великогабаритні верстати.*

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018.

© I. Verba, Ph.D., O. Danylenko, Ph.D., A. Yakhno, bachelor, master's student

УДК 621.

Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.
Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського“

БАЛАНСУВАННЯ ОБЕРТОВИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СИСТЕМ: БАГАТО ПИТАНЬ І ДЕЯКІ ВІДПОВІДІ

Стаття присвячена проблемам, які виникають у разі наявності дисбалансів при обробці високошвидкісним обертовим інструментом металевих та неметалевих деталей. Необхідність балансування не потребує доказів. Але й не викликає сумнівів той факт, що повністю ліквідувати дисбаланс неможливо, а тому треба обгрунтовано обрати припустимий залишковий дисбаланс й забезпечити стабільність меж, в яких необхідно, можливо і доцільно його підтримувати. Проблема посилюється відсутністю загальновизнаної точки зору на нормативні вимоги, які слід застосовувати, на наслідки залишкового дисбалансу для конкретної інструментальної системи, задіяної у конкретному технологічному процесі.

Існують міжнародні стандарти з узагальненими рекомендаціями щодо точності й класу балансування, але вони не є однозначними. Аналіз інформаційних джерел показав, що не враховуються досить впливові фактори, наприклад, індивідуальні особливості як інструментів, так і технологічного обладнання. А ще є рекомендації виробників інструментів та балансувальних машин. Тож застосовують експертні оцінки, які доцільно було б підтвердити дослідженнями наслідків порушення рекомендованого припустимого дисбалансу та моделюванням робочих процесів.

Ключові слова: *високошвидкісна обробка, вплив дисбалансу, необхідність балансування, рекомендації стандартів, рекомендації виробників інструментів, експертні оцінки, дослідження припустимої величини дисбалансу.*

Вступ. Високошвидкісна обробка металів та інших матеріалів на сьогодні є не просто тенденцією, вона стала нормою для таких галузей, як аерокосмічна чи виготовлення прес-форм. Вигода очевидна: підвищення продуктивності. Характерні частоти обертання токарних верстатів становлять 4000-8000 об/хв, фрезерних та багатоцільових – 8000-18000 об/хв із сталою тенденцією зростання до 40000 об/хв. Реалізація високошвидкісної обробки зумовила розробку нових інструментальних матеріалів і потребує певних конструкторських дій для виконання експлуатаційних вимог. Зокрема саме через впровадження високошвидкісної обробки різанням стало нагальним забезпечення високої точності балансування обертового інструменту. Вже в інтервалі 10000-20000 об/хв балансування у одній площині є необхідним, із збільшенням обертів – обов’язковим і в багатьох випадках – у двох площинах.

Постановка проблеми. В цілому процес балансування жорстких та гнучких роторів, а також і обертового інструменту, є відомим, але відсутня загальновизнана точка зору на нормативні вимоги, які слід застосовувати, на наслідки залишкового дисбалансу для конкретного інструменту, який задіяний у виконанні конкретного технологічного процесу тощо.

Аналіз стандартів та рекомендацій. За визначенням ISO балансування є процесом перевірки розподілу мас ротора і, за необхідністю, їхня корекція, метою якої є збереження граничних значень коливань за експлуатаційної частоти обертання шпинделя або опорних сил, які виникають при цьому. Згідно з цим визначенням балансування передбачає виконання двох операцій: вимірювання дисбалансу і його корекція

Так як балансування повинно забезпечити компроміс між технічною необхідністю й економічною доцільністю, то, наприклад, німецький Комітет з промислового виробництва запропонував при розробці вимог до балансування враховувати наступне:

– існування межі, зумовленої похибками запресовування оправки до патрона, при перевищенні якої збільшення якості балансування є недоцільним;

– існування межі, дотримання якої дозволяє виключити критичне вібромеханічне навантаження на систему інструмент-шпиндель і зберігати на постійному рівні динамічні навантаження на шпиндельні опори (граничні значення припустимих коливань опор згідно з рекомендаціями VDI 2056).

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.

Ступінь балансування визначається стандартом ISO 1940/1:1986 Міжнародної організації стандартизації [10] та стандартом ANSI S2.19-1989 Американського національного Інституту Стандартів. В цих стандартах застосована так звана G-система точності балансування (номер у позначенні класу є припустимим дисбалансом на 1 кг маси, яка обертається з частотою 10000 об/хв.), подані рекомендації (рис. 1). Згідно з ISO 1940/1 – Вимоги до якості балансування роторів у постійному (жорсткому) стані – клас G як показник якості балансування обертового тіла– це тангенціальна швидкість у центрі тяжіння відносно до швидкості обертання, залежить від швидкості обертання, маси тіла та дисбалансу. Клас G не може бути ідентифікований без значення швидкості обертання.

Спрощено визначити припустимий дисбаланс або, навпаки, клас G якості балансування можна наступним чином[2]:

$$U = (9.5 \times W \times G)/n, \quad (1)$$

де U – припустимий дисбаланс, г·мм; W – вага інструмента чи інструментальної головки, кг; G – клас якості балансування (ISO 1940/1); n – робоча частота обертання, об/хв.

З 2011 діє стандарт DIN 69888 [9], що стосується саме балансування обертового інструменту і рекомендує визначати припустимий залишковий дисбаланс залежно від швидкості обертання шпинделя (подано відповідні діаграми, рис. 2). У цьому стандарті всі припустимі залишкові дисбаланси вказані у [г·мм], але не віднесені до рівню якості (клас G), як це передбачено ISO 1940-1.

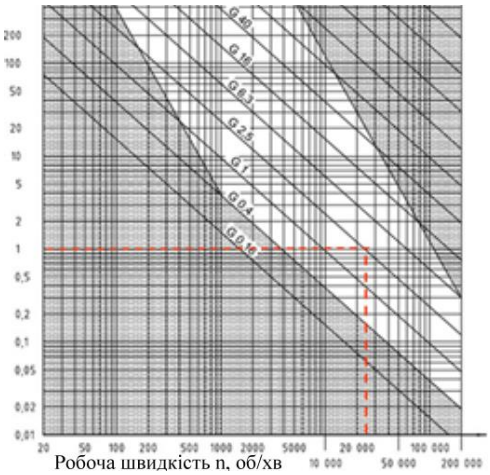


Рис. 1. Припустимий залишковий питомий дисбаланс для різних класів (G) за ISO 1940-1 [11].

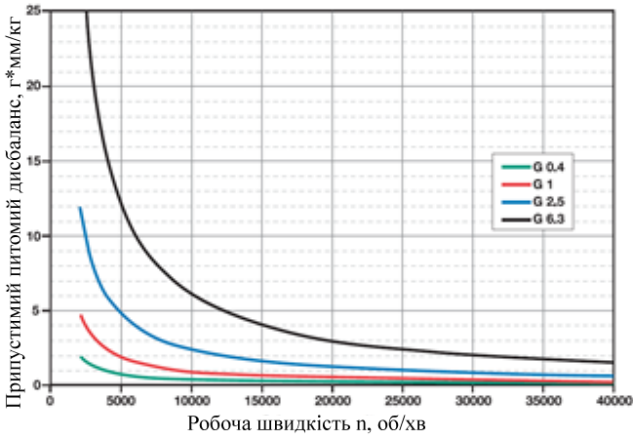


Рис. 2. Залежність припустимого питомого дисбалансу від швидкості обертання і класу балансування «G» [12]

Нові вимоги до умов балансування системи шпиндель верстату-затискний пристрій-інструмент виникли через зростання швидкостей різання, якого вимагають нові інструменти та матеріали. Стандарт ISO 1940/1, який взагалі-то був призначений регламентувати якість балансування жорстких роторів і не зовсім був придатним для інструментальних оправок, бо елементи системи мають зовсім інші базові характеристики на відміну від, наприклад, роторів електродвигунів, передбачав жорсткіші вимоги, ніж стандарт DIN 69888.

Придатність вимог стандарту DIN 69888 для застосування підтверджена експериментальними дослідженнями, які показали, що балансування інструментальних наладок не має вирішального впливу на вихідні параметри фрезерування (якість обробки, середні амплітуди сил різання, вібраційний стан шпинделя).

Аналіз інформаційних джерел дозволяє назвати певні рекомендації щодо точності й класу балансування [4]:

– G16 – при обробці з великою кількістю стружки (наприклад, виготовлення з алюмінію суцільних авіаційних деталей великого розміру), обробка корпусних деталей з легких сплавів, чорнова обробка інструментів та штампів (за умови врахування навантажень на шпиндельні опори від значних сил різання та дисбалансів, які ними зумовлені), рекомендація є компромісною й дозволяє зберігати на постійному рівні динамічні

навантаження на шпиндельні опори з обмеженням граничних значень припустимих коливань, а з врахуванням маси інструменту визначає припустимий залишковий ексцентриситет ;

- G6,3 – G8,0 – за частот обертання шпинделя 15000-24000 об/хв, за високих вимог до якості обробленої поверхні необхідна умова: мінімізувати зміщення вершини інструменту, зумовлені дисбалансами);
- G2.5 та вище –для багатоцільових верстатів, які працюють у традиційному діапазоні швидкостей (за стандартом ISO 1940/1:1986);
- G1 – G0.4 – для високошвидкісних верстатів;

При фінішній обробці може виникнути потреба й у підвищенні класу точності балансування. Один з шляхів – балансування інструментів та інструментальних оправок разом із шпинделем у складеному стані.

Дослідження [2, 4, 5, 8, 15] довели, що для різних балансувальних верстатів вимірювання різняться значним чином, а заданий у технічних вимогах на інструмент клас точності балансування не відтворюється надійно при вимірюваннях: принаймні клас G2,5 і навіть G6,3 відтворюється не для всіх частот. Питання про достатність класу точності G1,6, який рекомендується для високошвидкісної обробки, повинно вирішуватися у кожному окремому випадку.

До допоміжного інструменту для закріплення фрез (оправки, патрони) ставлять вимогу – 3 клас точності балансування у складеному вигляді, точність з'єднання шпиндель-оправка, відхилення форми й розташування посадкової поверхні – 2 та 3 ступінь точності. Рекомендовані класи точності балансування для верстатних роторів визначають граничні радіальні навантаження в опорах та рівні вібрацій за холостого ходу.

При обробці з високими частотами обертання (> 6000) або швидкістю різання > 1000 м/хв необхідно виконувати 2-ступеневе балансування: основне балансування корпусу інструменту разом із пластинами з використанням заздалегідь збалансованих базових тримачів (може виконуватись фірмою-виробником на замовлення) та точне балансування інструменту разом з оснащенням у складеному вигляді, яке є обов'язковим, бо навіть незначне радіальне биття може значним чином вплинути на клас балансування.

DIN 69888 вимагає здійснювати балансування інструментальної системи таким чином, щоб враховувалось фактичне навантаження на підшипники шпинделя від неврівноваженості інструменту, яке не повинно перевищувати 1 % динамічної несучої здатності підшипників. Орієнтовне значення вимог до балансування можна отримати порівнянням із зусиллям різання: у більшості випадків зусилля дисбалансу не повинно становити більш за 5-10 % [8].

Слід відзначити наступне: суттєва різниця у масі оправки та ротора-шпинделя; посадка оправки HSK за двома поверхнями проблематична; отвір у шпинделі виконано на верстатобудівному підприємстві, а оправку виготовлено на інструментальному заводі, тобто ці розміри узгоджено лише у певних межах й необхідно забезпечити однакові встановлювальні бази. Додаткової уваги вимагають системи допоміжного інструменту та їхня придатність до балансування.

Разом з тим не все так просто й ясно, навіть стосовно стандартів.

Викладення основного матеріалу. При балансуванні обертового інструменту згідно ISO 1940/1:1986 точність балансування для багатоцільових верстатів, які працюють у традиційному діапазоні швидкостей, повинна бути не нижче за G2.5, для високошвидкісних верстатів – в межах класів G1-G0,4. При цьому стандарт

– припускає за тої самої частоти обертання різний залишковий дисбаланс для важкого інструменту й для легкого, тобто й різне навантаження на підшипники шпинделя;

– не враховує той факт, що динамічний дисбаланс не залежить від маси інструменту, а визначається неврівноваженістю інструментальної системи й зусиллями при обробці;

– призводить до перевищення меж можливих вимірювань для звичайних балансувальних машин.

Наприклад, клас G 2,5 при 25000 об/хв визначає дисбаланс 1 г·мм для інструменту масою 1 кг, тобто припустимий ексцентриситет центру ваги становить 1 мкм, а для інструментів меншої ваги чи для більших швидкостей вимоги зростають: інструмент вагою 0,35 кг при 40000 об/хв для класу G 2.5 повинен мати ексцентриситет центру ваги 0,6 мкм. Навіть якщо залишковий дисбаланс системи, що містить дуже якісно врівноважений інструмент,

визначається лише відхиленнями, зумовленими складанням, після встановлення у шпиндель, наприклад, інструмента HSK, може бути досягнута точність з'єднання 2-4 мкм (ISO 12164), тобто неможливо виконати умову врівноваженості. Зношення й биття шпинделя додатково погіршують точність з'єднання [13]. Отже чим вище швидкість, тим вимоги до залишкового дисбалансу стають жорсткіші, а балансування потребує значного часу й надточного обладнання.

Таким чином, виникає як мінімум кілька питань. Як визначити припустимий дисбаланс для інструментальної системи, що призначена для високошвидкісної обробки? Використовувати рекомендації стандартів або виробників інструменту? Сподіватись на якість балансування виробниками або придбати балансувальну техніку й виконувати балансування самостійно? З цієї точки зору доцільно проаналізувати умови виникнення дисбалансів та шляхи впливу й конкретні конструктивні особливості сучасних інструментів для високошвидкісної обробки, рекомендації виробників інструментальних систем та можливості балансувального обладнання.

Отож розглянемо докладніше специфічні причини виникнення дисбалансу інструментальних систем в умовах високошвидкісної обробки, наслідки цього явища та чинники, які можуть мати вплив на нього.

Як відомо, дисбаланс зумовлюється нерівномірним розподілом навколо осі обертання маси тіла, яке обертається. Причини цього бувають:

– постійні: асиметричність вузла чи деталі. Для оправки це може бути наявність шпонкового пазу чи затискних гвинтів.

– змінні: неоднорідність матеріалу, виробничі фактори (спотворення припуску), дія змінних (через різні причини) відцентрових сил.

Отож дисбаланс може зумовлюватись конструкцією, матеріалом, виготовленням та складанням. Кожний ротор навіть за умови серійного виробництва має індивідуальний розподіл дисбалансу за довжиною.

Оскільки дисбаланс є характеристикою нерівномірності розподілу маси, він не залежить від швидкості, але ефект дисбалансу (тобто ефект відцентрових сил) визначається квадратом швидкості, що й зумовлює необхідність високоточного балансування швидкісних шпинделів.

Вирізняють експлуатаційні дисбаланси, які зумовлені пружними й пластичними деформаціями ротора (шпинделя), зношенням деталей, дією гідродинамічних та електромагнітних сил на ротор, і функціональні дисбаланси, які спостерігаються у кінці технічного ресурсу машини (перед її капітальним ремонтом), а їхні граничні значення, за яких ще зберігається працездатність виробу, встановлюють при проектуванні.

Статичний дисбаланс виникає у разі зміщення головної осі інерції паралельно до осі обертання (зміщення центру мас). Це може бути компенсовано додаванням або вилученням матеріалу, вага якого дорівнює дисбалансу, виконаним в одній площині, яка є перпендикулярною до осі обертання. Вимірювання можливе у статиці. Характерно для дискових роторів із співвідношенням довжини до діаметру меншим за 0,25.

Якщо дві маси з однаковим дисбалансом розташовані одна навпроти одної (кут 180°) у двох площинах, які є перпендикулярними до осі обертання, виникає моментний дисбаланс. Ось інерції перетинає ось обертання у точці центра ваги. Моментний дисбаланс можна виправити коригуючою масою, яка дорівнює вихідній парі мас, але розташована протилежно. Виміряти моментний дисбаланс можна лише на балансувальній машині, яка має обертовий рух. За динамічного дисбалансу ось інерції та ось обертання розташовані не паралельно, а ексцентрично і з нахилом, що зумовлює коливальні рухи ротора (оправки інструмента та / або інструмента). Виміряти цей дисбаланс можна також на балансувальній машині, яка має обертовий рух. Виправити можна лише шляхом компенсації (додавання або вилучення матеріалу) у двох площинах.

Залишковий дисбаланс (залишковий ексцентриситет центра мас) за звичай невідомий і дійсну величину дисбалансу визначають на балансувальній машині. Припустимий дисбаланс обумовлюється замовником і саме за ним оцінюють складність процесу балансування та можливість його здійснення взагалі.

Негативні наслідки дисбалансу:

– додаткове навантаження на опори шпинделя (при обробці інструментом великої ваги або із значним вильотом скорочує час їхньої експлуатації до 50% [8]).Саме через це виробники

шпинделів і обробних центрів рекомендують застосовувати лише збалансований інструмент, в іншому випадку обмежена або взагалі не діє гарантія виробника. Для високошвидкісного шпинделя навіть виконання однієї операції інструментом незбалансованим або встановленим у незбалансованій оправці, може зумовити пошкодження підшипників. Збалансований інструмент дозволяє збільшити строк служби шпинделя (до ≈ 10000 год при n=15000 об/хв) і надійність верстату.

– зменшення строку служби незбалансованого інструменту у складеному стані (оправка із затиснутим інструментом та штревелем) – в середньому на 10% [8]. Радіальне биття з умови стійкості інструменту не повинно перевищувати 3 мкм на довжині 4D (D – діаметр інструменту). Наприклад, при збільшенні биття з 3 мкм до 12 мкм стійкість інструменту зменшується на 70 % [5]. Інструменти вимагають підвищеної уваги через високу вартість їхньої заміни, бо вартість інструменту, який використовують для верстатів високошвидкісної обробки, залежно від призначення у 4….10 разів вища ніж традиційного інструменту (частково висока вартість компенсується збільшенням строку експлуатації завдяки меншій глибині різання);

– вібрації, які погіршують стан обробленої поверхні (утворюються сліди, зумовлені биттям інструменту, які треба додатково оброблювати) та не дозволяють забезпечити точні допуски. Дисбаланси впливають на амплітуди вібрацій;

– змінювання умов контактування у з'єднанні шпиндель-оправка через значні відцентрові сили, що зумовлює виникнення зазорів і висування оправки із шпинделя або, навпаки, заклинювання у шпинделі.

Отож лише якісне балансування інструменту навіть з оправкою не може забезпечити безпечну роботу на високих швидкостях. Треба враховувати також щонайменше такі змінні чинники, як тип з'єднання між шпинделем та державкою, тип виконуваної операції різання, жорсткість верстата, стан підшипників. Система шпиндель верстату-затискний пристрій-інструмент характеризується значними відхиленнями у часі, наприклад, через часте змінювання інструментів, як це відбувається у обробних центрах.

При кожній заміні інструмента через похибки базування фрези, оправки та тяги пристрою затиску змінюються відцентрові сили. Сила затягування внаслідок існування зазорів у напрямних тяги прикладена ексцентрично, що зумовлює виникнення радіальної складової, яка діє як незрівноважена сила, не залежить від частоти обертання, а визначається зазорами, тобто точністю виготовлення. Через радіальні й кутові похибки затиску заміна інструмента у шпинделі призводить до змінювання стану балансування всієї системи. Якість балансування обмежується допусками посадок окремих деталей (шпиндель, затискний пристрій, інструмент). Тож як наслідок маємо справу із неможливістю відтворити ідентичні умови балансування окремого елементу і вимогою здійснювати балансування системи з'єднань, зокрема й шпинделя, який начебто є збалансованим заздалегідь. Виробники відзначають, наприклад, проблеми при балансуванні гідравлічних патронів [6] : вже із швидкості 1100 об/хв з отворів, через які патрон заповнювали мастилом, під дією відцентрових сил просочується мастило, краплі якого, в свою чергу, створюють дисбаланс, що є порівнянним із фактичним дисбалансом наладки. Якщо це явище не врахувати, дисбаланс буде оцінено помилково.

Радіальна складова сили різання також діє як незрівноважена на крайку фрези при контакті із заготовкою. Дія сили різання є періодичною, напрямок її дії змінюється, коли у контакт із заготовкою входить наступна крайка. Характер сил різання при фрезеруванні зумовлює виникнення полігармонічних вібрацій. Отож обов'язковою умовою є балансування всіх складових системи, зокрема й інструментальних оправок: якщо оправка має биття 5 мкм, її експлуатація є неприпустимою.

Для інструментальних оправок на практиці найчастіше виконують статичне балансування в одній площині корекції, бо домінує радіальне зміщення центру мас, центральна головна вісь інерції лишається паралельною осі обертання. Корекція статичного дисбалансу вочевидь є достатньою при частотах обертання, що не перевищують n = 10000 об/хв. Умовна конструктивна ознака: $L \leq 2D$, де L – довжина інструменту, D – діаметр конусу інструменту (рис.3). Динамічне балансування у двох площинах рекомендується для довгих, важких і особливо для асиметричних за формою інструментів. Динамічний дисбаланс коригують при $n > 10000$ об/хв. Умовна конструктивна ознака: $L > 2D$ [6].

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.

Рис.3. Дисбаланси оправок інструмента. Позначено: а) – статичний дисбаланс в одній площині; б) – динамічний дисбаланс в двох площинах [1].

Ефективний результат вимагає виконувати балансування при кожній заміні інструменту. Але ці дії вимагають наявності оправок, які припускають балансування, та відповідної балансувальної машини. Точність балансування, яку можна забезпечити на традиційних балансувальних верстатах, становить 0,5 мкм (1 клас точності балансування роторів з максимальною частотою обертання 8000 об/хв.). Менші значення можна забезпечити лише за умови застосування спеціального обладнання.

Сучасне балансувальне обладнання [1, 8, 16] в багатьох випадках є універсальним, поєднується з вимірювальною технікою відомих виробників, має інтегровані блоки ЧПК для автоматичного усунення дисбалансу в одному чи двох перерізах шляхом видалення металу у вертикальному або горизонтальному напрямках. Після вимірювання дисбалансу програма розраховує потрібну глибину свердління, фрезерування чи шліфування для усунення дисбалансу. У сучасних машинах намагаються уникати видалення металу з метою балансування (субтрактивна компенсація), бо це псує саму оправку. Дисбаланс ліквідують компенсуючими кільцями [3, 12] й пересувними тягарцями з використанням лазерного позиціонування (можуть використовуватись багаторазово). Вимірювання дисбалансу триває 1 хвилину, а балансування в цілому у разі застосування кілець – 2 хвилини, у разі видалення матеріалу трохи довше. За даними фірми Kennametal-Herteb використання шпиндельних оправок з балансувальними кільцями забезпечує сталу роботу за частот обертання до 40000 об/хв (для звичайних оправок частоти не перевищують 8000 об/хв) [12].

Провідні виробничі компанії, які випускають інструменти й інструментальні системи для високошвидкісної обробки та балансувальне обладнання й, відповідно, здійснюють певні дослідження у цій сфері (SGS Tool Company й Kennametal Hertel (США), Sandvik Coromant (Швеція), Seco (Італія), Korloy й Taegu Tec (Південна Корея), Iscar (Ізраїль), Walter, Hofmann і Haimer (Німеччина) та ін) встановлюють свої вимоги до якості балансування, котрі можуть суттєво відрізнятися між собою та від відповідних стандартів загального призначення, які регламентують балансування жорстких чи гнучких роторів. Наприклад, більшість виробників високошвидкісних електрошпинделів для фрезерних обробних центрів вимагають балансувати інструментальні наладки для n=23000 об/хв не нижче класу G 6.3 [7]. Фірма Walter рекомендує застосовувати стандарт балансування DIN 69888, який містить вимоги, що стосуються саме інструментів для обробки різанням, а не галузі машинобудування в цілому. Вимоги щодо випадку обробки із швидкістю різання > 1000 м/хв містяться у стандарті DIN ISO 15641 [10], який стосується вимог до безпеки експлуатації фрез для високошвидкісної обробки. [13]. Наприклад, фреза Sandvik RAL90 для обробки алюмінію сертифікована саме за цим стандартом для роботи з частотою обертання шпинделя до 27500 об/хв.

Виробники надають доволі жорсткі рекомендації щодо припустимих частот обертання за встановлених стандартами дисбалансів, підкреслюють, що це стосується лише інструментів без додаткових подовжувачів, але при цьому орієнтують споживача на використання оригінальних елементів (наприклад, ріжучих пластин, затискних гвинтів) лише власного виробництва. Фірма Walter, наприклад, вимагає додержуватись моментів затиску, що їх вказано у каталозі для конкретних інструментів, а після 5 змінювань пластин встановлювати нові гвинти [13]. Скоріш за все це свідчить про відсутність чіткого уявлення, не просто про причинний зв’язок чинників

впливу на дисбаланс та характер цього впливу, а про відображення у вигляді конкретних значень, наприклад, наслідків конструктивних змін з можливістю прогнозування величини дисбалансу.

Фірма Taegu Tec (рис. 4) пропонує цангові патрони з можливістю статичного чи динамічного балансування за рахунок конструкції (наявність балансувальних кілець), але з необхідністю коригування методу відповідно до балансувальної машини, що застосовується. Наприклад, на деяких машинах можна здійснити балансування поворотом точки максимуму, яку вказано на балансувальних кільцях, а на інших – змінюванням дисбалансу кілець за їхнього незмінного кутового положення (рис. 5).

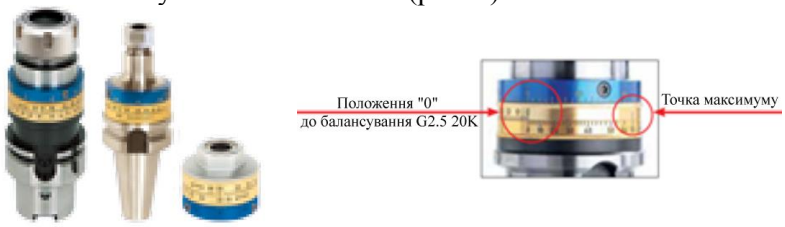


Рис. 4. Цангові патрони Taegu Tec з балансувальними кільцями [14]

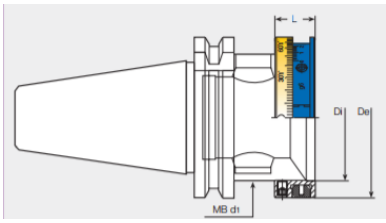


Рис. 5. Змінні кільця для балансування MB-BL-RING [3, 12]

Тримачі інструменту «Silent Tools» [15] мають конструкцію, яка мінімізує вібрації за допомогою системи демпфірування в самому інструменті. Найчастіше їх застосовують, наприклад, при розточуванні за великих вильотів інструменту – (4-6)×D.

Отож маємо дві характерні тенденції: збалансовані виробником оправки і оправки, що є придатними до балансування, зокрема з використанням спеціальних балансувальних машин.

Коли застосовувати збалансовані виробником оправки, а коли – оправки, що придатні для балансування? Вочевидь в цих оправок різна вартість. Але слід враховувати, що неякісне або недостатнє балансування в решті решт призведе до суттєвих витрат по заміні підшипників або дуже вартісного шпинделя [8] і ще й до простоювання обладнання із високою вартістю хвилини роботи. Традиційно вважають, що додаткове балансування не потрібне при швидкості обертання шпинделя в межах 8000-10000 об/хв. Але для інструмента простої форми й незначної довжини, встановленого у збалансовану оправку (наприклад, кінцева фреза) межею додаткового балансування може бути 12000-15000 об/хв, а для довгої розточувальної оправки в аналогічному тримачі – 5000-6000 об/хв. Якщо швидкість шпинделя перевищує 15000 об/хв треба використовувати оправки, які припускають балансування, а при більш ніж 20000 об/хв – обов’язковим є балансування у двох площинах, яке за менших швидкостей застосовують лише для відносно довгого й несиметричного інструменту.

Висновки. У результаті проведеного аналізу встановлено, що існує необхідність не лише у структуруванні інформації й рекомендацій щодо призначення припустимих дисбалансів обертових інструментальних систем, а, в першу чергу, у докладнішій конкретизації цих рекомендацій і наслідків їхнього порушення.

Слід зазначити, що призначення припустимих дисбалансів в основному базується на досвіді застосування певних інструментів, тобто обгрунтуванням є експертна оцінка, правильність якої нічим не підтверджується, окрім довіри до знань та досвіду самого експерта. Наслідки помилки описані дуже загально й, скоріш за все, не одразу й пов’язані будуть саме із дисбалансом. Майже відсутні дослідження, які встановлюють зв’язок між якістю балансування й відхиленнями параметрів робочих процесів і параметрів працездатності обладнання. Подібна інформація існує відносно швидкості обертання, відповідно, може бути адаптована щодо маси і діаметрів інструментів.

Безперечно, дуже привабливим здається варіант наявності й використання на підприємстві спеціального балансувального обладнання, але повинна розглядатися економічна доцільність такого розв’язку питання у конкретному випадку. Порівняльний аналіз різних варіантів, зокрема й можливості та ризиків застосування лише збалансованих виробником інструментальних систем, ускладнюється відсутністю аргументованих даних, як початкових, так і для усвідомлення результату.

Таким чином, вважаємо, що, враховуючи тенденцію підвищення швидкостей обробки обертовим інструментом та зростання вимог до її якості, необхідно надати певні рекомендації

користувачу щодо наслідків порушення рекомендованого припустимого дисбалансу, підкріпленні відповідними дослідженнями та моделюванням робочих процесів.

Інформаційні джерела

1. Балансировочные станки для инструментальных оправок/ HOFMANN Mess- und Balancing Technology GmbH & Co. KG – Режим доступу: http://www.uralinco-centr.ru/
2. Балансировка инструмента URL: http://sibengine.com/balansirovka-instrumenta/
3. Маслов А.Р. Конструкции прогресивного инструмента и его эксплуатация. М.: Издательство «ИТО», 2006. – 166 с.
4. Потапов В. А. Оценка реального качества балансировки инструментов [Електронний ресурс]. URL: http://rstanok.ru/articles/article_07.php (27.04.2015)
5. Рыженков В.М. Вибрация и балансировка технологической системы. // Мир техники и технологий. – 2007 – №8 (69) – с. 76-78.
6. Савилов А.В., Николаев Д.Ю., Николаев А.Ю. Исследование влияния дисбаланса инструментальных наладок на выходные показатели фрезерования. // Вестник ИрГТУ, №7 (102) – 2015 – с. 81-90
7. Серебреницкий П.П. Высокоскоростная механическая обработка. // РИТМ, №2(32), 2008 – с. 21-27.
8. Haimer. Балансировка и производительность – причинно-следственная связь. // Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка) – 2010. – №6 – с. 44-45.
9. DIN 69888:2008-09. Auswuchtsanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme. 2008.37 p.
10. DIN ISO 15641. Фрезы для высокоскоростной обработки. Требования безопасности.
11. ISO/FDIS 1940/1 :2002(E). Mechanical vibration – Balance quality requirements of rigid rotors – Part 1: Specification and verification of balance tolerances. Geneva: ISO TC 108/SC 1/WG 8, 2002. 36 p.
12. Техническая информация. Инструментальные системы. URL: www.kennametal.su/doc/load/sistemy-instrumenta-kennametal-2009-god/page/805
13. Walter AG (*Walter Tools*). Офіційний сайт. URL: http://www.walter-tools.su
14. Техническая информация. URL:
15. Техническая информация. Инструментальные системы и станки. URL: https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/tooling-systems/Machine-and-tooling-systems-considerations/balancing-and-rpm
16. HAIMER Tool Dynamic Seite/Auswuchttechnik URL: www.haimer.com

Верба И.И., к.т.н., Даниленко А.В., к.т.н.,
Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского“

БАЛАНСИРОВКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ: МНОГО ВОПРОСОВ И НЕКОТОРЫЕ ОТВЕТЫ

Рассмотрены проблемы, обусловленные наличием дисбалансов при обработке деталей из металлических и неметаллических материалов высокоскоростными вращающимися инструментами. Необходимость балансировки не подлежит сомнению, но полностью устранить дисбалансы невозможно. Поэтому необходимо обосновано выбрать допускаемый остаточный дисбаланс и обеспечить возможность, целесообразность и стабильность поддержания границ, которые он не должен превышать. Задача усложняется отсутствием общепризнанной точки зрения на нормативные требования, на последствия остаточного дисбаланса для конкретной инструментальной системы, используемой в конкретном технологическом процессе.

Существуют международные стандарты с рекомендациями по точности и классу балансировки, но они не однозначны. Анализ информационных источников показал, что не учитываются, например, индивидуальные особенности инструментов и оборудования, которые значительно влияют на дисбаланс, не согласованы рекомендации производителей инструментов и балансировочных машин. Широко используются экспертные оценки, но они нуждаются в подтверждении исследованиями последствий нарушения границ допускаемого дисбаланса и моделированием рабочих процессов.

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.

Ключевые слова: *высокоскоростная обработка, влияние дисбаланса, необходимость балансировки, рекомендации стандартов, рекомендации производителей инструментов, экспертные оценки, исследования допустимой величины дисбаланса.*

Verba I.I., Ph.D., Danylenko O.V., Ph.D.
National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

BALANCING OF ROTATING TOOLS SYSTEMS: MULTIPLE QUESTIONS AND SOME ANSWERS

The problems caused by the presence of imbalances in the processing of parts from metal and nonmetallic materials by high-speed rotating tools are considered. The need for balancing is unquestionable, but it is impossible to completely eliminate imbalances. Therefore, it is necessary to choose the permissible residual imbalance and provide the possibility, expediency and stability of maintaining the boundaries, which it should not exceed. The task is complicated by the lack of a generally recognized viewpoint on regulatory requirements, the consequences of residual imbalance for a particular instrument system used in a particular technological process.

There are international standards with recommendations for accuracy and class balancing, but they are not unambiguous. An analysis of information sources showed that, for example, individual features of tools and equipment that significantly affect imbalance are not taken into account, the recommendations of tool manufacturers and balancing machines are not agreed upon. Expert assessments are widely used, but they need to be confirmed by examining the consequences of breaking the boundaries of the assumed imbalance and modeling work processes.

Key words: *high-speed processing, the effect of imbalance, the need for balancing, the recommendations of standards, the recommendations of tool manufacturers, expert assessments, studies of the permissible magnitude of imbalance.*

Стаття надійшла до редакції 25.03.2018.

© Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.

УДК 621.86

Гевко Ів.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А.
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

СИНТЕЗ СПОСОБІВ НАВИВАННЯ СПІРАЛЕЙ ШНЕКІВ

Для пошуку нових способів навивання спіралей шнеків узагальнено існуючі напрацювання і вибудувано правила навивання спіралей шнеків з врахуванням обмежень. Проведено кодування конструктивних ознак та окремих елементів, що використовуються при навиванні спіралей шнеків. Виконано синтез способів навивання спіралей шнеків з допомогою методу синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу. Встановлено, що навивання спіралей шнеків може здійснюватись чотирма основними способами при використанні наступного формувального інструменту: оправа і ролик (класичні варіанти); оправа і обертова формувальна втулка; ролик і обертова формувальна втулка; оправа, ролик і обертова формувальна втулка. На основі проведеного синтезу отримано значну кількість раціональних способів навивання спіралей шнеків, на ряд з яких отримано патенти на корисну модель, а на частину з яких подано заявки на винахід.

Ключові слова: *спіраль, шнек, морфологічний аналіз, навивання, метод, синтез, формоутворення.*

Постановка проблеми. Ефективність розвитку економіки напряму пов’язана із розвитком машинобудування, яке забезпечує постійний прогрес суспільства і сприяє зростанню продуктивності й ефективності виробництва. Цей розвиток вимагає нових прогресивних технологій, які потребують використання всебічних підходів при їх створенні. Гвинтові елементи є одними із найрозповсюдженіших в різних типах машин і механізмів, тому їх створенню приділяється особлива увага. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень у сфері створення спіралей шнеків, значна складність і висока енергоємність їх виготовлення, підвищені вимоги до конструктивно-технологічних параметрів гвинтових заготовок, їх якості, надійності та довговічності заставляє здійснювати подальший пошук прогресивних способів їх отримання. Тому розроблення нових прогресивних способів навивання спіралей шнеків є актуальним і сприяє отриманню енергоощадних високопродуктивних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пошуком і дослідженням різних способів виготовлення спіралей шнеків (СШ) займались Б.М. Гевко [5, 12, 14], М.І. Пилипець [12, 13], Р.М. Рогатинський [12], В.В. Васильків [4], О.Л. Ляшук [11, 14], А.П. Драган [7], А.Є. Дячун [8], Chris Rorres [15] та інші. Синтезу та обґрунтуванню технічних рішень у машинобудуванні присвячені праці А.В. Андрейчиков [2], Г.С. Альтшуллера [1], В.В. Васильківа [3], Б.М. Кіндрацького [9], Ю.М. Кузнєцова [10] та ін. Проте більшість розроблених методів синтезу є або надто складними для використання в повсякденній практиці, або генерують невиправдано велику кількість ідей, що значно ускладнює процес вибору найбільш раціональних рішень. Тому питанню синтезу нових способів навивання СШ на даний час недостатньо приділено уваги, що дає підґрунтя для подальшого дослідження та пошуку прогресивних технологій.

Мета роботи. Синтез нових способів навивання спіралей шнеків методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу.

Реалізація роботи. Сучасна теорія і практика формоутворення СШ навиванням пропонує основні способи виготовлення шляхом навивання полоси на різні види оправ з підтисканням до цих оправ полоси роликами різних типів. Ці способи є подібними і відрізняються розташуванням ролика по відношенню до оправи та розташуванням полоси по відношенню до ролика і оправи [3-5, 12].

Здійснюючи пошук нових способів навивання СШ ми постаралися узагальнити існуючі напрацювання в даній сфері і вибудувати певні правила з врахуванням окремих обмежень. Для цього ми провели кодування поверхонь СШ при навиванні: ліва бічна – Л; права бічна – П; зовнішня – З; внутрішня – В. Правила при навиванні СШ, специфіка формувального інструменту та їх кодування наступні:

1. Контакт формувального інструменту із предметом праці (полоса чи спіраль): точковий (лінійний, кодування Т); по площині (поверхневий, кодування М).

© Гевко Ів.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А.

2. Кількість базових задіяних поверхонь в процесі навивання, без яких не пройде формоутворення спіралі: 3 (Л, П, З) або 4 (Л, П, З, В).

3. Навивання: щільним пакетом (кодування Щ) або на крок (кодування К).

4. Формувальний інструмент (оправа, ролик, обертова втулка):

а) для всіх видів формувального інструменту:

- профіль формувальної поверхні: циліндрична поверхня (кодування r); конічна поверхня (кодування t); еліпсоподібна поверхня (кодування h); фігурна поверхня (кодування u);

- напрям руху: рухомий в осьовому напрямі (кодування b); нерухомий в осьовому напрямі (кодування m);

б) оправа (кодування О): гладкий вал (кодування q); різьбовий вал (кодування w); зі спіральною опорою (кодування s);

в) ролик (кодування Р):

- розташування: паралельне оправі чи обертовій втулці (кодування g); перпендикулярне оправі чи обертовій втулці (кодування z); нахилене до оправи чи до обертової втулки (кодування v);

- формувальна поверхня: одноступінчата (кодування e); двоступінчата (кодування o); із внутрішнім пазом (кодування x);

г) обертова втулка (кодування Ф: формоутворення зовнішньої З і притиск бічною стороною правої бічної П поверхонь СШ);

д) опорна (кодування У) і кріпильна (кодування І) втулки (використовуються тільки при використанні обертової втулки): опорна рухома в радіальному напрямі (кодування d), а кріпильна рухома в радіальному (кодування d) та осьовому (кодування b) напрямах; опорна повністю нерухома (кодування n), а кріпильна рухома в радіальному (кодування d) та осьовому (кодування b) напрямах; опорна рухома в радіальному (кодування d) та осьовому (кодування b) напрямах, а кріпильна рухома в радіальному (кодування d) напрямі.

Метою проведення синтезу конструктивних ознак та елементів процесу навивання СШ методом ієрархічного групування за допомогою морфологічного аналізу [6] є здешевлення процесу і отримання конструкцій з покращеними техніко-економічними характеристиками. Цей метод дозволяє проведення генерації альтернатив на окремих ієрархічних рівнях і в межах окремих конструктивних елементів, що забезпечує отримання найбільш раціональних конструктивних рішень при економії витрат зусиль та часу. В таблицю 1 включено конструктивні ознаки та необхідні елементи, що використовуються при навиванні СШ. Зокрема такі, як використовуваний формувальний інструмент, його тип, кількість і розташування, напрям руху (кодування Н), форма заготовки (кодування К).

Таблиця 1

Морфологічна таблиця конструктивних ознак та елементів процесу навивання спіралей шнеків

1. Оправа, О	Ролик, Р			5. Обертова втулка, Ф	6. Опорна втулка, У	7. Кріпильна втулка, І	8. Рухомість формувального інструменту	9. Профіль формоутворюючої поверхні	10. Напрям руху системи, Н	11. Форма заготовки, К
	2. Розташування	3. Формувальна поверхня	4. Кількість							
1.1. Гладкий вал з кріпильним вузлом, q	2.1. Паралельне оправі чи обертовій втулці, g	3.1. Одноступінчата, e	4.1. 1	5.1. Є	6.1. Рухома в радіальному (d) та осьовому (b) напрямах	7.1. Рухома в радіальному (d) та осьовому (b) напрямах	8.1. Рухомий в осьовому напрямі, b	9.1. Циліндрична поверхня, r	10.1. У ліво, <	11.1. З вирізами по внутрішній формоутворюючій поверхні
1.2. Різьбовий вал, w	2.2. Перпендикулярне оправі чи обертовій втулці, z	3.2. Двоступінчата, o	4.2. 2		6.2. Рухома в радіальному напрямі, d	7.2. Рухома в радіальному напрямі, d	8.2. Нерухомий в осьовому напрямі, m	9.2. Конічна поверхня, t	10.2. У право, >	11.2. З вирізами по зовнішній формоутворюючій поверхні
1.3. Зі спіральною опорою, s	2.3. Нахилене до оправи чи до обертової втулки, v	3.3. З пазом, x	4.3. Більше 2, N		6.3. Повністю нерухома, n			9.3. Еліпсна поверхня, h		11.3. Фігурна
								9.4. Фігурна поверхня, u		11.4. Кругла
										11.5. Прямокутна
										11.6. Квадратна

Слід також відзначити, що точковий (лінійний, кодування Т) контакт формувального інструменту із предметом праці (полоса чи спіраль) притаманний усім видам роликів, а контакт по площині (поверхневий, кодування М) формувального інструменту із предметом праці притаманний оправам, обертовим, опорним і кріпильним втулкам. Розташування ролика у верхній чи нижній частині зоні приспособи визначає розташування полоси при навиванні.

Також слід враховувати те, що наявне обладнання, яке найчастіше використовується при навиванні (як правило верстати токарної групи), має нерухому ліву частину в осьовому напрямі (шпиндель). Крім того, необхідно зазначити, що опорна і кріпильна втулки використовуються при навиванні лише обертовими втулками, при навиванні СШ лише роликами обов'язково використовуються оправи, а при використанні у якості формувального інструменту обертових втулок оправи можуть бути присутніми чи відсутніми. Також можна використовувати у якості формувального інструменту одночасно обертові втулки та ролики з і без оправ. Тому при генерованні варіантів способів навивання спіралей шнеків будемо враховувати дані обмеження.

Морфологічну модель (табл. 1) можна представити у вигляді морфологічної матриці, що утворена шляхом числового позначення відповідних альтернатив розміщених у морфологічній таблиці [10]:

$$N = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \ldots \cdot K_j = \prod_{j=1}^{n} K_j \,, \tag{1}$$

$$N_{\tilde{n}\acute{\imath}} = \begin{vmatrix} 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ 2.3 & 3.3 & 4.3 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 5.1 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 6.1 \\ 6.2 \\ 6.3 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 7.1 \\ 7.2 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 8.1 \\ 8.2 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 9.1 \\ 9.2 \\ 9.3 \\ 9.4 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 10.1 \\ 10.2 \end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix} 11.1 \\ 11.2 \\ 11.3 \\ 11.4 \\ 11.5 \\ 11.6 \end{vmatrix} = 46656 \,. \tag{2}$$

При використанні запропонованого методу синтезу ієрархічних груп з розбивкою їх на підгрупи за допомогою морфологічного аналізу кількість варіантів є значно меншою і визначається по формулі [14]:

$$N_1 = \sum_{z=1}^{l} \sum_{x=1}^{q} \prod_{i=1}^{m} K_i \,, \tag{3}$$

де z – ієрархічний рівень; l – кількість ієрархічних рівнів; x – певна підгрупа відповідного ієрархічного рівня; q – кількість підгруп відповідного ієрархічного рівня; K_i – альтернатива конструктивної ознаки елементу певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня; m – кількість альтернатив конструктивної ознаки елементів певної підгрупи відповідного ієрархічного рівня.

Враховуючи накладені обмеження розроблено синтезовану модель конструктивних ознак та елементів процесу навивання СШ ієрархічним групуванням за допомогою морфологічного аналізу:

I(1)1_1, I(1)1_2, I(1)1_3
I(1)2_1, I(1)2_2, I(1)2_3
I(1)3_1, I(1)3_2, I(1)3_3
I(1)8_1, I(1)8_2

II(1)1_1, II(1)1_2, II(1)1_3
II(1)5_1
II(1)6_1, II(1)6_2, II(1)6_3
II(1)7_1, II(1)7_2
II(1)8_1, II(1)8_2

III(1)2_1, III(1)2_2, III(1)2_3
III(1)3_1, III(1)3_2, III(1)3_3

III(1)4_1, III(1)4_2, III(1)4_3

III(1)5_1

III(1)7_1, III(1)7_2

III(1)8_1, III(1)8_2

IV(1)1_1, IV(1)1_2, IV(1)1_3

IV(1)2_1, IV(1)2_2, IV(1)2_3

IV(1)3_1, IV(1)3_2, IV(1)3_3

IV(1)5_1

IV(1)6_1, IV(1)6_2, IV(1)6_3

IV(1)7_1, IV(1)7_2

II(1)8_1, II(1)8_2

I(2)9_1, I(2)9_2, I(2)9_3, I(2)9_4

II(2)10_1, II(2)10_2

III(2)11_1, III(2)11_2, III(2)11_3, III(2)11_4, III(2)11_5, III(2)11_6

Так до I підгрупи 1 ієрархічного рівня (формувальний інструмент О + Р) віднесено ознаки та елементи процесу 1, 2, 3 і 8; до II підгрупи (формувальний інструмент О + Ф) ознаки та елементи процесу 1, 5, 6, 7 і 8; до III підгрупи (формувальний інструмент Р + Ф) ознаки та елементи процесу з 2 по 5 і 7 та 8; до IV підгрупи (формувальний інструмент О + Р + Ф) ознаки та елементи процесу з 1 по 3 і з 5 по 8. До I підгрупи 2 ієрархічного рівня віднесено ознаку 9, до II підгрупи ознаку 10, а до III підгрупи ознаку 11. Кількість згенерованих альтернатив при використанні даного методу буде меншим у 87 разів у порівнянні з кількістю згенерованих альтернатив при використанні традиційного методу:

$$N_{\tilde{n}\acute{i}1} = \begin{vmatrix}1.1\\1.2\\1.3\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}2.1 & 3.1\\2.2 & 3.2\\2.3 & 3.3\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}8.1\\8.2\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}1.1\\1.2\\1.3\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}5.1\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}6.1\\6.2\\6.3\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}7.1\\7.2\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}8.1\\8.2\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}2.1 & 3.1 & 4.1\\2.2 & 3.2 & 4.2\\2.3 & 3.3 & 4.3\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}5.1\end{vmatrix} \cap$$

$$\cap \begin{vmatrix}7.1\\7.2\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}8.1\\8.2\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}1.1\\1.2\\1.3\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}2.1 & 3.1\\2.2 & 3.2\\2.3 & 3.3\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}5.1\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}6.1\\6.2\\6.3\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}7.1\\7.2\end{vmatrix} \cap \begin{vmatrix}8.1\\8.2\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}9.1\\9.2\\9.3\\9.4\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}10.1\\10.2\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}11.1\\11.2\\11.3\\11.4\\11.5\\11.6\end{vmatrix} = 534.$$

Використовуючи окремі підгрупи окремих ієрархічних рівнів зазначеного методу синтезу було згенеровано різні варіанти способів навивання СШ, загальні конструктивні схеми яких представлено в табл. 2. В позначеннях конструктивних схем використовувалась розроблена схема кодування, окрім форма заготовки «К», бо для спрощення сприйняття на рисунках зображались лише заготовки прямокутної форми. Крім того, в позначеннях конструктивних схем використання одного ролика не нумерувалося, а якщо вони різні, то розташування у верхній частині позначалося в записі першим, а усіх інших (перелік проводився за годинниковою стрілкою) наступними.

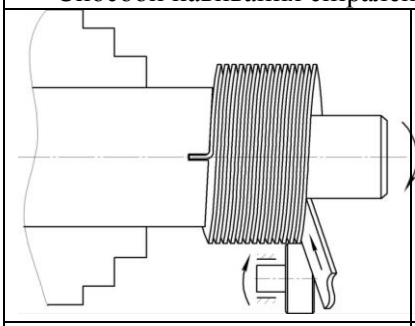
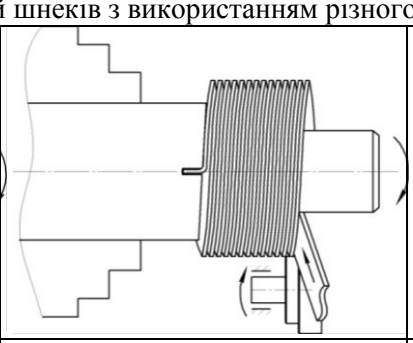
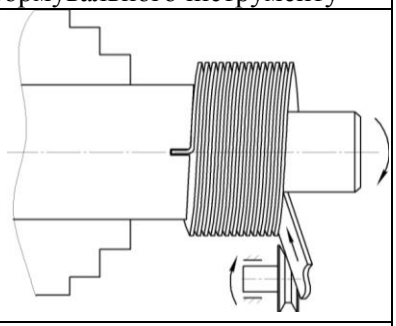
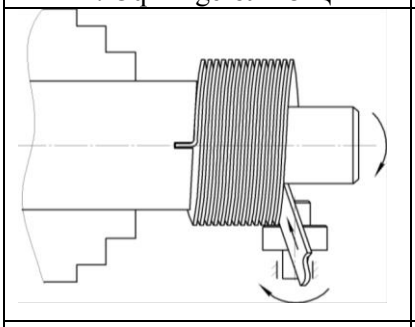
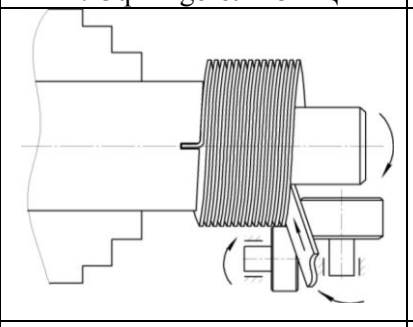
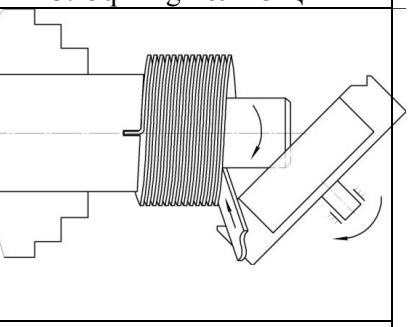
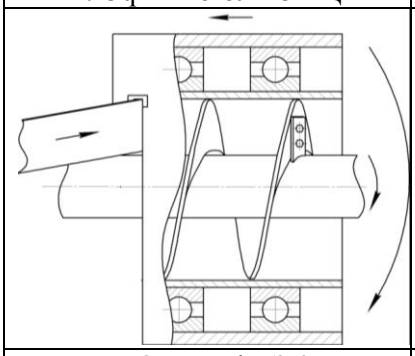
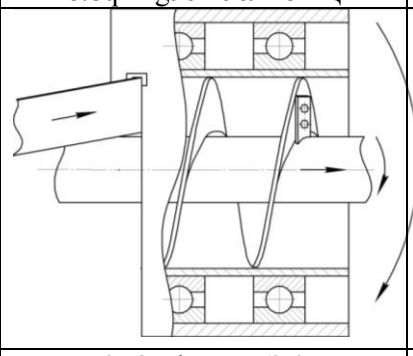
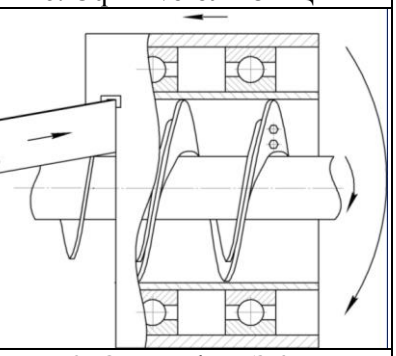
Як видно з таблиці 2, значна кількість схем способів навивання СШ є непрацездатними або нераціонально ускладненими. Схеми з 1 по 6 є класичними і широко використовуються на практиці. Схеми, в яких використовується при навиванні у якості формоутворюючих лише одна

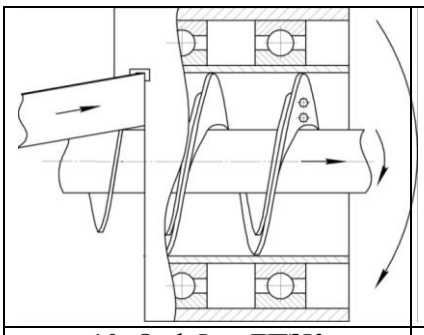
(З) або дві сторони заготовки (П, З і В), а саме 7, 8, 11,12, 15, 16, 19, 20, 27, 30, 34, 35, 36 є непрацездатними, бо не забезпечують підпори навитого витка спіралі і недопущення його нахилу. Значна кількість схем, в яких використовується рух в осьовому напрямі оправки, є неконструктивними, бо, як правило, оправка закріпляється в патроні токарного верстату і може здійснювати обертання лише в радіальному напрямі (схеми 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 34, 35, 36). Спосіб навивання, зображений на схемі 24, при його реалізації буде викликати значне тертя по поверхнях, тому також є неконструктивним. Схеми, в яких використовується різне розташування роликів по відношенню до обертової формувальної втулки (32, 33), також не є конструктивним.

Відповідно, шляхом критичного аналізу і виключення непрацездатних та неконструктивних схем було отримано значну кількість раціональних варіанти способів навивання СШ з використанням обертових формувальних втулок, на ряд з яких отримано патенти на корисну модель [6], а на частину з яких подано заявки на винахід. Загалом можна констатувати, що способи навивання СШ з використанням обертових формувальних втулок значно розширюють можливості навивання СШ і забезпечують отримання різних видів СШ, в тому числі широкополосних, з наклепом по зовнішній кромці, з фасонною внутрішньою поверхнею тощо.

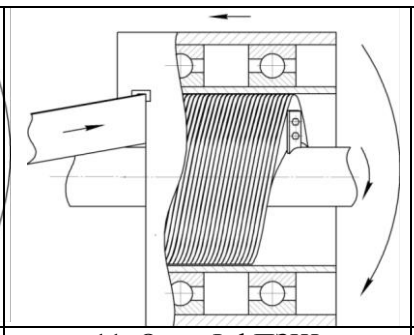
Таблиця 2

Згенеровані варіанти способів навивання спіралей шнеків

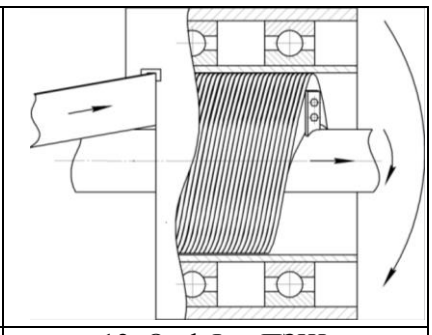
Способи навивання спіралей шнеків з використанням різного формувального інструменту		
		
1. OqrmPgerbЛВЗЩ>	2. OqrmPgorbЛПЗВЩ>	3. OqrmPgxrbЛВЗЩ>
		
4. OqrmPzorbЛПЗВЩ>	5.OqrmPgerbPzerbЛПЗВЩ>	6. OqrmPvorbЛПЗВЩ>
		
7. OqrmФrbПЗК<	8. OqrbФrmПЗК>	9. OsrmФrbЛПЗК<



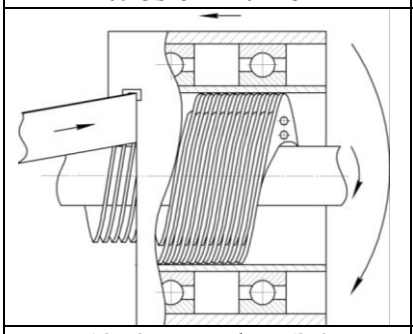
10. OsrbФrmЛПЗК>



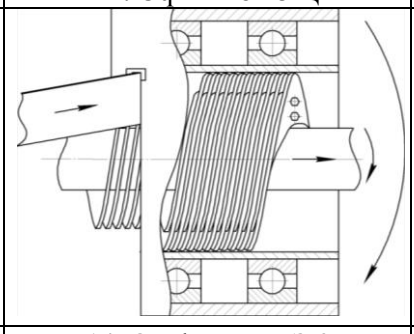
11. OqrmФrbПЗЩ<



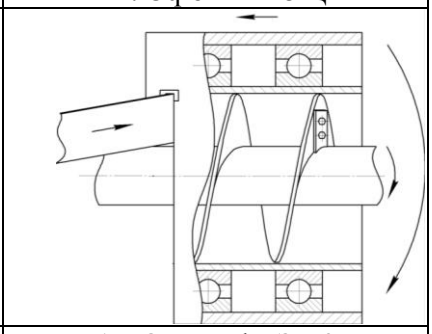
12. OqrbФrmПЗЩ>



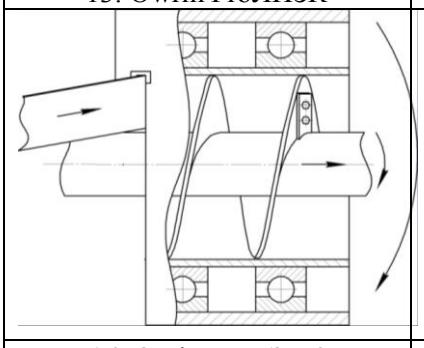
13. OwrmФrbЛПЗК<



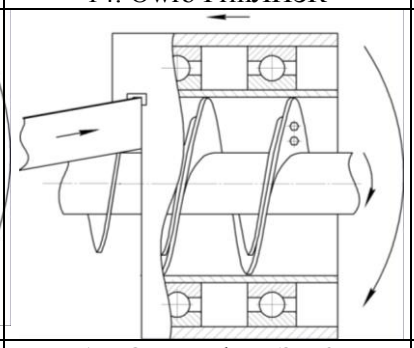
14. OwrbФrmЛПЗК>



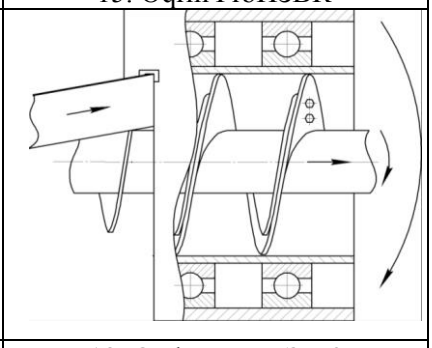
15. OqrmФrbПЗВК<



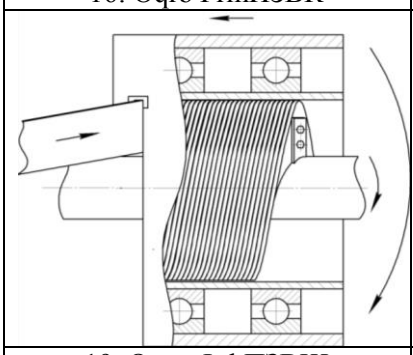
16. OqrbФrmПЗВК>



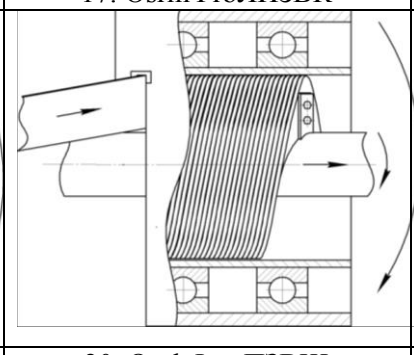
17. OsrmФrbЛПЗВК<



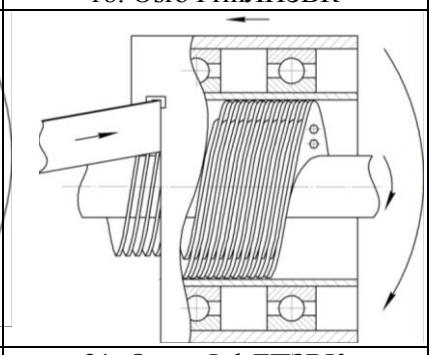
18. OsrbФrmЛПЗВК>



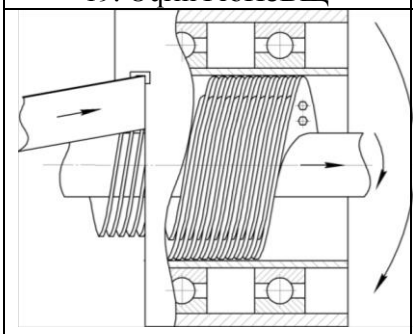
19. OqrmФrbПЗВЩ<



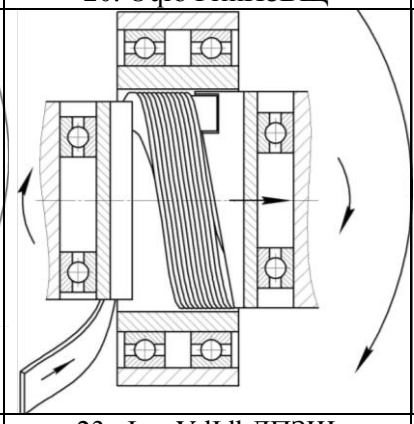
20. OqrbФrmПЗВЩ>



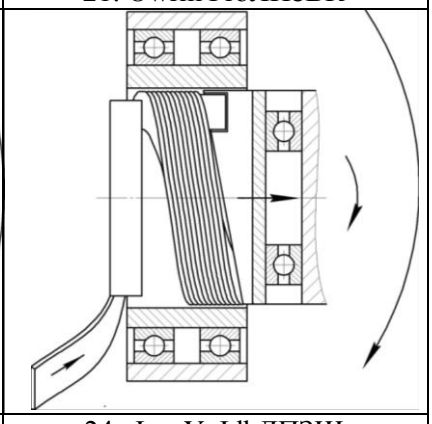
21. OwrmФrbЛПЗВК<



22. OwrbФrmЛПЗВК>

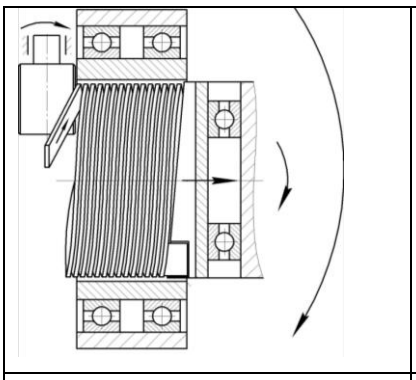


23. ФrmУdIdbЛПЗЩ>

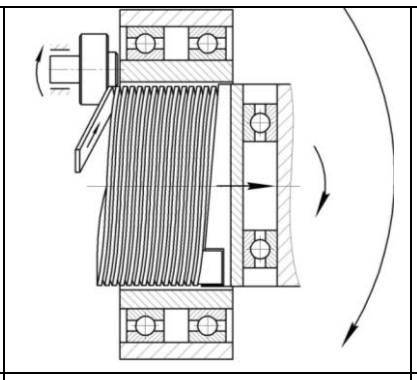


24. ФrmУnIdbЛПЗЩ>

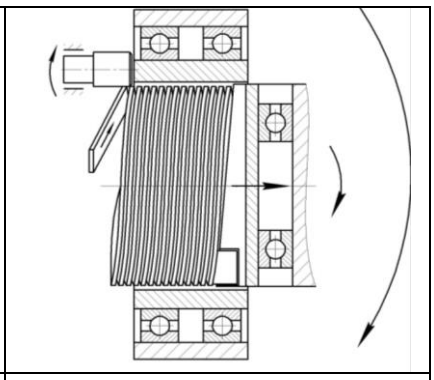
© Гевко Ів.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А.



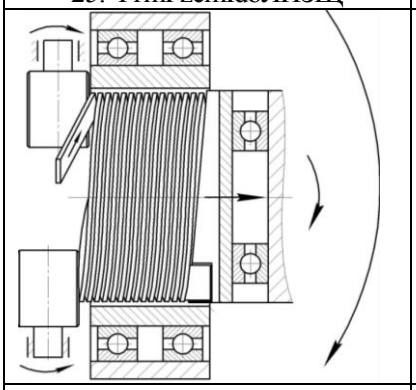
25. ФrmPzemIdbЛПЗЦ>



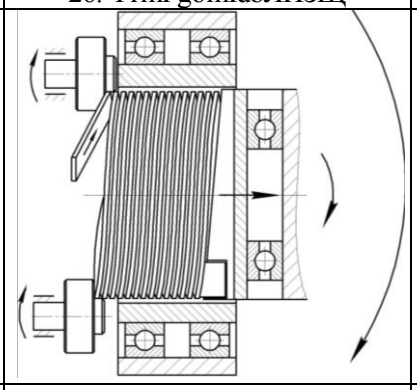
26. ФrmPgomIdbЛПЗЦ>



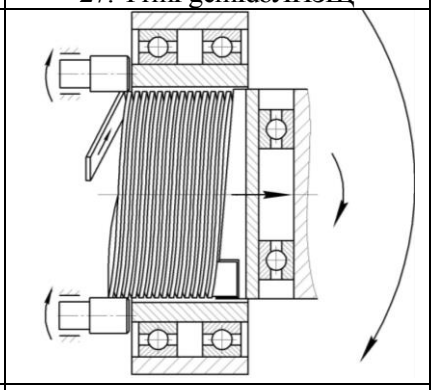
27. ФrmPgemIdbЛПЗЦ>



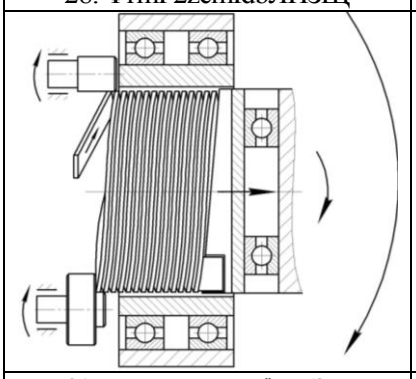
28. ФrmP2zemIdbЛПЗЦ>



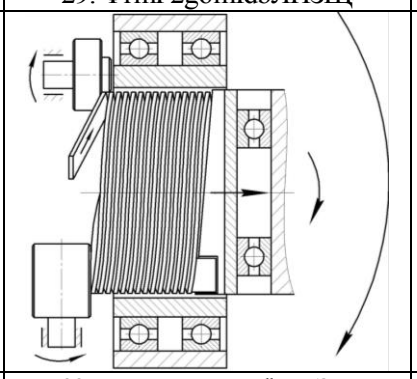
29. ФrmP2gomIdbЛПЗЦ>



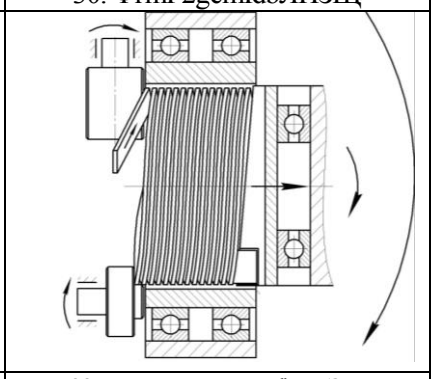
30. ФrmP2gemIdbЛПЗЦ>



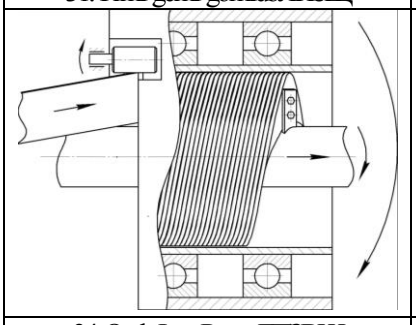
31.ФrmPgemPgomIdbЛПЗЦ>



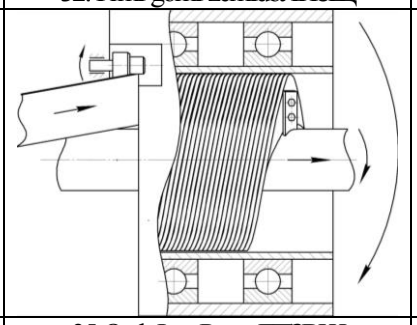
32.ФrmPgomPzemIdbЛПЗЦ>



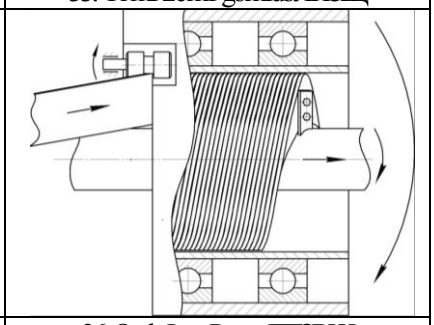
33.ФrmPzemPgomIdbЛПЗЦ>



34.OqrbФrmPgemЛПЗВЦ>



35.OqrbФrmPgomЛПЗВЦ>



36.OqrbФrmPgxmЛПЗВЦ>

Висновки. В результаті проведеного дослідження встановлено, що навивання спіралей шнеків може здійснюватись чотирма основними способами за використання наступного формувального інструменту: оправа і ролик (класичні варіанти); оправа і обертова формувальна втулка; ролик і обертова формувальна втулка; оправа, ролик і обертова формувальна втулка. Можна констатувати, що способи навивання спіралей шнеків з використанням обертових формувальних втулок значно розширюють можливості навивання спіралей шнеків і забезпечують отримання різних видів спіралей шнеків, в тому числі широкополосних, з наклепом по зовнішній кромці, з фасонною внутрішньою поверхнею тощо.

© Гевко Ів.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А.

Інформаційні джерела

1. Альтшуллер Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач / Г. С. Альтшуллер. – Новосибирск : Наука, 1986. – 209 с.

2. Андрейчиков А. В. Интеллектуальный метод синтеза технологических инноваций / А. В. Андрейчиков // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 2003. – №10. – С. 47-62.

3. Васильків В. Синтез схем формоутворення гвинтових заготовок / В.Васильків // Обробка матеріалів тиском. – №1(22) – 2010. – С. 167 –173.

4. Васильків В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08 / Василь Васильович Васильків; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». – Львів, 2015. – 312 с.

5. Гевко Б. М. Технология изготовления спиралей шнеков / Б. М. Гевко. – Львов : Вища школа, 1986. – 128 с.

6. Гевко Ів. Синтез способів навивання гвинтових заготовок / Вісник ТНТУ // Ів. Гевко, О. Катрич – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – Том 80. – № 4. – Ст. 153-160.

7. Драган А.П. Теоретичні передумови технологічного процесу виготовлення гвинтових гофрованих заготовок: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Драган Андрій Петрович; Тернопільський держ. техн. ун-т ім. І. Пулюя. – Т., 2007. – 198 с.

8. Дячун А.Є. Обґрунтування параметрів технологічного процесу виготовлення профільних гвинтових заготовок: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Дячун Андрій Євгенович; ТДТУ ім. І. Пулюя. – Т., 2008. – 208 с.

9. Кіндрацький Б. І. Концепція і алгоритм багатокритеріального структурно-параметричного синтезу машинобудівних конструкцій / Б. І. Кіндрацький // Вісник ТДТУ. – 2003. – Т. 8. – № 1. – С. 73–82.

10. Кузнєцов Ю.М. Прогнозування розвитку технічних систем / Ю.М. Кузнєцов, Р.А. Скляров // Під ред. Ю. М. Кузнєцова. – ТОВ «ЗПОК» – ПП «ГНОЗИС», 2004. – 323 с.

11. Ляшук О.Л. Технологічне забезпечення виготовлення деталей типу тіл обертання з профільного прокату: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Ляшук Олег Леонтійович; Тернопільський державний технічний університет. – Тернопіль, 2006. – 21 с.

12. Механізми з гвинтовими пристроями / [Б.М. Гевко, М.Г. Данильченко, Р.М. Рогатинський та ін.]. – Львів : Світ, 1993. – 208 с.

13. Пилипець М.І. Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин: дис... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Михайло Ількович Пилипець; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». – Львів, 2002. – 445 с.

14. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей / [Б. М. Гевко, О. Л. Ляшук, І. Б. Гевко та ін.]. – Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 367 с.

15. Chris Rorres. The turn of the screw: optimal design of an Archimedes screw/ Jornal of hydrauling/ January 2000. P 72-80.

Гевко Ив.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А.
Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя

СИНТЕЗ СПОСОБОВ НАВИВКИ СПИРАЛЕЙ ШНЕКОВ

Для поиска новых способов навивки спиралей шнеков обобщены существующие наработки и построено правила навивки спиралей шнеков с учетом ограничений. Проведено кодирование конструктивных признаков и отдельных элементов, используемых при навивании спиралей шнеков. Выполнен синтез способов навивки спиралей шнеков с помощью метода синтеза иерархических групп с помощью морфологического анализа. Установлено, что навивки спиралей шнеков может осуществляться четырьмя основными способами при использовании следующего формовочного инструмента: оправа и ролик (классические варианты) оправа и вращающаяся формовочная втулка; ролик и вращающаяся формовочная втулка; оправа, ролик и вращающаяся формовочная втулка. На основе проведенного синтеза получено значительное количество рациональных способов навивки спиралей шнеков, на ряд из которых получены патенты на полезную модель, а на часть из которых поданы заявки на изобретение.

Ключевые слова: *спираль, шнек, морфологический анализ, навивки, метод, синтез, формообразования.*

© Гевко Ів.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А.

Iv. Hevko, V. Hud, A . Kruglik
Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University

SYNTHESIS OF THE SPIRAL CREWS COILING METHODS

To search for new methods of coiling spiral screw summarizes current developments and constructed by coiling spiral crew rules with regard to restrictions. The encoding of constructive features and individual elements used when screwing spirals is conducted. The synthesis methods coiling spiral screw using the method of synthesis of hierarchical groups using morphological analysis were carried out. It has been established that the screw spiral can be driven by four main methods with the use of the following molding tool: a rim and a roller (classical variants); frame and rotary molding bushing; roller and rotary molding bushing; frame, roller and rotating molding bushing. On the basis of the conducted synthesis, a considerable number of rational methods of coiling the screw spirals have been obtained, a number of which have received patents for the utility model, and some of them have been applied for the invention.

Keywords: *spiral, screw, morphological analysis, coiling, method, synthesis, formation.*

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018.

© Гевко Ів.Б., д.т.н., проф., Гудь В.З., к.т.н., Круглик О.А.

УДК 004.932.2
Глухова Н.В.[1], Пісоцька Л.А.[2]
[1]ДВНЗ «Національний гірничий університет»
[2]ДВНЗ «Дніпропетровська медична академія МОЗ України»

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ КОЛЬОРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ГАЗОРОЗРЯДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Сучасне апаратне забезпечення інформаційно-вимірювальних технологій дозволяє широке впровадження методів вимірювань, заснованих на реєстрації, перетворенні, аналізі зображень. Однак без відповідних методів аналізу зображень, що є основою для створення алгоритмічного та програмного забезпечення вилучення інформативних ознак зображень, неможливо вирішення задач вимірювань. У статті запропонований метод аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання об'єктів, розташованих у зовнішньому електромагнітному полі. Метод базується на процедурі побудови трьох гістограм та дозволяє виконувати кількісну оцінку геометричних та фотометричних ознак зображень. При параметризації зображень оцінюються максимальні амплітуди гістограм, їх координати, за допомогою пікового детектору досліджуються характерні ознаки форми огинаючої гістограми. Запропонований метод аналізу може використовуватися для оцінки психофізіологічного стану людини.

Ключові слова: *інформаційно-вимірювальні технології, газорозрядне випромінювання, аналіз зображень, гістограма зображення*

На сучасному етапі розвитку інформаційно-вимірювальних технологій широке розповсюдження набувають методи вимірювань, засновані на зборі інформації про досліджуване явище або об'єкт у вигляді візуальних даних. Застосування методів вимірювань, заснованих на отриманні, передачі, обробці, аналізі експериментальних результатів вимірювань у вигляді зображень гальмувалося недостатнім розвитком як апаратних, так і програмних засобів для забезпечення подібних операцій з великими масивами даних. Зображення потенційно містить у собі значно більшу кількість інформації у порівнянні з експериментальним отриманням лише окремих числових значень при вимірюванні фізичних величин, які характеризують об'єкт вимірювань. Тому розробка та удосконалення інформаційно-вимірювальних технологій, що передбачають аналіз зображень досліджуваних об'єктів є актуальною науковою задачею.

Метод газорозрядного випромінювання набув широкого практичного застосування у технічній та медичній галузях. В техніці він застосовується для неруйнівного контролю [1], дослідження складу речовин [2-4] та ін. Сутність методу полягає у реєстрації на фоточутливому матеріалі газорозрядного випромінювання досліджуваного об'єкту, що знаходиться під впливом зовнішнього імпульсного електромагнітного поля. У якості фотоматеріалу може використовуватися як рентгенівська, так і фотоплівка.

Відомі також варіанти реалізації методу, які засновані на використанні цифрових фото або відео камер [5]. Однак з метрологічної точки зору останній варіант має суттєвий недолік, який полягає у необхідності використання значної за обсягом (десятки або навіть сотні) серії імпульсів. Це призводить до того, що під час проведення експерименту досліджуваний об'єкт підпадає під суттєвий вплив зовнішнього електромагнітного поля високої напруженості, що, безумовно, змінює характеристики об'єкту. Дати оцінку невизначеності вимірювань, яка привноситься у такий спосіб фактично неможливо. В результаті остаточна картина газорозрядного випромінювання являє собою суперпозицію декількох вхідних зображень. Тому частина дослідників надає перевагу застосуванню способу отримання зображень газорозрядного випромінювання, який передбачає використання у якості чутливого елементу фотоматеріалу, у тому числі кольорової фотоплівки [6, 7].

На сьогоднішній день запропоновано декілька способів вилучення інформативних ознак, які містяться у півтонових зображеннях газорозрядного випромінювання. Наприклад, оцінка площі засвітки та фрактальної розмірності [8], вейвлет-аналіз [9], фліккер-шумова спектроскопія [10]. Однак способів кількісної оцінки інформативних ознак кольорових зображень фактично не існує, окрім використання стандартних програмних пакетів, які при

© Глухова Н.В.[1], Пісоцька Л.А.[2]

вирішенні даної задачі мають ряд обмежень. Аналіз кольорових зображень переважно виконується людиною-експертом, тому має неточний та суб'єктивний характер.

Метою даної наукової роботи є розробка способу аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання об'єктів, який забезпечує виділення та надання кількісної оцінки інформативних ознак зображень з урахуванням кольорової гами.

При розташуванні досліджуваного об'єкту в електромагнітному полі відбувається плазмове світіння на поверхні зразка. У повітряному прошарку між електродом та об'єктом під впливом зовнішнього електромагнітного поля відбувається поляризація та іонізація молекул, які входять до складу оточуючого повітря. Виникнення газового розряду протікає завдяки вільним електронам, які відділяються від молекул кисню, азоту та двоокису вуглецю. При цьому форма, фотометричні ознаки (яскравість та потужність) випромінювання залежать насамперед від властивостей об'єкта. Випромінювання, яке реєструється на фотоматеріалі, складається з дискретних квантів світла, тобто фотонів. Вони утворюються завдяки процесам переходу електронів на більш високі енергетичні рівні з початкових низьких. Енергія цих переходів залежить як від величини впливу зовнішнього електричного поля між електродами, так і від параметрів об'єкту в ньому розташованого. Відбувається випромінювання у видимому діапазоні, а також в ультрафіолетовому та інфрачервоному.

На першому етапі досліджень отримують кольорові зображення досліджуваного об'єкту на кольоровій фотоплівці. На другому етапі виконується процедура аналого-цифрового перетворення зображень шляхом сканування. Третій етап полягає у виконанні комп'ютерного аналізу зображень за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення.

В основу розробленого методу аналізу кольорових зображень покладена відома стандартна процедура розкладання зображення на RGB компоненти. У подальшому пропонується аналіз кожної з трьох складових на основі параметризації інформативних ознак гістограм відповідних кольорів. Даний метод передбачає наступні кроки:

1. Розрахунок максимальних значень амплітуд для кольорів гістограм.
2. Визначення координат, які відповідають максимальним амплітудам.
3. Визначення найбільшої з трьох максимальних амплітуд.
4. Порівняльний аналіз максимальних амплітуд для різних кольорів, який полягає у розрахунку відношень двох менших амплітуд до найбільшої амплітуди.
5. Кількісна оцінка «гребінчастості» гістограм для кожного з трьох кольорів, яка дорівнює кількості екстремумів відповідного графіку. Цей параметр визначається на базі застосування програмного пікового детектору за встановленим порогом та дозволяє досліджувати форму огинаючої гістограми.

Інтерфейс користувача прикладної програми представлений на рис. 1. та 2.

Описаний вище метод аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання об'єктів в електромагнітному полі та виділені базові кількісні параметри можуть використовуватися при розв'язанні широкого кола практичних завдань. Фактично, оскільки даний метод має принципово порівняльний характер, задача аналізу зображень зводиться до вирішення завдання класифікації, тобто розбиття вхідної сукупності зображень випромінювання на певні групи за встановленою ознакою.

Наприклад, розглянемо конкретну прикладну задачу, яка полягає у дослідженні психофізіологічних параметрів людини. На основі обробки великої кількості експериментальних даних було доведено кореляційний зв'язок між фотометричними параметрами кольорових зображень газорозрядного випромінювання пальців людини та двома типами енергетичної активності – рефлекторної та ментальної.

Для розв'язання завдання класифікації за вказаними двома типами було використано наступні інформативні ознаки RGB гістограм зображень:

а) максимальні значення (глобальний екстремум) амплітуд для кольорів гістограм;

б) відносна кількість для першого (наступного за глобальним) локального максимуму.

© Глухова Н.В.[1], Пісоцька Л.А.[2]

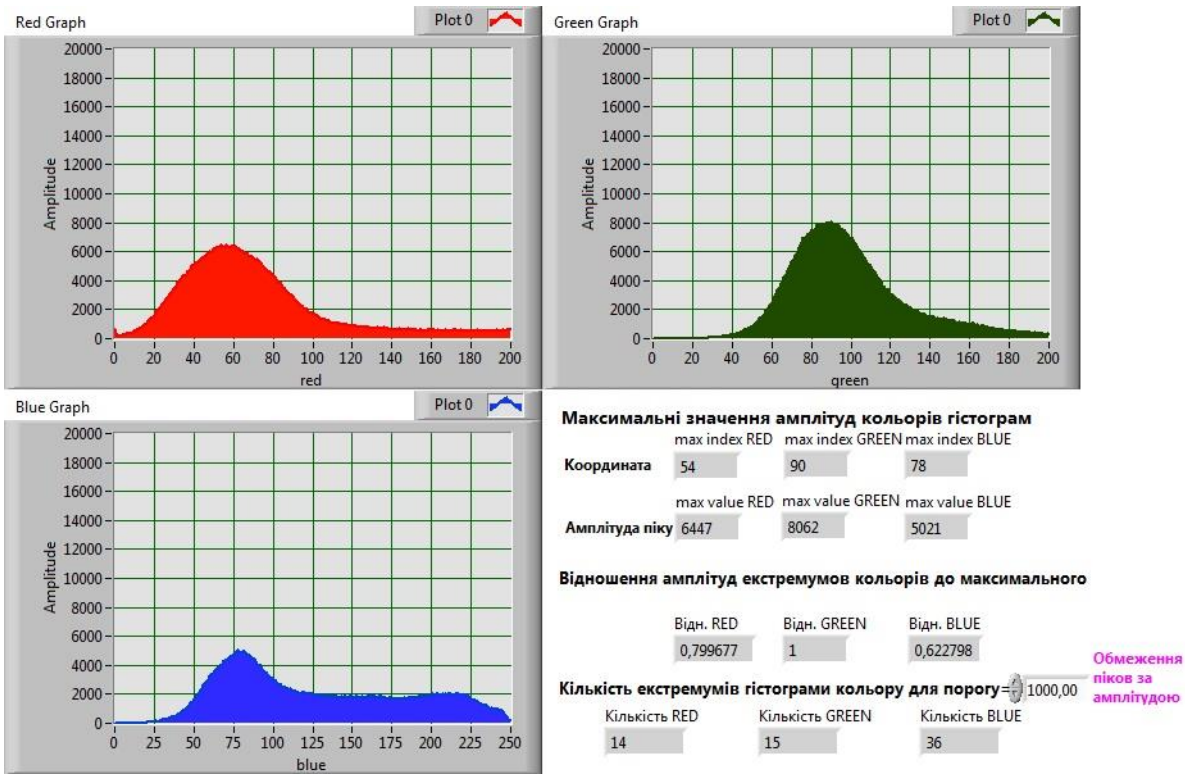


Рис. 1. Інтерфейс користувача для аналізу кольорових гістограм (об’єкт №1)

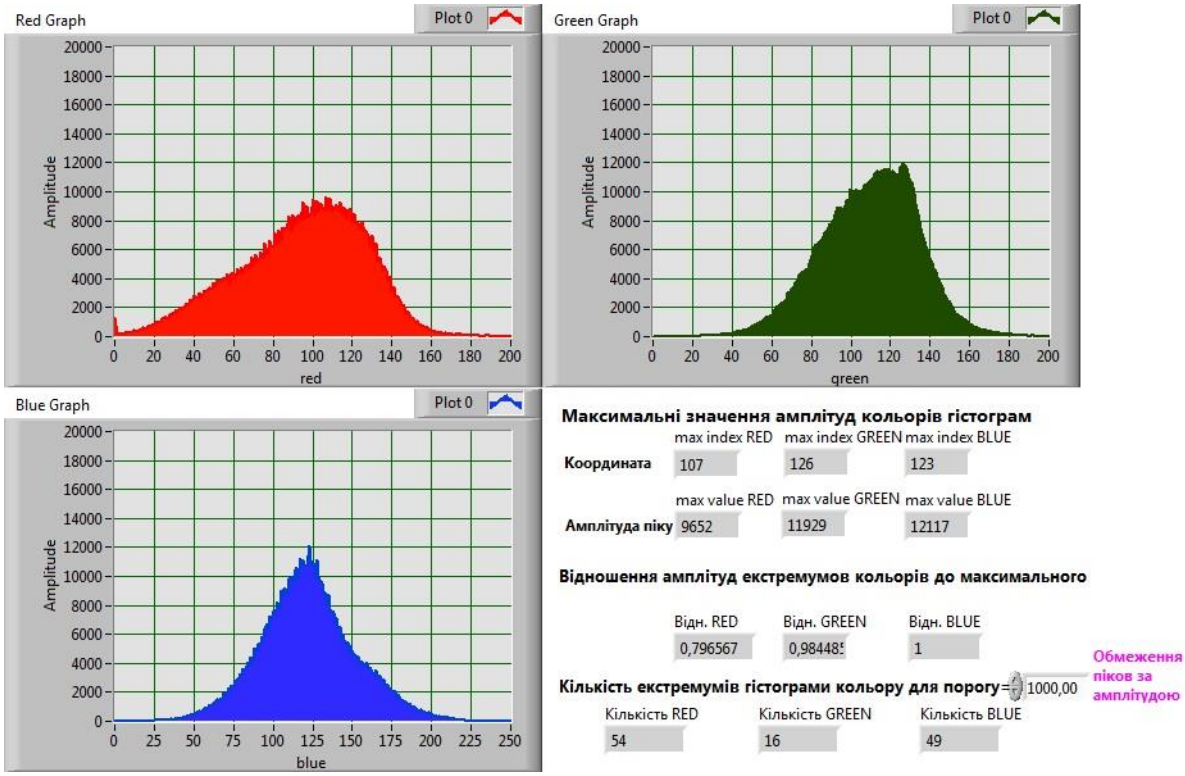


Рис. 2. Інтерфейс користувача для аналізу кольорових гістограм (об’єкт №2)

Висновки. Для ефективного застосування сучасних методів вимірювань, заснованих на реєстрації та обробці зображень, необхідна розробка відповідного алгоритмічного та програмного забезпечення. У роботі представлено інформаційну технологію для аналізу кольорових зображень, засновану на використанні гістограм червоного, синього та зеленого кольорів, яка дозволяє кількісно оцінити характерні інформативні ознаки зображень. Запропонований метод знайшов практичне застосування при обробці експериментальних даних з метою оцінки психофізіологічного стану людини.

© Глухова Н.В.[1], Пісоцька Л.А.[2]

Інформаційні джерела

1. Романий С.Ф. Неразрушающий контроль материалов по методу Кирлиана / С.Ф. Романий, З.Д. Черный. – Днепропетровск: изд-во ДГУ, 1991. – 144 с.
2. Крыжановский Э.В. Метод контроля жидкофазных объектов на основе газоразрядной визуализации: дис. … канд. техн. наук: 05.11.13 / Э.В. Крыжановский. – СПб, 2003. – 203 с.
3. Skarja M., Berden M., Papuga P., Jerman I. Influence of ionic composition of water on the corona discharge around water drops.- J. of Applied Physics, 1998, vol.84, N5, p.2436-2560.
4. Kmecl P. Microwave electromagnetic field affects the corona discharge pattern of water / P Kmecl, I Jerman, M Škarja - Electro- and Magnetobiology.- 2000. – V.19. - #2. – PP.135-148.
5. Korotkov K. Time dynamics of Gas Discharge around the drops of liquids / K. Korotkov, D. Korotkin, E. Krizhanovky, M. Borisova // New Human Energy Field. Backbone Publishing. - NJ, 2002. - P. 143-154.
6. Ignatov I. Color Kirlian Spectral Analysis. Color Observation with Visual Analyzer / I. Ignatov, M. Marinov. - Hanover: Euromedica, 2008. - 36 p.
7. Zellner A. Energy, Color Kirlan Analysis of Ignat Ignatov / A. Zellner // Die Ingenieurin. - 2009. - № 89. - P. 23-29.
8. Коломієць Р.О. Біотехнічна система на основі ефекту Кірліан для аналізу рідиннофазних об’єктів: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.11.17 / Р.О. Коломієць. – Вінниця, 2011. – 19 с.
9. Glukhova N.V. Application of wavelets transform for analysis of images of gas-discharge radiation of water / N.V. Glukhova, L.A. Pesotskaya, N.G. Kuchuk, J.N. Kharlamova // Системи обробки інформації. – 2016. – № 2(139). – С. 179-185.
10. Глухова Н.В. Автоматизация обработки изображений излучения жидкофазных объектов с использованием методологии фликкер-шумовой спектроскопии / Н.В. Глухова, В.И. Корсун, Л.А. Песоцкая // Метрологія та прилади. – 2013. – №2 (40). – С.59-63.

Глухова Н.В.[1], Песоцкая Л.А.[2]
[1]ГВУЗ «Национальный горный университет»
[2]ГВУЗ «Днепропетровская медицинская академия МОЗ Украины»

ИНФОРМАЦОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГАЗОРОЗРЯДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Современное аппаратное обеспечение информационно-измерительных технологий позволяет широкое внедрение методов измерений, основанных на регистрации, преобразовании, анализе изображений. Однако без соответствующих методов анализа изображений, которые являются основой для создания алгоритмического и программного обеспечения извлечения информативных признаков изображений, невозможно решение задач измерений. В статье предложен метод анализа цветных изображений газоразрядного излучения объектов, размещенных во внешнем электромагнитном поле. Метод базируется на процедуре построения трех гистограмм и позволяет выполнять количественную оценку геометрических и фотометрических признаков изображений. При параметризации изображений оцениваются максимальные амплитуды гистограмм, их координаты, при помощи пикового детектора исследуются характерные признаки формы огибающей гистограммы. Предложенный метод анализа может использоваться для оценки психофизиологического состояния человека.

Ключевые слова: *информационно-измерительные технологии, газоразрядное излучение, анализ изображений, гистограмма изображения*

© Глухова Н.В.[1], Пісоцька Л.А.[2]

Glukhova N.V. [1], Pesotskaya L.A. [2]
[1] SE "National Mining University"
[2] SE "Dnipropetrovsk Medical Academy of health Ministry of Ukraine"

INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE ANALYSIS OF THE COLOR IMAGES OF GAS DISCHARGE RADIATION

Modern hardware of information and measurement technologies allows for the wide introduction of measurement methods based on registration, transformation, analysis of images. However, without the appropriate methods of image analysis, which are the basis for creating algorithmic and software for extracting informative parameters of images, it is impossible to solve measurement problems. The method of analysis of color images of gas-discharge radiation of objects placed in an external electromagnetic field is proposed in the article. The method is based on the procedure for constructing three histograms and allows you to perform a quantitative assessment of the geometric and photometric characteristics of images. When parameterizing the images, the maximum histogram amplitudes and their coordinates are estimated, and the characteristic parameters of the form of the histogram envelope are researched using a peak detector. The proposed method of analysis can be used to evaluate a person's psychophysiological state.

Key words: *information-measuring technologies, gas-discharge radiation, image analysis, image histogram*

Стаття надійшла до редакції 20.04.2018

© Глухова Н.В.[1], Пісоцька Л.А.[2]

УДК 621.717-112.6

Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.
Луцький національний технічний університет

ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОДУЛІВ РОБОТИЗОВАНОГО СКЛАДАННЯ

Технологічні складальні роботизовані модулі представляють основу модульних технологій. Описані особливості модульних технологій складання виробів, основи побудови технологічних і конструкційних модулів, що формують технологічні складальні процеси. Розглянуто оптимізаційний підхід при практичному формуванні модулів за визначеними критеріями. На складальних роботах можна швидше і простіше на першій стадії впливати на критерії максимуму складальних рухів. Для цієї мети множини можливих складальних рухів на роботі і необхідних для типового представника групи складальної одиниці компонуються на базі теорії та практики автоматичного складання. Підходами до вирішення цієї проблеми може бути подальший аналіз і синтез зазначених рівнянь множин складальних рухів. Тепер запускаються у виробництво роботи з більшим діапазоном складальних рухів разом з технологічним обладнанням, які мають різну ціну. Існує також ряд складальних одиниць, що вимагають для складання тих чи інших рухів, оскільки області перетину зазначених множин можуть бути досить різноманітними.

Ключові слова: *складання, модулі, технологія, робот.*

Вступ. Модульні технології складання [1] представляються деякого множиною взаємозв'язаних технологічних складальних модулів, які описують основні різновиди складальних робіт. Кожен модуль є добре відпрацьованою та оптимізованою одиницею технологічного блоку багаторазо-вого використання, котрий відповідає конструкційному, на якому виконується модульна технологія. Під складальним модулем розуміється завершений комплекс основних і допоміжних рухів складальної операції, котрі виконуються в потрібному порядку в одній робочій зоні, в якій є складальні інструменти і пристосування, тобто технологічне оснащення для змінних форм і властивостей об'єктів складання. Основна оцінка ефективності модульної технології полягає в забезпеченні високої продуктивності та гнучкості, точності, надійності та собівартості продукції.

При досягненні такої технологічної основи, на якій виконується проектування, є можливість проектування автоматизованої складальної технології з програмним керуванням. Такий базис проектування роботизованих технологічних і конструкційних модулів складального вузла є суттю модульної складальної технології. Таке проектування добре відоме [2], суть якого коротко полягає в наступному. Для локальної реалізації (маршрут складання) та глобальної (зберігання параметрів якості при випуску виробів) передбачається використання методів висхідного та низхідного проектування. Висхідне проектування має емпіричну відмітну ознаку і використовує прагматичний підхід до рішення задачі, однозначно технічного рішення без порівняння можливих варіантів при відсутності економічної оптимальності рішення. Низхідне проектування застосовує методи теорії виробничого управління та математичного програмування. Воно характеризується орієнтацією на показники продуктивності та вартості, порівняння варіантів і забезпечення економічності оптимального рішення. Основними принципами проектування складальних роботів є: поєднання високої продуктивності та універсальності, ієрархічність, програмне переналагодження, забезпечення найбільшої предметної замкнутості.

Виклад основного матеріалу. До ознак конкурентоспроможності процесів складання можуть бути віднесені високі технічні характеристики і параметри якості складання та мінімальні витрати виробництва. Для досягнення такої оцінки може використовуватися метод співвідношення параметрів процесу до базового варіанту, або провести оцінку по інтегральному показнику конкурентності [2]. В більшості випадків цьому методу властива деяка невизначеність. Об'єднаний комплексний технологічний параметр, установлений як, $A_T = \sum_1^n a_i f_i$, де a_i - чинники ваги $i^{-их}$ параметрів, призначених для експерта, n - число таких параметрів; f_i - параметричний коефіцієнт. Такий параметр визначається за економічними показниками A_E. Тоді інтегральний показник конкурентності складання формується подібно A_E. Загальний показник конкурентності складання роботами представляється

© Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.

$$A_{\text{ф}} = A_T \Big/ A_E = \sum_1^n a_i f_i \Big/ \sum_1^n a_i^* f_i^* \,. \qquad (1)$$

При $A_{\text{ф}} > 1$ складальні процеси перевищують аналог за конкурентністю і навпаки. При досягненні негативних результатів складальний процес перепроектовується.

Формування складальних модулів. До проектування таких модулів, як було зазначено, можна підійти з точки зору максимального використання технологічних можливостей складальних роботів, тобто складальних рухів, що виконуються для їх здійснення. У загальному вигляді такий робот може мати *p* координатних систем, в кожній з яких виконувати до трьох лінійних і кутових рухів (рис.1). В загальному кількість виконуваних рухів записується прямокутною матрицею

$$D = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & \alpha_{x1} & \beta_{y1} & \xi_{z1} \\ x_2 & y_2 & z_2 & \alpha_{x2} & \beta_{y2} & \xi_{z2} \\ . & . & . & . & . & . \\ x_p & y_p & z_p & \alpha_{xp} & \beta_{yp} & \zeta_{zp} \end{vmatrix}, \qquad (2)$$

де: x_i , y_i , z_i – лінійні переміщення робота по координатам; $\alpha_{xi}, \beta_{yi}, \xi_{zi}$ - аналогічно, кутові; *p* – число координатних систем робота. Фактично таких переміщень в роботах виконується мало, як показано на рис.1. Матриця виконуваних переміщень робота має простий вигляд

$$D_R = \begin{vmatrix} & & & & \xi_{zo} \\ & & & & \xi_{z1} \\ & & z_2 & & \\ & & z_3 & \beta_{y3} & \xi_{z3} \\ & y_6 & & & \end{vmatrix}. \qquad (3)$$

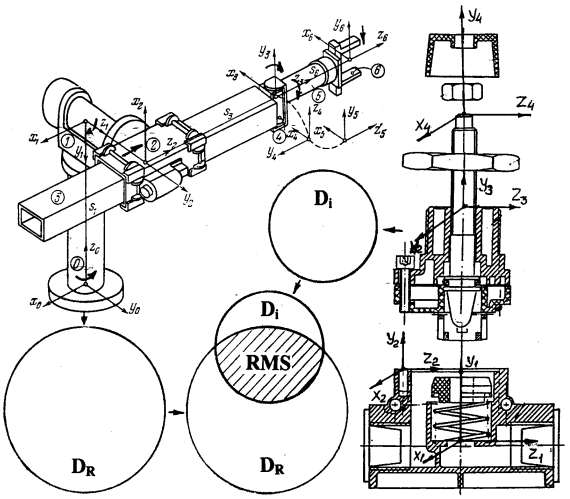


Рис. 1. Формування встановлених переміщень робота і складальної одиниці.

Оскільки складальні переміщення виконуються захватом робота, краще виходити з матриці перетворення $i^{-ої}$ ланки зв'язуючого опису позиції в початковій системі координат робота

$$S = \begin{vmatrix} (BC)_x & B_x & C_x & P_x \\ (BC)_y & B_y & C_y & P_y \\ (BC)_z & B_z & C_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad (4)$$

у якому друга колонка *B* описує вектор орієнтації, *C* – вектор підходу і *P* – вектор положення точки P_i захвата. Тому в одній координатній системі складального робота можуть виконуватися різні переміщення безліч яких можна виразити співвідношенням об'єднання

$$d_1 = x_1 \cup y_1 \cup z_1 \cup \alpha_x \cup \beta_y \cup \xi_z \cup l \cup \vartheta = \bigcup_1^a d_i \,, \qquad (5)$$

де: l, ϑ - додаткові спеціальні переходи, наприклад, вібруючі, переривисті, траєкторні, і т.п., необхідні для повноти охоплення; *a* – їх кількість. Тоді можна представити попередні формули (2, 3), як

© Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.

$$D_R = d_1 \cup d_2 \cup ..... \cup d_p = \bigcup_1^p d_i \ , \qquad (6)$$

тобто кожен робот може бути описаний як система, в якій, є можливість виконувати певні лінійні, кутові та спеціальні переміщення. Зображення деякої множини рухів може бути отримане за допомогою кругів *Ейлера* [3] (рис. 1).

Остаточно необхідні складальні переміщення для об’єкту записуються як

$$D_j = d_1^* \cup d_2^* \cup .... \cup d_p^* = \bigcup_1^{p^*} d_j \ , \qquad (7)$$

Графічно це представляється кругами *Ейлера*. Тому, технологічний роботизований модуль складальних процесів імітується як пересічення кінцевих множин рухів робота та складальної одиниці

$$RMS = D_i \cap D_j = (d_{p1} \cup d_{p2} \cup ..... \cup d_{pk}) = \bigcup_1^k d_i \ , \qquad (8)$$

де: d_{pi} – складальні рухи, які може виконувати робот і є необхідними для отримання складальної одиниці. Виконуваним роботизованим складальним переміщенням модуля відповідає заштрихована область пересічення даних множин. Технологічний роботизований модуль з номінальними складальними рухами також матиме максимальну концентрацію таких рухів і можливо буде оптимальним за критерієм, наприклад, вартісних витрат.

Підходами до вирішення цієї проблеми може бути подальший аналіз і синтез зазначених рівнянь множин складальних рухів. Починають запускатися у виробництво деякі роботи з більшим діапазоном складальних рухів, технологічного обладнання, які мають різні витрати. З іншого боку, існує також ряд складальних одиниць, що вимагають для складання тих чи інших рухів. Області перетину зазначених множин складальних рухів можуть бути досить різними.

Для цієї мети може бути використана композиція об’єктів, що становить у відповідність парі об'єктів операндів (робот і складальний вузол) третій об'єкт - композицію, тобто роботизований модуль складання

$$D_i \perp D_j = RMS \ . \qquad (9)$$

Висновки. Технологічні складальні роботизовані модулі представляють основу модульних технологій. На складальних роботах можна швидше і простіше на першій стадії впливати по критерію максимуму складальних рухів. Для цієї мети необхідно скомпонувати множини можливих складальних рухів робота і необхідних для типового представника групи складальної одиниці, які компонуються з використанням теорії та практики. Основними етапами розробки роботизованого складального процесу можна вважати: підбір складальних вузлів, їх групування, встановлення способів складання, набір складальних рухів, їх оптимізацію та розробку технологічних операцій, маршруту складання, техніко-економічне обґрунтування.

Інформаційні джерела

1. Божидарнік В.В., Григор’єва Н.С., Шабайкович В.А. Автоматичне складання виробів: - Луцк. «Надстир’я». 2005. -386 с.

2. Машинобудування: Енциклопедія. Технологія складання в машинобудуванні. Т III-5. / Під заг.ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Машинобудування, 2001. -640 с. іл.

3. Григор’єва Н.С. Науково-технологічні основи гнучкого модульного автоматичного складання виробів. – Луцьк. «Надстир’я». 2008. -520 с.

© Григор’єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.

Григорьева Н.С., д.т.н.,проф., Шабайкович В.А., д.т.н.,проф.
Луцкий национальный технический университет

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКИ

Технологические сборочные роботизированные модули представляют основу модульных технологий. Описаны особенности модульных технологий сборки изделий, основы построения технологических и конструкционных модулей, формирующих технологические сборочные процессы. Рассмотрен оптимизационный подход при практическом формировании модулей по определенным критериям. На сборочных роботах можно быстрее и проще на первой стадии влиять на критерии максимума сборочных движений. Для этой цели множества возможных сборочных движений на роботе и необходимых для типового представителя группы сборочной единицы компонуются на базе теории и практики. Подходами к решению этой проблемы может быть дальнейший анализ и синтез указанных уравнений множеств сборочных движений. Теперь начинают запускаться в производство некоторые роботы с большим диапазоном сборочных движений вместе с технологическим оборудованием, которые имеют разные стоимости. Существует также ряд сборочных единиц, требующих для сборки тех или иных движений, поскольку области пересечения указанных множеств могут быть достаточно разнообразными.

Ключевые слова: сборка, модули, технология, робот.

Grigoryeva N., DSc, Prof., Shabaikovich V., DSc., Prof.
Lutsk National Technical University

DESIGNING OF TECHNOLOGICAL ASSEMBLY ROBOTIC MODULES

Technological assembly robot's modules representing a basis of modular technologies. The features of construction a modular assembly technology, shaping of modules, designing assembly of technological processes are circumscribed. The optimizations approaches for reach of practical construction of modules are shown on a criterion of an amount executed assembly movements. On assembly robots can be rather simply at the first stage generated on a criterion of a maximum of assembly movements. For this purpose the sets of possible assembly movements on the robot and necessary for the typical representative of group collected units are composed with use of the theory and practice. The approaches to solution and this problem can be the further analysis of the indicated equations of sets. There are starting up some robots with the executed assembly movements, which together with technological equipment are characterized by the various costs. On the other hand, there is also number of collected units requiring for assembly those or other assembly movements. As it is visible the areas of intersection of the indicated sets can be rather various.

Keywords*: assembling, modules, technology, robot.*

Стаття надійшла до редакції 25.03.2018.

© Григор'єва Н.С., д.т.н., проф., Шабайкович В.А., д.т.н., проф.

УДК 621.762
Н.М. Гулієва, к.т.н., В.Р. Булига
Луцький національний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ

Розробка систем автоматизованого проектування лиття в кокіль протягом довгого часу залишається однією з найважливіших та найскладніших питань ливарного виробництва. Від цього в значній мірі залежить рівень технології і ступінь автоматизації процесу. Виготовлені деталі повинні відповідати стандартам якості поверхні і внутрішньої структури через статичні і динамічні навантаження, яким вони піддаються в процесі експлуатації. У пошуках шляхів підвищення якості виливків в умовах ресурсозберігаючих технологій все більша увага приділяється новим комп'ютерним технологіям. В останні роки виробничі підприємства, які використовували 2D-програми, перейшли на 3D, або почали паралельно використовувати 2D і 3D технології комп'ютерного моделювання для виготовлення деталей.
Ключові слова: *ливарне виробництво, лиття в кокіль, деталі, 2D і 3D-програми.*

Однією з найбільш поширених програм для 3D-моделювання процесу лиття є SolidCast. Для моделювання процесів заливання і затвердіння тривимірних моделей з подальшим їх дослідженням, а також коригуванням матеріалів, конструкції деталі і форми. Робота в цій програмі в певній мірі може служити альтернативним експериментальним дослідженням технологічності моделі виливка, гідравлічних і теплових процесів формування необхідної деталі.

Метою моделювання є побудова тривимірної моделі корпусу з ливарної системи з двома типами виготовлення. Моделювання необхідне для виявлення оптимального ливарного варіанту з найкращим якісним ефектом, яке може попередити утворення усадочних і поверхневих дефектів виливка.

Для дослідження було обрано виливок корпусу масою 710 кг. Габаритні розміри 700×818×960 мм. Побудовані 3D-моделі корпусу в програмі SolidCast.

Корпус є готовим виробом і входить до складу складальної одиниці засувки клинової. Вона призначена для встановлення на трубопроводах в якості засувного пристрою для водо-, газо-, нафтових сумішей. Деталь належить до корпусних деталей і виготовляється зі сталі 25Л методом лиття в кокіль. Можна також виготовляти з матеріалу інших марок таких, як ХМ25Л, 12Х18Н12М3ТЛ. Її робочим середовищем є рідкі та газоподібні неагресивні нафтопродукти, вода, пара. Сталевий корпус відноситься до класу відновлюваних та ремонтних виробів. Вони виготовляються з клиновидної форми жорсткої конструкції.

Так як частка виливків в загальній масі ряду машин, наприклад металорізальних верстатів, парових турбін, тракторів і т. д. перевищує 50 %, тому ливарне виробництво є основною заготівельної бази сучасного машинобудування. Широке застосування способу виготовлення заготовок литтям пояснюється тим, що цим методом можна виготовляти заготовки складної конфігурації, які іншими методами (куванням, штампуванням, зварюванням) отримувати більш трудоємке, затратне або взагалі неможливе. Універсальність є основною перевагою лиття. Маса заготовок виготовлених литтям може коливатися від декількох грамів до десятків і навіть сотень тон, розміри заготовок можуть бути також різні. Виготовлятися вони можуть з найрізноманітніших металів і сплавів. Також дуже важливою перевагою лиття є можливість максимального наближення розмірів одержуваного виливка до розмірів готової деталі внаслідок чого значно скорочуються відходи металу при механічній обробці. Виливки повинні відповідати експлуатаційним вимогам, мати задані механічні властивості, а в деяких випадках і спеціальні властивості в інтервалі робочих температур. Щоб отримати виливок з необхідними експлуатаційними властивостями необхідно вибирати належний сплав і технологію виготовлення.

Найважливіше завдання ливарного виробництва – це скорочення витрат на брак. Це завдання полягає у виявленні і аналізі виявлених дефектів, визначенні причин виникнення, призначення і виконання заходів щодо запобігання дефектів. Під час затвердіння виливка відбувається ряд небажаних процесів, які можуть викликати утворення усадочних порожнин, так званих усадочних раковин. Цей процес називається усадкою. Виливки з усадочними

© Н.М. Гулієва, к.т.н., В.Р. Булига

раковинами в перерізі в більшості випадків непридатні для використання, тому при їх виготовленні намагаються вивести усадочну раковину в додатковий об'єм, так званий виступ.

Щільна будова виливка може бути забезпечена лише при литві заготовки через виступ. Природно, що виступ в ній повинен затвердіти в останню чергу. Науковці намагаються досягнути такого ефекту, щоб на виступ йшло як можна менше сплаву, і щоб вони забезпечували належну якість заготовки. Тому необхідно керувати температурними полями застигання системи виливок-виступ. В ідеальному випадку додатковий об'єм сплаву повністю переміщається в застиглий виливок, причому на заготовці ніякого надлишку металу не залишається. На практиці можна розраховувати ідеальну величину виступу.

Для зменшення витрат металу доцільно застосування тепловий захисту виступу. Захист складається з теплоізоляційного виступу (рис. 1), яка уповільнює затвердіння поверхні з зовнішнього боку. Існують види ізотермічних виступів, які показано на рис. 2.

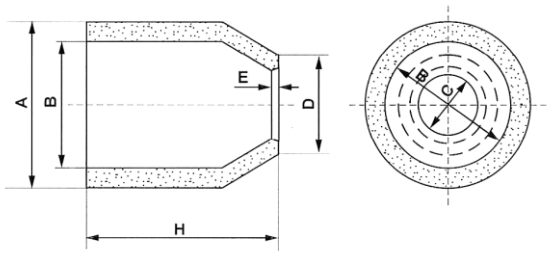


Рис. 1. Теплоізолюючий виступ

Рис. 2. Види ізотермічних виступів

Як приклад (рис. 3) наведемо застосування теплоізоляційних виступів на ливарних моделях, які дозволяють значно підвищити вихід придатного литва в порівнянні з традиційними методами виготовлення виливків.

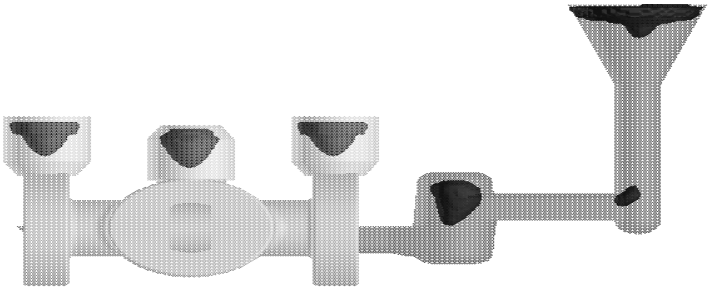


Рис. 3. Використання теплоізолюючих виступів

Ще однією з важливих проблем ливарного виробництва є неметалеві домішки. Вони завжди наявні в розплавленому металі і викликають такі дефекти, як шлакові і газові раковини, газову пористість, що знижує якість виливків і їх механічні властивості. Наступні операції з видалення дефектів помітно ускладнюють і здорожують процеси обробки виливків. Утворення неметалічних домішок виникає внаслідок шлаку з металом при його плавці, зливанням в роздатковий ковш і заливкою в ливарну форму та іншими факторами.

Проводемо аналіз діючої технології лиття корпусу і розробимо рекомендації щодо її вдосконалення на основі використання систем комп'ютерного моделювання.

Метою досліджень є комп'ютерне моделювання, яке дозволяє спрогнозувати брак на етапі проектування технології, а також мати можливість доопрацювати технологію так, щоб звести його до нуля, або до мінімальних показників.

Проводимо аналіз діючої технології лиття в кокіль корпусу:

1 етап.

За відомим кресленням заготовки створюємо 3D модель (рис. 4).

2 етап.

Створимо 3D модель вихідної ливарно-живильної системи, наданої фахівцями підприємства (рис. 5). Зони нещільного металу у виливку показано на рис. 6.

Рис. 4. 3D модель корпусу

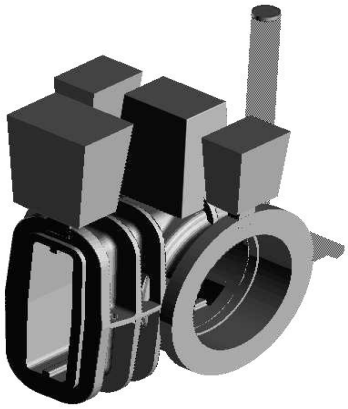


Рис. 5. Загальний вигляд ливарної системи

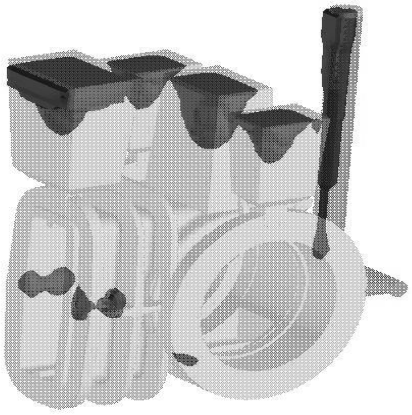


Рис. 6. Зони нещільного металу у виливку

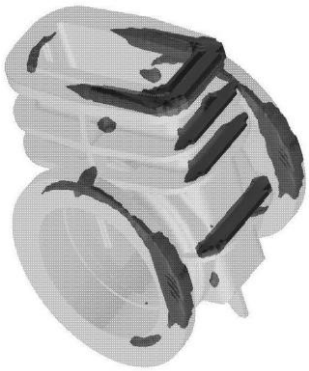


Рис. 7. Наявність дефектних місць у виливку

Розглянемо проектування ливарної системи з урахуванням аналізу заводської технології.

За результатами аналізу існуючої ливарної системи спроектуємо нову систему. Для досягнення найбільшого ефекту була змінена конфігурація розподілу металу, а саме, місце розташування та застосування теплоізолюючих вставок.

1 етап.

Визначення раціонального розташування виготовлення виливка. На рис. 7 показана наявність дефектних місць у виливку.

2 етап.

Проаналізувавши дефектні місця в виливку, приймаємо рішення розташувати виступу на трьох фланцях (рис. 8).

Результати аналізу існуючої технології

Розрахунковий параметр: щільність металу в литві. Результати, отримані в системі SolidCast після аналізу наданої технології, показали наявність дефектів (зони нещільного металу) (рис. 9).

Даний результат говорить про можливе виникнення пористості на центральному і бічних фланцях виливка.

Основні характеристики ливарної моделі:

1. Лиття в кокіль;
2. Всього залитого металу: 1355,4 кг;
3. Зона подачі розплаву: 1,64 кг;
4. Маса формувальної суміші: 2103,8 кг;
5. Вихід придатного при цьому склав 51,6 %.

Робимо висновок, що отримання прибутків при виготовленні даної конфігурації для виготовлення виливка корпусу засувки неефективно.

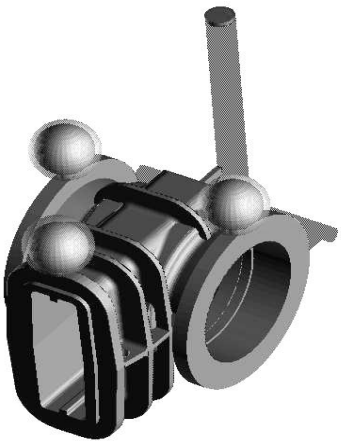


Рис. 8. Етап моделювання

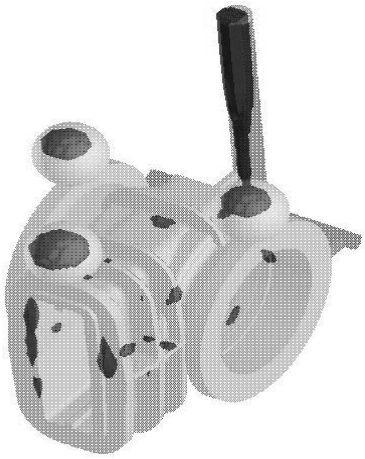


Рис. 9. Зони нещільного металу

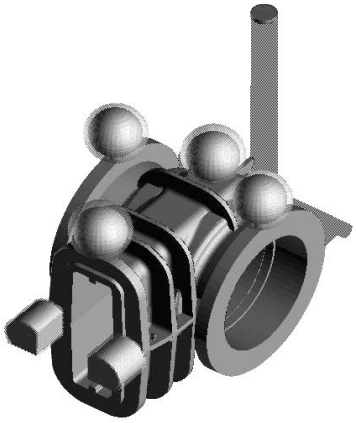


Рис. 10. Загальний вигляд проектної ливарної системи

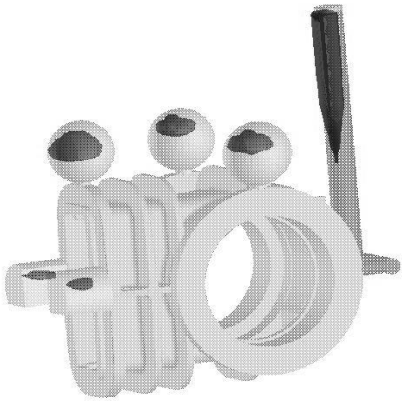


Рис. 11. Зони нещільного металу в литві

Куля має мінімальну площу, тому його тепловіддача мінімальна. Отже, куля є найбільш оптимальною геометричною фігурою.

Виступи на трьох фланцях приймаємо у вигляді кулі.

Результати аналізу проектної технології

Розрахунковий параметр: щільність металу у виливку.

3 етап.

Після аналізу ливарної системи приймаємо рішення застосувати термоізоляційні вставки (рис. 6).

4 етап.

На наступному етапі прийнято рішення встановити виступи на торець центрального фланця і на центр виливки (рис. 10).

Результати аналізу проектної технології

Розрахунковий параметр: щільність металу в литві (рис. 11).

Оскільки при даній ливарній системі дефектів у виливку не виявлено, то приймаємо рішення залишити цю ливарну систему і прийняти її за проектний варіант.

Основні характеристики ливарної моделі:

1. Лиття в піщано-глинисту форму;
2. Всього залитого металу 840,1 кг;
3. Зона подачі розплаву: 1,64 кг;
4. Маса формувальної суміші: 2512,8 кг;
5. Маса термоізоляційних вставок 5,106 кг;
6. Вихід придатного склав 80,3 %.

В результаті зміни конфігурації прибутків і застосування теплоізолюючих вставок вся усадка розташувалася в їх межах.

Вихід придатного сплаву склав 80,3 %.

Висновки. В даному дослідженні виконано моделювання процесу лиття корпусу в системі "SolidCast". Визначено оптимальну технологію виготовлення виливка, яка полягає в застосуванні виступів, що в свою чергу забезпечує виготовлення якісних заготовок без утворення зон нещільності та усадок.

Інформаційні джерела

1. Сухоруков С.І. Сучасні перспективи розвитку систем автоматизованого проектування технологічної оснастки / С.І. Сухоруков, О.В. Петров, Д.С. Осіпов // Вісник Хмельницького національного університету – Вінниця, Випуск 6, 2011. – С. 156–159.

2. Сімута Р.Р. Моделювання поверхонь деталей в CAD/CAM системах / Р.Р. Сімута, Ю.В. Петраков // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – Київ, Випуск 12, 2012. – С. 149–158.

3. Gulieva N.M. Information support for drinking water treatment / N. M. Gulieva // Actual Problems of Economics: Scientific economic journal. Kyiv, 2012. – V. 12 (138). – C.160–166.

4. Криворучко Д.В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д.В. Криворучко, В.О. Залога, В.Г. Корбач. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 208 с.

5. Гулієва Н.М. 3-D моделювання механічної обробки деталі / Н. М. Гулієва // Наукові нотатки: зб. наук. праць. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. – Вип. 57. – С. 66–69.

6. Рудь В.Д. Структурные характеристики заготовок при заполнении пресс-форм частицами нерегулярной формы / В. Д. Рудь, Л. М. Самчук, Н. М. Гулиева, В. В. Шиберко // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Science and Education – Our Future (November 24–26, 2014) Abu Dhabi”. – Dubai.: Rost Publishing, 2014. – P. 18–24.

Н.М. Гулиева, к.т.н., В.Р. Булыга
Луцкий национальный технический университет

ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

Разработка систем автоматизированного проектирования литья в кокиль в течении долгого времени остается одной из самых важных и сложных вопросов литейного производства. От этого в значительной степени зависит уровень технологии и степень автоматизации процесса. Изготовленные детали должны соответствовать стандартам качества поверхности и внутренней структуры через статические и динамические нагрузки, которым они подвергаются в процессе эксплуатации. В поисках путей повышения качества отливок в условиях ресурсосберегающих технологий в последние годы большое внимание уделяется новым компьютерным технологиям. В последние годы производственные предприятия, которые использовали 2D-программы, перешли на 3D, или начали параллельно использовать 2D и 3D технологии компьютерного моделирования для изготовления деталей.

Ключевые слова: *литейное производство, литье в кокиль, детали, 2D и 3D-программы.*

N.M. Huliieva, Ph.D., V.R. Buliga
Lutsk National Technical University

FEATURES OF AUTOMATED DESIGN OF LITTLE PROCESS

The development of computer-aided design systems for casting in a kakil for a long time remains one of the most important and complicated issues of foundry production. From this, the level of technology and the degree of automation of the process depends to a large extent. The manufactured parts must comply with the quality standards of the surface and the internal structure through the static and dynamic loads that they undergo during operation. In the search for ways to improve the quality of castings in a resource-saving technology in recent years, increasing attention is paid to new computer technologies. In recent years, manufacturing companies that have used 2D programs have switched to 3D, or have begun to use in parallel 2D and 3D computer simulation technologies for the manufacture of parts.

Keywords: *casting, casting, details, 2D and 3D programs.*

Стаття надійшла до редакції 27.05.2018.

© Н.М. Гулієва, к.т.н., В.Р. Булига

УДК 621. 315. 592
С.П. Данильчук, м.н.с.
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

ОДЕРЖАННЯ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1–0,25)

Розроблені технологічні умови вирощування монокристалів твердого розчину $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1–0,25). Досліджено: спектральний розподіл фотопровідності одержаних кристалів при T=300 K. Показано вплив катіонного заміщення In^{3+} на Sn^{4+} в твердих розчинах $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1–0,25) на їх фотоелектричні властивості.
Ключові слова: *тверді розчини, кратність фотовідклику, термозбудження, час життя.*

Постановка проблеми. Вивчення закономірностей, які відбуваються в гетерогенних системах під дією різних зовнішніх факторів, представляє для фізики і хімії твердого тіла великий інтерес.

При переході від елементарних добре вивчених напівпровідників до потрійних, ускладнюється кристалічна структура, що призводить до появи нових фізичних властивостей. Дослідження багатокомпонентних сполук дозволяє розширити можливості їх використання в сучасній техніці [1-3].

Можливості отримання нових матеріалів істотно розширюються при використанні твердих розчинів. Перспективними матеріалами, які широко використовуються в техніці, є кристали групи $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$ (A–Tl; B–In, Ga; C–S, Se, Te). Одним з представників напівпровідникових матеріалів цієї групи є потрійна сполука $TlInSe_2$. Дослідження даних кристалів і твердих розчинів на їх основі в літературі представлено великою кількістю публікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [4-9] оптичними методами визначена ширина забороненої зони кристалів. В [7-9] встановлено, що зі збільшенням вмісту $SnSe_2$, $SiSe_2$, $GeSe_2$ ширина забороненої зони зростає, що пов'язано механізмом утворення твердого розчину. У процесах переносу заряду в твердих розчинах на основі $TlInSe_2$ має місце температурна залежність електропровідності $\sigma(T)$, яку можна екстраполювати в системі координат $\ln(\sigma)$–$1/T$ декількома прямими з різними енергіями активації (E_A), що відповідає різним механізмам переносу [10-13]. Вплив заміщення In^{3+} на Sn^{4+} і In^{3+} на Ce^{4+} на електричні властивості твердих розчинів досліджувався в [12,13].

Сполуки $TlInSe_2$ і їх тверді розчини є фоточутливими матеріалами [14-15]. В [14] дослідження спектрального розподілу фотопровідності показали, що максимум лежить в області власних оптичних переходів і зі збільшенням температури зміщується в область менших енергій. При ізовалентному заміщені атомів In атомами Pr ширина забороненої зони зменшується, а область спектральної чутливості зміщується в ІЧ область [15]. В роботі [16] досліджені спектри термостимульованої провідності $TlInSe_2$, визначені енергії залягання рівнів прилипання, площа захоплення, концентрація пасток.

Метою даної роботи було отримання і дослідження кристалічної структури однофазних твердих розчинів на основі селено-індату талію $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1–0,25), а також вивчення впливу дефектів структури на їх фотоелектричні властивості.

Результати дослідження. Для синтезу зразків твердих розчинів $TlInSe_2$-$SnSe_2$ використовувалися елементи Tl, In, Sn, Se (чистотою не менше 99,99 мас.%). Підготовлені компоненти завантажували в кварцові контейнери. Завантажені ампули були вакуумовані до тиску $1{,}33\cdot10^{-2}$ Па і герметизовані на киснево-газовому пальнику.

Зразки системи $TlInSe_2$-$SnSe_2$ нагрівали до температури 1220 К, при якій витримували 5 год. Після витримки, розплави охолоджували зі швидкістю 10-20 К/год до температури гомогенізуючої відпалу (670 К), який становив 500 год, після чого ампули гартувалися в холодній воді.

Рентгенівським дифракційним методом порошкової рентгенівської дифракції встановлено структуру сплавів в області існування твердого розчину. В роботі [17] представлені уточнюючі результати кристалічної структури.

Ріст монокристалів твердих розчинів здійснювали методом спрямованої кристалізації Бріджмена - Стокбаргера.

© С.П. Данильчук, м.н.с.

Попередньо підготовлені ростові контейнери поміщали в верхню зону ростової печі до повного розплавлення шихти. Після розплавлення ампулу опускали в зону кристалізації і витримували 24 години, щоб закристалізувати 3-4 мм. Після цього опускали зі швидкістю 5 мм/добу спеціальним механізмом, який складається з електричного двигуна і редуктора.

Після повної кристалізації піч охолоджували зі швидкістю 100 К/добу до кімнатної температури. Отримані монокристали твердого розчину мали довжину 30 мм і діаметр 9 мм (рис. 1).

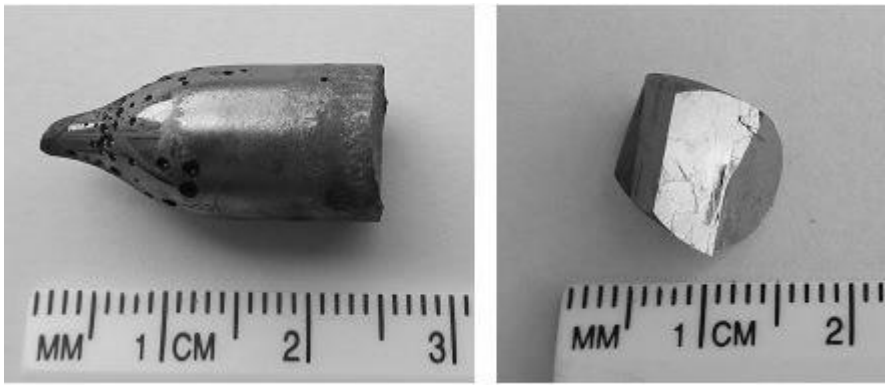


Рис. 1. Вид монокристалів $Tl_{0,9}In_{0,9}Sn_{0,1}Se_2$ та їх сколів

Для виготовлення досліджуваних зразків, отримані кристали сколювалися в середній частині монокристалічного злитка уздовж площини спайності (001). Поверхні кристалів були дзеркально гладкими (рис. 1), що дозволило використовувати їх для досліджень без будь-якої додаткової обробки.

Для проведення фотоелектричних досліджень з плоскопаралельних відколів вирізали зразки у формі паралелепіпедів (4×1×0,2 мм). Омічні контакти наносилися плавленням індію до протилежних поверхонь досліджуваних пластин.

Монокристали твердого розчину $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,10-0,25) є фоточутливими матеріалами. Кратність фотовідклику до інтегрального світла освітленістю L=10^4 лк (σ_C/σ_T, де σ_C-провідність при висвітленні, σ_T-провідність в темноті) представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Кратність фотовідклику твердого розчину $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1-0,25)

Зразок	x=0,10	x=0,20	x=0,25
σ_C/σ_T	1,1	1,3	1,9

На рис. 2 представлено спектральний розподіл фотопровідності (ФП) монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1-0,25) при T=300 К.

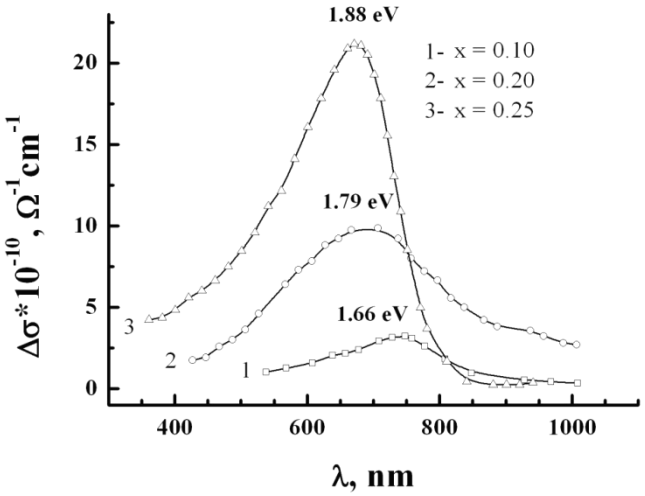


Рис. 2. Спектральний розподіл фотопровідності кристалів твердого розчину $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1-0,25) при T=300 К

© С.П. Данильчук, м.н.с.

З рисунка видно, що при 300 К максимуми фотопровідності лежать в області 660, 690, 745 нм для x=0,25; 0,20; 0,10 відповідно. З аналізу оптичних досліджень в галузі фундаментальних переходів [7], встановлено, що дані максимуми відповідають за власну провідність.

Зсув максимумів фотопровідності від λ_m=745 нм (при x=0,1) до λ_m=660 нм (при x=0,25) обумовлено зміною ширини забороненої зони [7].

Разом з тим зі збільшенням x фоточутливість досліджуваних кристалів збільшується рис. 2, табл. 1

Можна припустити, що зростання фоточутливості при збільшенні x, тобто збільшенні ширини забороненої зони (рис. 3), відбувається внаслідок перерозподілу рекомбінаційного потоку дірок з s-швидких центрів рекомбінації на r-повільні центри рекомбінації. Роль s-центрів як правило виконують різні структурні дефекти [18], r-центрів, катіонні вакансії (V_{Tl}). З ростом E_g розчину може змінюватися відстань між рівнем Фермі і рівнями s- і r-центрів, що буде впливати на їх заповнення носіями і, відповідно, на рекомбінаційні потоки через ці центри.

На основі наших досліджень можна запропонувати модель перезарядки центрів, яка пояснює спостережувані явища і не суперечить експериментальним результатам (рис. 3).

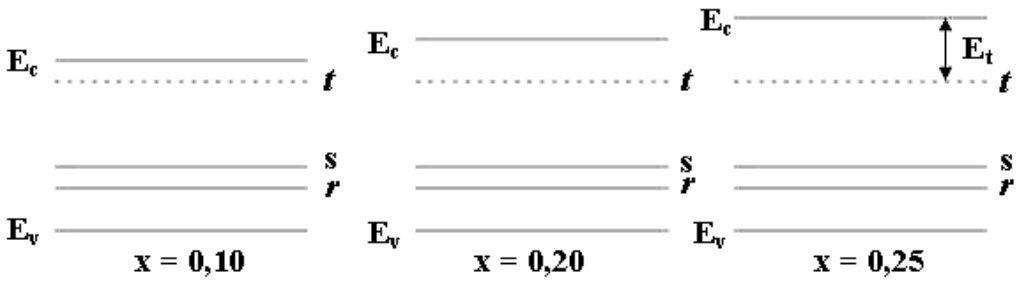


Рис. 3. Схематична модель розподілу центрів рекомбінації і прилипання в зразках твердого розчину

Припустимо, що t центри зв'язані з валентною зоною, тобто не змінюють свого положення по відношенню до валентної зоні. Подібні центри часто зустрічаються в напівпровідниках [19]. В такому випадку, при зростанні E_g, зростає енергетичний стан t-центру (E_t) по відношенню до зони провідності.

t- центри можуть виконувати роль як центрів прилипання, так і центрів рекомбінації для електронів (в залежності від E_t і температури). Якщо темп термозбудження електронів захоплених t-центрами назад в зону провідності вище, ніж темп термозбудження їх рекомбінації з дірками валентної зони, то t - центри будуть грати роль пасток [20]:

$$n_t v S_n N_C e^{-\frac{E_t}{kT}} > n_t v S_p p \qquad (1)$$

де n_t –концентрація захоплених t–центрами електронів, v –швидкість вільних носіїв заряду в зонах, S_n–переріз захоплення електрона центром t із зони провідності, S_p–переріз захоплення дірки t–центром, p –концентрація дірок у валентній зоні, N_c–щільність електронних станів на дні зони провідності.

Якщо темп рекомбінації дірок із електронами захопленими t–центрами більший темпу їх збудження у зону провідності, то t–центри грають роль центрів рекомбінації і в рівнянні (1) необхідно змінити знак на протилежний:

$$n_t v S_n N_C e^{-\frac{E_t}{kT}} < n_t v S_p p \qquad (2)$$

Для сполук з малим значенням E_t захоплення збуджених у зону провідності електронів центрами прилипання незначне і всі вони будуть рекомбінувати з нерівноважними дірками через r– і s–центри. При цьому заповнення електронами r– і s–центрів буде максимальним, а час життя дірок τ_p у валентній зоні мінімальним:

© С.П. Данильчук, м.н.с.

$$\tau_p = \frac{1}{vS_p n_c} \quad (3)$$

де S_p–переріз захоплення дірки центром із валентної зони, n_c–концентрація електронів на центрах рекомбінації (*r*– і *s*–центрах).

Фоточутливість пропорційна рухливості дірок (μ), яку вважатимемо однаковою для розчинів різного кількісного складу та часу їх життя у валентній зоні:

$$\Delta\sigma \sim \mu\tau \quad (4)$$

При збільшенні E_T, що має місце при зростанні *x* і відповідно E_g твердого розчину збільшується ефективність центрів прилипання, що проявляється в більшому заповненні $t-$центрів електронами і зменшення їх концентрації в зоні провідності, а також на центрах рекомбінації. Це вестиме до зростання τ_p (формула (1)) і фоточутливості зразка.

При низьких температурах (особливо для зразків з великим *x* і, відповідно, E_T) темп звільнення електронів із *t*–центрів менший темпу рекомбінації їх з дірками. Має місце нерівність (4.6). *t*– центри виконують роль центрів рекомбінації.

В такому випадку, рекомбінація нерівноважних дірок з електронами зони провідності буде відбуватися через три центри рекомбінації (*r, s, t*), що обумовлює невеликі значення τ_p і, відповідно, фоточутливість зразка. При підвищенні температури умова виражена нерівністю (2) може перейти в умову (1) при якій *t*– центри грають роль центрів прилипання. Це зменшує кількість каналів рекомбінації (*r, s*), що веде до зростання τ_p і фоточутливості.

Висновки. Методом спрямованої кристалізації Бріджмена-Стокбаргера отримані монокристали твердого розчину $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (*x*=0,1-0,25) великих розмірів. В роботі показано, що зі збільшенням $SnSe_2$ в твердому розчині зростає ширина забороненої зони і фоточутливість отриманих кристалів. Методом термічно стимульованої провідності, встановлено тип рівнів прилипання і проведена оцінка енергії залягання цих рівнів.

Інформаційні джерела

1. Божко В. В., Новосад А. В. и др, Особенности низкотемпературной электро- и фотопроводимости твердых растворов $CuInSe_2$-$ZnIn_2Se_4$ // ФТП. – 2014, Т. 48, В. 6, С. 747 – 752

2. Davydyuk G. E., Myronchuk G. L., and o. Ag_2CdSnS_4 single crystals as promising materials for optoelectronic // Optical Materials. – 2011. – V. 33 – P. 1302–1306.

3. Adamiv V. T., Ebothe J. and o. Triggering" effect of second harmonic generation in centrosymmetric α-BaB_2O_4 crystals // Optical Materials, V. 31, I. 4, P. 685-687.

4. Bakhyshov A. E. Electrical and Optical Properties of $TlInSe_2$ Single Crystals / A. E. Bakhyshov, M. F. Agaeva, A. M. Darvish // phys. stat. sol. (b). – 1979. – V. 91 – P. 31 – 34.

5. Fan H. Y. Infra – red absorption in semiconductors / H. Y. Fan // Rep. Progr. Phys. – 1956. – V. 19. – P. 107 – 153.

6. Hanias M., Anagnostopoulos A. N, Kambas K, Spyridelis J. On the non-linear properties of $TlInX_2$ (X = S, Se, Te) ternary compounds // Physica B. – 1989. –V. 160. – P. 154 – 160.

7. Zamurueva O. V., Myronchuk G. L. and o. Structural and optical features of novel $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$ chalcogenide crystals // Optical Materials. – 2014. – V. 37. – P. 614 – 620.

8. Myronchuk G. L., Zamurueva O. V. and o Structural and optical properties of novel optoelectronic $Tl_{l-x}In_{1-x}Si_xSe_2$ single crystals // J. Mater. Sci: Mater. Electr. – 2014. – V. 25. – P. 3226 – 3232.

9. Myronchuk G. L., Davydyuk G. E. and o. $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x= 0, 0.1, 0.2, 0.25) single-crystalline alloys as promising non-linear optical materials // J. Mater. Sci: Mater. Electr. – 2013. – V. 24, № 9 – P. 3555 – 3563.

10. Мадатов Р. С., Наджафов А. И. и др. Влияние ионизирующего излучения на механизм токопрохождения в монокристаллах $TlInSe_2$ // Физика твердого тела. – 2011, – Т. 53, №11 – С. 2097 – 2101.

11. Сардарлы Р. М., Самедов О. А. and o. Суперионная проводимость, эффект переключения и памяти в крысталлах $TlInSe_2$ и $TlInTe_2$ // Физика и техника полупроводников. – 2011, – Т. 45, №11 – С. 1441 – 1445.

© С.П. Данильчук, м.н.с.

12. Годжаев Э. М., Сафарова С. И., Джалилов Н. З., Абдурагимов А. А. Электрические и оптические свойства монокристаллов $Tl_{1-x}Ce_xSe_2$ ($0 \le x \le 0,04$) // Неорганические материалы. – 2007, – Т. 43, № 43. – С. 670 – 672.

13. Davydyuk G. E., Khyzhun O. Y. and o. Photoelectrical properties and the electronic structure of $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x = 0, 0.1, 0.2, 0.25) single crystalline alloys // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2013. – V. 15. – P. 6965 – 6972.

14. Badr A. M. Spectral photoelectronic features of $TlInSe_2$ single crystals / A. M. Badr, I. M. Ashraf // Phys. Scr. – 2012. – V. 86. – 7pp.

15. Годжаев Э. М. Фотоэлектрические свойства монокристаллов $TlIn_{1-x}Pr_xSe_2$ ($0 \le x \le 0,04$) / Э. М. Годжаев, Г. С. Джафаров // Неорганические материалы. – 2009, Т. 45, № 11 – С. 1317 – 1319.

16. Gasanly N. M. Thermally Stimulated Current Study of Shallow Traps in As-Grown $TlInSe_2$ Chain Crystals / N. M. Gasanly, T. Yildirim // Acta physica polonica (a). – 2011 – V 119. – P. 437 – 441.

17. Mozolyuk M. Yu., Piskach L. V., Fedorchuk A. O., Kityk I. V., Olekseyuk I. D., Parasyuk O. V. Phase diagram of the quasi-binary system $TlInSe_2$–$SnSe_2$ // Journal of Alloys and Compounds. – 2011,V.509 – P.2693–2696.

18. Лашкарев В. Е., Любченко А. В., Шейнкман М. К. Неравновесные процессы в фотопроводниках (Киев, Науковая думка, 1981).

19. Гурвич А. М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров (Москва, Высшая школа, 1982).

20. Давидюк Г. Э. Неравновесные процессы в полупроводниках (Луцк, Вежа, 2000).

С.П. Данильчук
Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

ПОЛУЧЕНИЯ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x = 0,1-0,25)

Разработаны технологические условия выращивания монокристаллов твердых растворов $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1–0,25). Исследованы: спектральное распределение фотопроводимости полученных кристаллов при T=300 K. Показано влияние катионного замещения In^{3+} на Sn^{4+} в твердых растворах $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1–0,25) на их фотоэлектрические свойства.

Ключевые слова: *твердые растворы, кратность фотовидклику, термозбудження, время жизни.*

S. Danylchuk
Lesya Ukrainka Eastern European National University

RECEIVING AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x = 0,1-0,25)

Technological conditions for growing single crystals of solid solutions $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1–0,25) have been developed. Spectral distribution of the photoconductivity of the obtained crystals at T=300 K. The effect of In^{3+} for Sn^{4+} cationic substitution in solid solutions $Tl_{1-x}In_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,1–0,25) on their photovoltaic properties is shown.

Keywords: *solid solutions, photoconductivity multiplicity, thermal excitement, lifetime.*

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018.

© С.П. Данильчук, м.н.с.

УДК 621.315.592

Замуруєва О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицький А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н.
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

ПІДВИЩЕННЯ ФОТОПРОВІДНОСТІ КРИСТАЛІВ ХАЛЬКОГЕНІДУ ІНДИНАТУ ТАЛІЮ ($TlInSe_2$)

У статті розглядається проблематика підвищення фотопровідності кристалів халькогеніду індинату талію ($TlInSe_2$). Встановлено, що легування компонентами IV групи є надійним способом підвищення домішкової фотопровідності кристалів $TlInSe_2$, надає можливість оцінювати фотопровідність у великому діапазоні довжин хвиль при одночасному зниженні вартості цієї технології, завдяки використанню більш дешевих речовин, таких як Si та Ge. У роботі описано модель, яка належить до галузі виробництва напівпровідникових матеріалів і може бути використана у приладах з сенсорним керуванням, а також у техніці гама-випромінювання, зокрема при виготовленні детекторів теплових нейтронів.

Ключові слова: *домішкова фотопровідність, ширина забороненої зони, центри рекомбінації.*

Вступ. Сучасний науково-технічний прогрес нерозривно пов’язаний з розвитком напівпровідникового матеріалознавства, пріоритетним завданням якого є пошук перспективних матеріалів, що володіють необхідними властивостями. Стан виробництва та використання напівпровідникових матеріалів свідчить про потребу керування їх характеристиками. Така потреба базується на знаннях фізико-хімічних та механічних властивостей матеріалів, створених зі сполук з достовірно відомою структурою.

Постановка проблеми. Однією з проблем при створенні базових напівпровідникових матеріалів є вибір оптимального способу їх легування. Причиною проблемності отримання легованого напівпровідникового матеріалу є те, що під час легування в процесі росту кристала виникає неоднорідний розподіл і суттєвий розкид концентрації легуючих елементів по об’єму зразка. Тому і потрібні технології, які дозволили б отримати кристалічні напівпровідникові матеріали, з оптимізованими фізико-механічними властивостями та завданого заздалегідь складу, потреба у яких в приладобудуванні є дуже великою.

Відомий спосіб легування монокристалічних сполук різноманітного складу, зокрема спосіб легування телуриду кадмію [1]. Недоліком такого способу легування є те, що він включає операцію синтезу кристалів з легуванням хлоровмісною складовою, яка хімічно дуже активна та шкідлива для людини, а тому такий спосіб є дуже небезпечним.

Відомий також спосіб легування телуриду кадмію, що включає завантаження його у ростовий контейнер, відкачку контейнера, вміщення у піч, виведення на температурний режим, при цьому при завантаженні у контейнер телуриду кадмію, одночасно завантажують порошкоподібний галогенід амонію. Такий спосіб дозволяє уникнути контакту із шкідливими для людини речовинами, дозволяє одержати рівномірний розподіл летучої домішки у об’ємі монокристалу завдяки переходу порошкоподібного галогеніду відразу у парову фазу, чим забезпечує доставку телуру і кадмію у потрібну зону. Проте, отриманий у такий спосіб напівпровідниковий матеріал має дуже низькі фотоелектричні властивості.

Для підвищення фотопровідності напівпровідникового матеріалу зокрема, монокристалу халькогеніду індинату талію є спосіб, що передбачає завантаження шихти з високочистих елементів талію – 000, індію – 000, селену – ОСЧ-17-4 у ростовий контейнер з наступним вирощуванням монокристалу за методом Бріджмена-Стокбаргера, згідно з яким ростовий контейнер вміщують у піч, виводять її на температурний режим та при отриманні розплаву вводять легуючі елементи I групи (Au, Ag), або елементи IV групи – Si, Ge, та після отримання легованого монокристалу спостерігають за його властивостями, зокрема фотопровідністю [2].

Суттєвим недоліком такого способу є частковість розробки технології, яка поширюється лише на з’ясування можливостей підвищення фотопровідності кристалів $TlInSe_2$ в області хвиль невеликої довжини, а тому визначити доцільність використання легованих елементами IV групи кристалів $TlInSe_2$ для використання у приладах з сенсорним керуванням неможливо. Крім того, у цієї технології (способі) акцент зроблений на використання лігатури, до складу

© Замуруєва О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицький А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н.

якої входять елементи I групи, зокрема, золото (Au) та срібло (Ag), що здорожує технологію підвищення фотопровідності монокристалів $TlInSe_2$.

Постановка завдань. Підвищення фотопровідності кристалів халькогеніду індинату талію ($TlInSe_2$) можна здійснити введенням легуючих елементів, у попередньо відкачаний ростовий контейнер з халькогенідом індинату талію, одночасно завантаживши лігатуру до складу якої вводять елементи IV групи кремній (Si) та германій (Ge).

Викладення основного матеріалу. Зразки легованих монокристалів $TlInSe_2$ для подальшого дослідження отримують шляхом природного сколу від масивних монокристалів. Такі зразки мають форму монокристалічних блоків, а як матеріали електричних контактів використовують галій-індієву евтектику, яку наносять на торець та поверхню зразка методом втирання. Омічність контактів зберігається у широкому інтервалі температур і напруг, і перевіряється в кожному конкретному випадку перед проведенням експериментальних досліджень. Як спектрограф використовується монохроматор МДР-208 з кремнієвим фотоприймачем.

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених вивченню фотоелектричних властивостей кристалів $TlInSe_2$ [3; 4–7], питанню впливу сторонніх домішок на їх фотоелектричні властивості приділено мало уваги. Можна відзначити роботи [6; 7], у яких досліджено спектральну залежність фотопровідності (ФП) і температурну залежність теплової провідності монокристалів та тонких плівок $TlInSe_2$, легованих Cu та Sn. Автори показують, що домішки міді діють як акцептори, а олова – як донори.

У роботі [3] представлено відомості про вплив акцепторних (елементи I групи: Au, Ag, Cu) й донорних (IV група: Ge, Si, Sn) домішок на фотоелектричні властивості монокристалів $TlInSe_2$. Установлено, що введення елементів першої групи підвищує фоточутливість монокристалів $TlInSe_2$ унаслідок утворення в них «сенсабілітуючих» центрів. Уведення елементів четвертої групи понижує поріг чутливості й рівень струмових шумів у результаті часткової компенсації дірок, зумовлених характерними структурними дефектами – термоакцепторами.

Монокристали твердих розчинів $Tl_{1-x}In_{1-x}Si(Ge)_xSe_2$ (x=0,1; 0,2) – фоточутливі матеріали [8]. Кратність фотовідклику до монохроматичного світла (λ=660 нм, P=50 мВт) (σ_l / σ_d, де σ_l – провідність при освітленні, σ_d – провідність в темноті) представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Кратність фотовідклику твердих розчинів $Tl_{1-x}In_{1-x}Si(Ge)_xSe_2$ при T =300 К

Зразок	x=0,1	x=0,2
$Tl_{1-x}In_{1-x}Si_xSe_2$	2,98	1,47
$Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$	9,32	1,85

Як видно з табл. 1 зі збільшенням x та зі статистичною заміною Ge → In та Si → In фоточутливість досліджуваних зразків зменшується. Зменшення фоточутливості кристалів, на нашу думку зумовлене збільшенням концентрації центрів швидкої рекомбінації (*s*–центрів), які зазвичай пов'язані зі структурними дефектами кристалічної ґратки. Це припущення узгоджується з механізмом утворення твердого розчину, згідно з яким відбувається статистичне заміщення атомів In атомами Ge та Si. Відповідно до рентгеноструктурних досліджень, унаслідок статистичного заміщення атомів In (In^{+3}) атомами Si (Si^{+4}) та Ge (Ge^{+4}) утворюються донорні центри, концентрація яких збільшується зі збільшенням x [9; 10].

На рис. 1 представлено криві спектрального розподілу ФП монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Si(Ge)_xSe_2$ (x=0,1; 0,2), виміряні в неполяризованому світлі. Зміщення спектрів фотопровідності в бік менших довжин хвиль зі збільшенням x засвідчує зменшення ширини забороненої зони кристалів, що добре узгоджується з оптичними дослідженнями [9; 11 – 13].

© Замуруєва О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицький А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н.

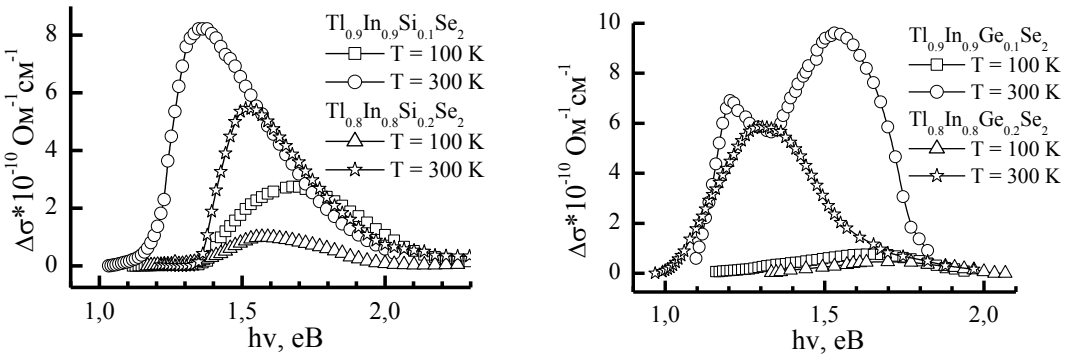


Рис. 1. *Спектральний розподіл фотопровідності кристалів* $Tl_{1-x}In_{1-x}Si_xSe_2$; $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$

Як видно з рис. 1 для кристалів $TlInSe_2$-$SiSe_2$, і для кристалів $TlInSe_2$-$GeSe_2$ зі збільшенням *x* спостерігається зменшення максимуму власної фотопровідності (пік I), що можна пояснити зростанням концентрації *s*–центрів рекомбінації. Водночас великий домішковий фотострум засвідчує, що при статистичному заміщенні In на Si(Ge) утворюються центри повільної рекомбінації (*r*–центри). Таким центрами можуть бути катіонні вакансії, а саме V_{Tl} концентрація яких, згідно з рентгеноструктурними дослідженнями, збільшується зы зростанням *x*. Зростання концентрації *s*–центрів рекомбінації слабо впливає на домішкову фотопровідність, оскільки при домішковому збудженні вільні електрони не утворюються і s-центри практично не беруть участі в рекомбінації.

Характерною особливістю залежностей $\Delta\sigma(\lambda)$ (рис. 1.) є наявність двох максимумів фотопровідності. При цьому максимум I лежить в області смуги власного поглинання. Тому можна припустити, що пік I зумовлений власною фотопровідністю досліджуваних сполук.

При (*x*=0,1; 0,2) енергетичне положення домішкового рівня відносно стелі валентної зони за T =200 К становить 0,23 та 0,21 еВ для кристалів $TlInSe_2$ – $SiSe_2$; 0,32 та 0,27 еВ для кристалів $TlInSe_2$ – $GeSe_2$, що узгоджується з енергією активації темнової провідності [9; 10; 14; 15].

Власний максимум фотопровідності проявляється у вигляді плеча на високоенергетичному спаді домішкової смуги, оскільки при збільшенні температури власна й домішкова смуга фотопровідності перекриваються.

При збільшенні температури збільшується домішкова фотопровідність (рис. 1). Спостережувану особливість можна пояснити фотозбудженням електрона з акцепторного рівня в зону провідності. Дірка, яка утворилась при цьому на акцепторному рівні за високої температури, термічно дозбуджується у валентну зону. З пониженням температури відбувається заповнення дірками акцепторних рівнів, що приводить до зменшення можливості електронних переходів з акцепторного рівня в зону провідності та до «виморожування» домішкової фотопровідності.

Висновки. Таким чином встановлено, що легування компонентами IV групи є надійним способом підвищення домішкової фотопровідності кристалів $TlInSe_2$. Завдяки використанню більш дешевих речовин, таких як Si та Ge, дана технологія дає можливість отримувати вищу фотопровідність досліджуваних напівпровідникових матеріалів сучасної електроніки у широкому діапазоні довжин хвиль при одночасному зниженні вартості цієї технології.

Інформаційні джерела

1. CdTe and CdTe: Cl vapour growth in a semi-closed system / T. Kunz, M. Laasch, I. Meinhardt, K.W. Benz // J. Cryst. Growth. – 1998. Vol. 1-4, № 184-185. P. 1005-1009.

2. Нуритдинов И. Влияние примесей I и IV групп на фотоэлектрические свойства монокристаллов TlInSe2 / И. Нуритдинов, С. Х. Умаров, В. Д. Рустамов // Перспективные материалы. − 2003. − № 1. − С. 46–48.

3. Нуритдинов И. Влияние примесей I и IV групп на фотоэлектрические свойства монокристаллов $TlInSe_2$ / И. Нуритдинов, С. Х. Умаров, В. Д. Рустамов // Перспективные материалы − 2003. − № 1. − С. 46–48.

© Замуруєва О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицький А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н.

4. Bakhyshov A. E. Electrical and Optical Properties of TlInSe Single Crystals / A. E. Bakhyshov, M. F. Agaeva, A. M. Darvish // Phys. Status Solidi B. – 1979. – Vol. 91, № 1. – P. K31–K34.

5. Умаров С. Х. Исследование фотожлектрических свойств твердых растворов $TlInS_{2x}Se_{2(1-x)}$ / С. Х. Умаров, И. Нуритдинов // Перспективные материалы. – 2002. – №3. – С. 25–27.

6. Алиева М. Х. Прилипание основных носителей в монокристаллах р $TlInSe_2$ / М. Х. Алиева, И. В. Алексеев, Ф. Н. Казиев // Изв. АН Азерб.ССР. Сер. физ.-техн. и мат. наук. – 1975. – № 4. – С. 70–76.

7. Некоторые электрические и фотоэлектрические свойства монокристаллов и пленок $TlInSe_2$ / И. А. Карпович, А. А. Червова, Е. А. Леонов, В. М. Орлов // Изв. ВУЗов СССР : Физика. – 1972. – № 5. – С. 157–159.

8. Фотоелектричні дослідження твердого розчину $TlInSe_2$-Si(Ge)Se_2 (x=0,1; 0,2) / І. В. Кітик, Г. Л. Мирончук, О. В. Замуруєва, О. В. Парасюк, А. В. Свідзинський // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Сер. Фіз. науки. – 2015. – № 10(311). – С. 17–21.

9. Structural and Optical Features of Novel $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$ Chalcogenide Crystals / O. V. Zamurueva, G. L. Myronchuk, G. Lakshminarayana, O. V. Parasyuk, L. V. Piskach, A. O. Fedorchuk, N. S. AlZayed, A. M. El-Naggar, I. V. Kityk // Opt. Mater. – 2014. – Vol. 37. – P. 614–620.

10. Photoinduced Optical Properties of $Tl_{1-x}In_{1-x}Si_xSe_2$ Single Crystals / G. L. Myronchuk, O. V. Zamurueva, K. Oźga [et al.] // Arch. Metall. Mater. – 2015. – Vol. 60, № 2. – P. 1051–1055.

11. Дослідження оптичних властивостей шаруватих кристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Si_xSe_2$ / В. Кажукаускас, Г. Мирончук, О. Замуруєва [та ін.] // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки : Фіз. науки. – 2013. – № 26(275). – С. 32–39.

12. Дослідження спектрального розподілу коефіцієнта поглинання монокристалу $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$ (x=0,1; 0,2) / І. В. Кітик, Г. Л. Мирончук, О. В. Замуруєва, О. В. Парасюк, О. С. Мартинюк // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Сер. Фіз. науки. – 2015. – № 10(311). – С. 27–33.

13. Особливості структурних та оптичних властивостей монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$ / О. В. Замуруєва, Г. В. Махновець, Г. Л. Мирончук, М. С. Богданюк, О. В. Парасюк, Л. В. Піскач // Релаксаційні, нелінійні й акустооптичні процеси та матеріали РНАОПМ′2014 : матеріали VII Міжнар. наук. конф., 8–12 черв. 2014 р., м. Луцьк – Шацькі озера, Україна. – Луцьк : Вежа-Друк, 2014. – С. 140–141.

14. Температурна залежність питомої електропровідності монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$ (x = 0,1; 0,2) вдовж та перпендикулярно до шарів / І. В. Кітик, Г. Л. Мирончук, О. В. Замуруєва, О. В. Парасюк, Г.П. Шаварова // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Сер. Фіз. науки. – 2015. – № 10(311). – С.13–17.

15. Hopping conductivity in $Tl_{1-x}In_{1-x}Si_xSe_2$ single crystals / O. Zamurueva, H. Myronchuk, O. Parasyuk, H. Shavarova, L. Piskach // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Сер. Фіз. науки. – 2014. – № 17(294). – С. 21–24.

Замуруева О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицкий А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н.
Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

ПОВЫШЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ КРИСТАЛЛОВ ХАЛЬКОГЕНИДА ИНДИНАТУ ТАЛИЮ ($TlInSe_2$)

В статье рассматривается проблематика повышения фотопроводимости кристаллов халькогенидов индинату талию ($TlInSe_2$). Установлено, что легирование компонентами IV группы является надежным способом повышения примесной фотопроводимости кристаллов $TlInSe_2$, дает возможность оценивать фотопроводимость в большом диапазоне длин волн при одновременном снижении стоимости этой технологии, благодаря использованию более дешевых веществ, таких как Si и Ge. В статье описано модель, которая относится к области производства полупроводниковых материалов и может быть использована в приборах с

© Замуруєва О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицький А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н.

сенсорным управлением, а также в технике гамма-излучения, в частности при изготовлении детекторов тепловых нейтронов.

Ключевые слова: *примесная фотопроводимость, ширина запрещенной зоны, центры рекомбинации.*

O. Zamuruieva Ph.D., A. Kevshyn Ph.D., A. Korovytskyy Ph.D., S. Fedosov D.Sc.
Lesya Ukrainka Eastern European National University, Lutsk

INCREASING THE PHOTOCONDUCTIVITY OF CHALCOGENIDES CRYSTALS TO TITANIUM ($TlInSe_2$)

The article deals with the problems of increasing the photoconductivity of chalcogenides crystals to titanium ($TlInSe_2$). It has been established that alloying with components of group IV is a reliable way to increase the impurity photoconductivity of $TlInSe_2$ crystals, which makes it possible to estimate photoconductivity in a large range of wavelengths while simultaneously reducing the cost of this technology, due to the use of cheaper substances such as Si and Ge. The article describes a model that relates to the field of semiconductor materials production and can be used in sensory control devices, as well as in gamma radiation technology, in particular in the manufacture of heat neutron detectors.

Keywords: *impurity photoconductivity, width of the forbidden zone, centers of recombination.*

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018.

© Замуруєва О.В., к.ф.-м.н., Кевшин А.Г., к.ф.-м.н., Коровицький А.М., к.ф.-м.н., Федосов С.А. д.ф.-м.н.

УДК 621.396

Караченцев В.Є., Денисюк В.Ю., к.т.н.
Луцький національний технічний університет

ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВИХ СИГНАЛІВ

У статті розглянуті аналогові гармонійні, складні періодичні та складні неперіодичні сигнали, за допомогою яких передається повідомлення вимірювальної інформації. При передачі інформації відбувається перетворення повідомлення в сигнал. Амплітуда, частота і фаза є інформативними параметрами електричних аналогових сигналів.

Подані основні параметри і характеристики аналогових сигналів, амплітудні та дискретні спектри сигналів. Наведені спектральні функції сигналів та визначення спектральної щільності амплітуди для аналогових неперіодичних сигналів і сигналів з дискретним спектром. Математично визначена спектральна щільність амплітуди аналогових неперіодичних сигналів та сигналів з дискретним спектром.

Подані рекомендації для визначення необхідної ширини дискретного спектру в межах якого зосереджена основна енергія сигналу. Інформативні параметри електричних сигналів використовуються для передачі інформації по системах зв'язку.

Ключові слова: *сигнал, інформативний параметр, гармоніки, амплітуда, спектральна функція.*

Постановка проблеми. Повідомлення як матеріальна форма подання інформації передається на будь-яку віддаль за допомогою сигналів. Сигнал як матеріальний носій інформації представляє собою деякий фізичний процес один із параметрів якого функціонально зв'язаний з вимірювальною величиною. Такий параметр називають інформативним [2].

У більшості випадків у якості сигналів використовуються електричні процеси (струм, напруга, електромагнітне поле), які зручніше піддаються перетворенню ніж процеси іншої фізичної природи. Сигнали можуть бути неперервними і дискретними як за станом так і за часом. Кількість можливих значень дискретного за станом сигналу обмежено. Сукупність цих значень створює алфавіт [2]. Дискретні за станом повідомлення можуть бути вільно передані неперервним сигналом, оскільки в множині значень неперервних величин містяться всі дискретні. Елементи, за допомогою яких здійснюється передача повідомлень, включаючи джерело і приймач повідомлень створюють систему зв'язку [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Обробка сигналів має велике фундаментальне і прикладне значення в сучасній метрології й інформаційно-вимірювальній техніці. Її методи широко застосовуються для розробки і дослідження засобів вимірювальної техніки різного призначення, а засоби – для їх аналогової або апаратно-програмної реалізації. В системах зв'язку сигнал переносить повідомлення певного змісту (воно складається з різного роду знаків або символів). Його, зазвичай, потрібно передати на деяку відстань користувачу. У випадку передачі телеметричних даних повідомлення є функцією у часі, наприклад, виміряних значень температури, тиску повітря тощо [4]. Тобто в цьому випадку в сигналі передається повідомлення про результати вимірювань певних параметрів оточуючого середовища та іншої інформації.

Постановка завдань. Розрізняють гармонічні, складні періодичні та складні неперіодичні аналогові сигнали. Гармонічний сигнал є синусоїдною (косинусоїдою) функцією часу.

Складний періодичний сигнал є безперервною несинусоїдною функцією, закон зміни якої повторюється через рівні проміжки часу. Сукупність амплітуд гармонічних складових складного сигналу називається амплітудним спектром сигналу. Складний періодичний сигнал має лінійний спектр, що складається з ряду ординат розділених інтервалами, які дорівнюють частоті складного сигналу. Такі спектри називаються дискретними.

Область частот, в яких зосереджена велика частина енергії сигналу називається шириною спектру. Реальна ширина спектру сигналу обмежена визначеними нижньою і верхньою граничними частотами, в межах яких зосереджена основна енергія сигналу. Обмеження ширини спектру не тільки зменшує енергію, що передається, але і викликає спотворення форми сигналів. Тому обмеження спектру при передачі сигналів повинне переводитись з урахуванням обох цих чинників.

© Караченцев В.Є., Денисюк В.Ю., *к.т.н.*

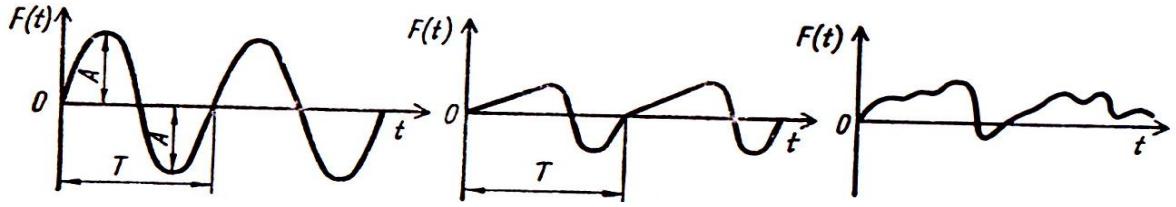
Предметом даної статті є розгляд основних властивостей, характеристик і параметрів аналогових сигналів, які являються інформативними в системах зв'язку.

Викладення основного матеріалу. Безперервні за часом і станом сигнали називаються *аналоговими.* Математично аналоговий сигнал є безперервною функцією часу $S = f(t)$. Розрізняють гармонійні, складні періодичні та складні неперіодичні сигнали.

Гармонійний сигнал (рис. 1, а) є синусоїдною (косинусоїдною) функцією часу:

$$F(t) = A\sin(\omega t + \psi), \tag{1}$$

де A – максимальне значення (амплітуда) функції; ω — кругова частота, пов'язана з періодом функції T співвідношенням $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$; ψ – початкова фаза функції (початковий фазовий кут).



а) б) в)

Рис. 1. Форми тимчасових характеристик різних сигналів:
а – гармонічного; б – складного періодичного; в – складного неперіодичного

Складний періодичний сигнал (рис. 1, б) є безперервною несинусоїдною функцією, закон зміни якої повторюється через рівні проміжки часу. Час (T), після закінчення якого значення функції починають повторюватися, називається *періодом.* Складна періодична функція, якщо вона задовольняє умовам Діріхле (тобто має впродовж періоду кінцеве число розривів першого роду, максимумів і мінімумів і не має розривів другого роду), може бути представлена у вигляді ряду з нескінченним числом членів [4].

Перший член ряду є постійна, яка в певних випадках може бути рівна нулю; решта членів є гармонійними функціями часу, частоти яких кратні частоті розкладеної в ряд періодичної функції.

Ці функції називаються *гармоніками.* Синусоїдна функція з круговою частотою ω називається першою (або основний) *гармонікою, функція* з частотою 2ω – другою *гармонікою і так далі.* Всі гармоніки (окрім основної) називаються вищими.

Для більшості безперервних періодичних функцій амплітуди гармонік убувають із збільшенням їх частоти, що дозволяє приблизно розглядати складний періодичний сигнал як такий, що складається з постійної і декількох синусоїдних складових з частотами, кратними частоті даного сигналу [2].

Основна формула розкладання періодичної функції в ряд Фур'є записується наступним чином:

$$\begin{aligned} F(t) &= A_0 + A_1\sin(\omega t + \psi_1) + A_2\sin(2\omega t + \psi_2) + \text{K} + \\ &+ A_n\sin(n\omega t + \psi_n) + \text{K} = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n\sin(n\omega t + \psi_n). \end{aligned} \tag{2}$$

У це розкладання входять постійна складова A_0 і синусоїдної функції (гармоніки) з амплітудами A_n, частотами $n\omega$ і фазовими кутами ψ_n.

Для того, щоб утворити ряд з гармонійними функціями без початкових фазових кутів, скористаємося відомою формулою [4]:

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta;$$

тоді

$$A_n\sin(n\omega t + \psi_n) = A_n\cos\psi_n\sin n\omega t + A_n\sin\psi_n\cos n\omega t.$$

Позначивши

$$A_n\cos\psi_n = a_n; \tag{3}$$

$$A_n\sin\psi_n = b_n, \tag{4}$$

Отримаємо:

$$A_n \sin(n\omega t + \psi_n) = a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t \,. \tag{5}$$

Таким чином, ряд Фур'є набере вигляду:

$$F(t) = A_0 + a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t + \text{K} + a_n \sin n\omega t + \text{K} + b_1 \cos \omega t +$$
$$+ b_2 \cos 2\omega t + \text{K} + b_n \cos n\omega t = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) \tag{6}$$

Якщо відомий аналітичний вираз функції *F(t),* то складові ряду (6) можна визначити за формулами [5]:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) dt \tag{7}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \sin n\omega t dt \tag{8}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F(t) \cos n\omega t dt \tag{9}$$

Як випливає з формули (7), постійна складова є середнє значення функції за період *T.*

Для функцій, заданих графічно, розроблені наближені способи обчислення коефіцієнтів ряду.

Якщо відомі коефіцієнти ряду (6), то можна повернутися до ряду (2) з одними синусоїдами. При цьому амплітуди і фазові кути функції можуть бути визначені за формулами [4]:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \,; \tag{10}$$

$$\cos \psi_n = a_n / A_n \,; \tag{11}$$

$$\sin \psi_n = b_n / A_n \,. \tag{12}$$

Слід мати на увазі, що для визначення фазового кута, який може приймати значення в межах 0 – 2π, необхідно знати значення однієї з функцій (синуса або косинуса) і знак обох функцій [5].

У деяких випадках зручно користуватися представленням ряду Фур'є в комплексній формі:

$$F(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(in\omega t) \tag{13}$$

яка виходить шляхом перетворення виразу (6) з використанням формули Ейлера ($\cos\alpha + i \sin\alpha = e^{i\alpha}$).

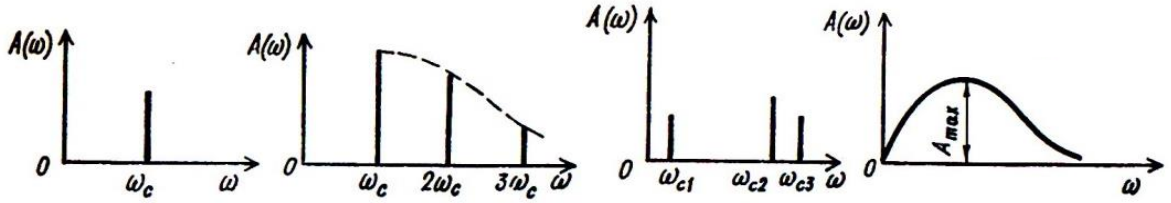
Розкладання в ряд має цілком реальну фізичну суть: будь-яка з складових сигналу може бути виділена за допомогою пристроїв, що розділяють сигнали за частотою.

Сукупність амплітуд гармонійних складових складного сигналу називається *амплітудним спектром сигналу* (рис. 2). Як видно з рисунка, амплітудний спектр гармонійного сигналу в координатній системі частота-амплітуда є однією вертикальною лінією, абсциса якої відповідає частоті сигналу ω_c (рис. 2, а).

Складний періодичний сигнал має лінійчатий спектр, що складається з ряду ординат, розділених інтервалами, рівними частоті складного сигналу (рис. 2, б). Такі спектри називаються *дискретними* [3].

Область частот, в якій зосереджена велика частина енергії сигналу, називається *шириною спектру.*

Неперіодичні аналогові сигнали також можуть мати дискретний спектр. Так, наприклад, при складанні декількох гармонійних сигналів різної частоти, якщо відносини частот доданків виражаються ірраціональними числами, виходить неперіодичний сигнал, проте спектр його є дискретним, оскільки містить тільки його гармонійні складові (рис. 2, б). Неперіодичні сигнали з дискретним спектром називаються *квазіперіодичними* (майже періодичними).



а) б) в) г)

Рис. 2. Амплітудні спектри сигналів

Проте більшість аналогових неперіодичних сигналів не мають дискретного спектру. Розглядаючи неперіодичну безперервну функцію (рис. 1, в) як періодичну з періодом $T \to \infty$, можна уявити собі розкладання такої функції в ряд Фур'є, в якому частотний інтервал між складовими $\omega = 2\pi / t \to 0$. У цьому випадку спектр виявиться суцільним, таким, що містить складові на всіх частотах в інтервалі 0 – ∞. Такий спектр називається безперервним.

Очевидно, енергія, що припадає на частку кожної з складових сигналу при нескінченно великій їх кількості, є величина нескінченно мала, в чому можна переконатися на підставі формул (8) і (9), в яких множник $2/T$ в даному випадку прямує до нуля. Тому розкладання неперіодичних функцій в ряд Фур'є реального значення не має.

Не проводячи математичних перетворень, вкажемо, що при граничному переході ($T \to \infty$) з формули (2) розкладання функції в ряд Фур'є може бути отриманий вираз [4]:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \tag{14}$$

назва якого *зворотне перетворення Фур'є.*

В результаті зворотного перетворення Фур'є функція часу $F(t)$ виражається через комплексну функцію частоти $S(\omega)$, яка характеризує спектральні властивості даної функції.

Зіставляючи вираз зворотного перетворення Фур'є з розкладанням (2), можна виявити формальну аналогію між ними. Іншими словами, зворотне перетворення Фур'є представляє неперіодичну функцію у вигляді інтегральної суми нескінченно малих гармонійних функцій з комплексними амплітудами в безперервному спектрі частот.

Комплексна функція $S(\omega)$ носить назву *спектральної функції:*

$$S(\omega) = A \exp[-i\varphi(\omega)] \tag{15}$$

Модуль спектральної функції A називається *спектральною щільністю амплітуди.* За фізичним змістом спектральна щільність амплітуди є межею відношення суми амплітуд складових сигналу, розміщених у смузі частот $\Delta\omega$, до ширини цієї смуги при спрямуванні її до нуля:

$$A = \lim_{\Delta\omega \to 0} \frac{\sum A(\Delta\omega)}{\Delta\omega}. \tag{16}$$

Приклад залежності спектральної щільності амплітуди від частоти показаний на рис. 2, г.

Для функції з дискретним спектром також застосовне поняття спектральної щільності амплітуди, при цьому для її обчислення можна користуватися формулою (16) для кінцевого, але достатньо малого інтервалу $\Delta\omega$.

Оскільки будь-який сигнал володіє кінцевою енергією то кінцева енергія його спектру. Реальна ширина спектру сигналу, як вже було сказано, обмежена визначеними *нижньою* і *верхньою граничними частотами* $\omega_н$ і $\omega_в$, в межах яких зосереджена основна енергія сигналу [1].

Слід мати на увазі, що обмеження ширини спектру не тільки зменшує передавальну енергію, але і викликає спотворення форми сигналів. Тому обмеження спектру при передачі сигналів повинне проводитися з урахуванням обох цих чинників [4].

Для визначення ширини дискретного спектру прийнято знаходити верхню і нижню граничні частоти так, щоб до складу спектру входили складові з амплітудою не меншою, ніж 0,1 максимальної амплітуди.

Висновки. Проведений розгляд основних властивостей, характеристик і параметрів аналогових сигналів. Наведені спектральні функції та амплітудні спектри сигналів.

Математично визначена спектральна щільність амплітуди аналогових неперіодичних сигналів та сигналів з дискретним спектром.

Подані рекомендації для визначення необхідної ширини дискретного спектру в межах якого зосереджена основна енергія сигналу.

Інформативні параметри електричних сигналів використовуються для передачі повідомлень (інформації) по системах зв'язку.

Інформаційні джерела

1. Антонов В.М. Сучасні комп'ютерні мережі / В.М. Антонов. – К: «МК – Прес», 2005. – 480 с.

2. Караченцев В.Є., Денисюк В.Ю. Перетворення та оцифровування електричних сигналів / "Перспективні технології та прилади". Збірник наукових праць. Випуск 11(2). м. Луцьк, грудень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 40–46.

3. Караченцев В.Є. Комп'ютерна електротехніка: теорія і практикум / В.Є. Караченцев., В.О. Ліщина. – Луцьк: ВАТ «Волинська обласна друкарня», 2009. – 351с.

4. Могилевський М.М. Общая радиотехника / Могилевський М.М., Анохина Н.Д., Бревда Н.Н. – 2 – е изд; перераб. и доп. – К.: Высшая шк. Головное изд-во, 1985. – 287с.

5. Рябенький В.М. Цифрова схемотехніка: навч. посібник / Рябенький В.М., Жуйков В.Я., Гулий В. Д. – Львів: «Новий світ – 2000», 2009. – 736 с.

Караченцев В.Е., Денисюк В.Ю.
Луцкий национальный технический университет

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

В статье рассмотрены аналоговые гармоничные, сложные периодические и сложные непериодические сигналы, с помощью которых передается сообщение измерительной информации. При передаче информации происходит преобразование сообщения в сигнал. Амплитуда, частота и фаза являются информативными параметрами электрических аналоговых сигналов.

Представлены основные параметры и характеристики аналоговых сигналов, амплитудные и дискретные спектры сигналов. Приведены спектральные функции сигналов и определения спектральной плотности амплитуды для аналоговых непериодических сигналов с дискретным спектром. Математически определена спектральная плотность амплитуды аналоговых непериодических сигналов и сигналов с дискретным спектром.

Даны рекомендации для определения необходимой ширины дискретного спектра в пределах которого сосредоточена основная энергия сигнала. Информативные параметры электрических сигналов используются для передачи информации в системах связи.

Ключевые слова: *сигнал, информативный параметр, гармоники, амплитуда, спектральная функция.*

V. Karachentsev, V. Denysiuk
Lutsk National Technical University

MAIN PROPERTIES AND CHARACTERISTICS OF ANALOGAL SIGNALS

The article deals with analog harmonic, complex periodic and complex non-periodic signals, by means of which the message of measurement information is transmitted. When information is transmitted, the message is converted into a signal. Amplitude, frequency and phase are informative parameters of electric analog signals.

The main parameters and characteristics of analog signals, amplitude and discrete spectrum of signals are presented. The spectral functions of signals and the determination of amplitude spectral density for analog non-periodic signals and signals with a discrete spectrum are given. The spectral density of the amplitude of analog no periodic signals and signals with a discrete spectrum is mathematically determined.

The recommendations are given to determine the required width of the discrete spectrum within which the main signal energy is concentrated. Informative parameters of electric signals are used for the transmission of information in communication systems.

Key words: *signal, informative parameter, harmonics, amplitude, spectral function.*

Стаття надійшла до редакції 24.03.2018

© Караченцев В.Є., Денисюк В.Ю., *к.т.н.*

UDC 681.2.08
T. Yu. Kisil, *Ph.D., associate professor*
L.G. Kunytska, *Ph.D., associate professor*
V.V. Tuz, *Ph.D., associate Professor*
Cherkasy State Technological University

SPECIFYING THE FORM OF IMMERSION PROBE IN THE PIEZOELECTRIC LIQUID VISCOSIMETERS FOR IMPROVING MEASUREMENT ACCURACY

The paper is devoted to the choice of the optimal form for the immersion probes in piezoelectric fluidimeters. It is known that viscosity provides the best understanding of liquids, of changing their states and can be considered as one of the main characteristics. To avoid errors of measurements conducted with the help of piezoelectric converters of the viscosity, which can occur as a result of ultrasonic radiation losses, the authors suggested to divide the converter into a vibrator and a probe that is moving in the liquid and connected with the vibrator using a rigid thrust. The vibrator should not be sunk into the liquid. The probe is the most effective in the form of a polished plate with sharpened edges. An additional point is that the cavitation bubbles can appear on the edge of the vibrator while it is moving and thus affect the measurement accuracy. Construction of the device for implementing the suggested and conducted computerized modelling is introduced, to specify the definitive probe form. Outcomes of the computerized modelling proved the polished plate with sharpened edges to be the most effective probe form. Probe linear travel (therefore, oscillation frequency and range) should be defined in the way that the Reynolds number does not exceed the critical value (Re<<2300).

Key words: *viscosity, liquid, ultrasonic method, piezoelectric measuring device, immersion probe, Reanold number.*

Introduction. Liquid - a substance in a liquid aggregate state that occupies an intermediate position between solid and gaseous states. The main property of a liquid, which distinguishes it from substances in other aggregate states, is the ability to infinitely change the shape under the action of tangential mechanical stresses, even arbitrarily small, while its volume is practically retained. The liquid state is usually considered to be an intermediate between solids and gas: gas retains neither volume nor shape while solids retain both. In hydrodynamics, liquids are divided into Newtonian and not Newtonian. The flow of Newtonian fluid complies the Newton's law of viscosity, that is, the tangential stress and gradient of velocity are linearly dependent. The coefficient of proportionality between these quantities is known as viscosity. In a non-Newtonian fluid, the viscosity depends on the velocity gradient. Viscosity provides the best understanding of liquids, of changing their states and can be considered as one of the main characteristics. [1, 2, 3].

Viscosity is the property of the liquid to provide resistance to the relative shear displacement. The viscosity appears in the fact that with a relative displacement of fluid layers, the fluid layer that is moving slower "slows down" the layer that moves faster, and vice versa [4]. The viscosity is determined by the presence of the attraction forces between the individual particles (molecules) of the fluid, which restrain the movement of the layers when one part of the liquid is moved relatively to another one. It is obvious that all liquids must be viscous, since there are always forces of both attraction and repulsion between real molecules. Balance between these forces determines the balanced state of the fluid.

The purpose of the work is to select the most optimal form for the immersion probe in piezoelectric viscometers.

As it was already noted, the attenuation of a piezoelectric converter oscillations depends on internal friction in piezoceramics, radiation losses in the liquid and the viscosity of this liquid. It was previously defined [5] that the internal friction in piezoceramics is constant, while radiation losses depend on the depth of a vibrator immersion in a fluid (piezoelectric element or ultrasonic concentrator).

In addition, cavitation bubbles [6] may occur at the end of the vibrator during its motion in the liquid. It also causes errors in the measurements of viscosity.

The motion of solids in a liquid, which equals the flowing solids around by liquids, represents one of the most important problems of hydromechanics [7]. The main task here is to determine the

© T. Yu. Kisil, Ph.D., associate professor,L.G. Kunytska, Ph.D., associate professor,V.V. Tuz, Ph.D., associate Professor

forces that arise in the relative movement of a body and a fluid. The body moving in the liquid meets resistance, and must apply some force to overcome it. This will be, for example, the resistance met by an airplane, car or train from the air when it's moving, or met by a ship or submarine from the water [8]. In the case when the body is motionless and the fluid flows it around, the body provides resistance for the movement of the liquid, and it takes some energy for the fluid to overcome it. An example of this is the pressure of wind on the building, the winding of a bridge with water, etc.

Let us consider *the case of* flowing a plate by a fluid, when a plate is set perpendicular to the flow velocity. The fluid jets, when meet with the plate, exert additional pressure due to the change in the direction of flow, to the surface of the plate, faced towards the flow. Resistance force equal to the magnitude of the additional force of pressure on the plate acts on the liquid from the side of the plate. Immediately behind the plate, as a result of tearing off the jet from the plate, a region of random eddy movement is formed. In this area, the pressure is lowered, resulting in an additional resistance force, also directed toward the flow. Since this force depends on the shape of the body, it is called the shape resistance.

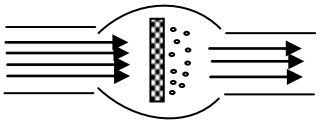


Fig.1. Flowing around a plate that is perpendicular to the direction of the flow

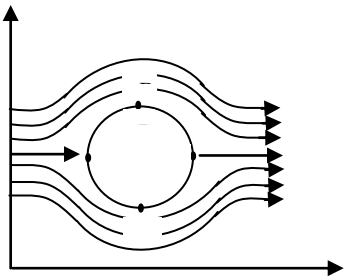


Fig.2. Flowing a cylinder around by a viscous fluid

If the plate is located along the flow, the resistance it produces is caused mainly by the tangential forces of friction that arise on the side surfaces of the plate (the so-called frictional resistance, proportional to the viscosity).

Let us consider the flowing of a circular cylinder by a stream of non-inhomogeneous fluid (without friction).

The pattern of the flow (Fig. 2) is symmetrical: on the lateral surfaces of the cylinder the flow is accelerated, and on the front and aft surfaces it is slowed down. At critical points, the flow velocity is zero, and the pressure has a maximum value that is the same for both points.

When the cylinder is flown around by a real (viscous) liquid, particles which are moving next to its surface lose part of the kinetic energy under the influence of frictional forces. As the velocity increases, the zone of return flow increases and a large vortex is developed from it. After, the vortex breaks away from the streamlined body and flows downstream. A new vortex arises in its place, which also breaks away, etc. The formation of vortices over the streamlined body leads to a decrease of the pressure in the foramen part of the cylinder in comparison with the pressure in the unperturbed flow [9]. The distribution of pressure across the surface of the cylinder flown through a viscous liquid is shown on Fig. 3.

In the front (nasal) part of the cylinder, the pressure is practically the same as the pressure which occurs when the perfect fluid moves.

As it approaches the stern, the pressure on the cylinder surface becomes smaller than in the corresponding places of the cylinder, streamlined by an ideal fluid.

Thus, forces in front of the cylinder and behind it do not compensate each other. The equivalent forces of pressure on a streamlined body directed toward the flow of fluid, cause pressure resistance.

A similar pattern is observed in the flow of liquid bodies of another form. In addition, the shape of the streamlined body significantly determines the nature of the pressure distribution, and, consequently, the value of the resistance of the pressure.

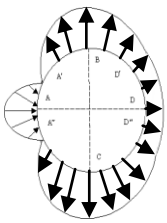


Fig.3. Pressure distribution during the flowing a cylinder around by a viscous fluid

© T. Yu. Kisil, Ph.D., associate professor,L.G. Kunytska, Ph.D., associate professor,V.V. Tuz, Ph.D., associate Professor

As it is known, the number of Reynolds is significantly affected by the nature of flow. For example, in the case of streaming a ball at very small numbers Re <1 the resistance coefficient is determined by the Stokes theoretical formula [10].

Table 1.

Coefficients of resistance to pressure of some bodies

Body shape	$R_{pressure}$	Re
Sphere	0,47	1000-300000
Round cylinder	0,22	>300000
Cube	1,2	<200000

Based on the material above, the probe should be made in the form of a thin polished plate with sharpened edges to reduce cavitation processes [11].

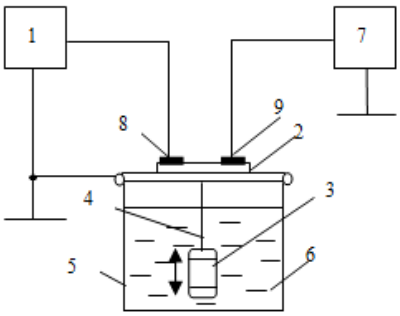
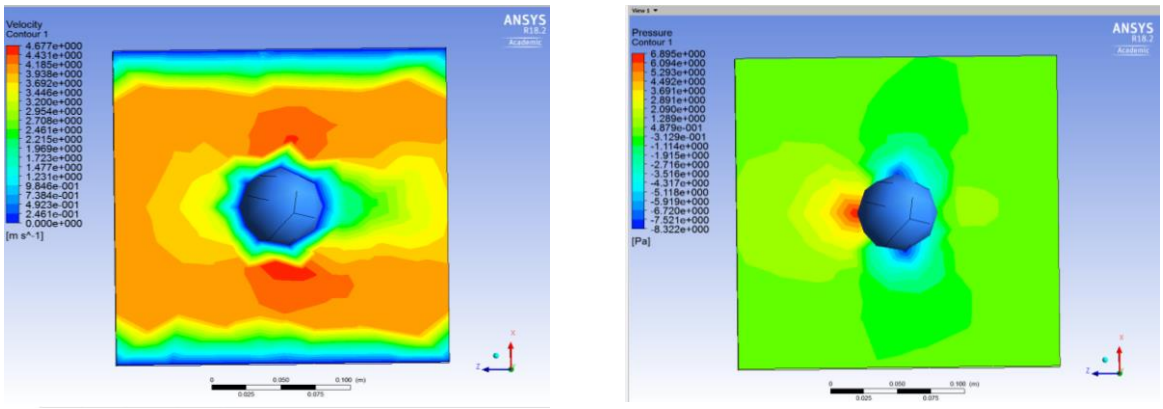
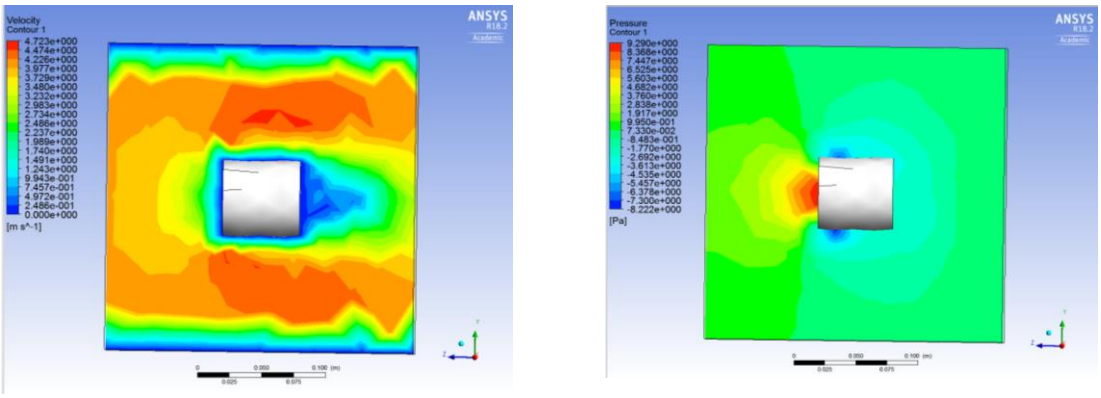


Fig. 4. Device for measuring the viscosity of a fluid with a probe:
1 - generator of electric oscillations; 2 - vibrator in the form of an asymmetric bimorphic piezoelectric element; 3 - probe; 4 - hard drive; 5 - vessel; 6 - liquid; 7 - counter; 8 - input system of electrodes; 9 - output system of electrodes

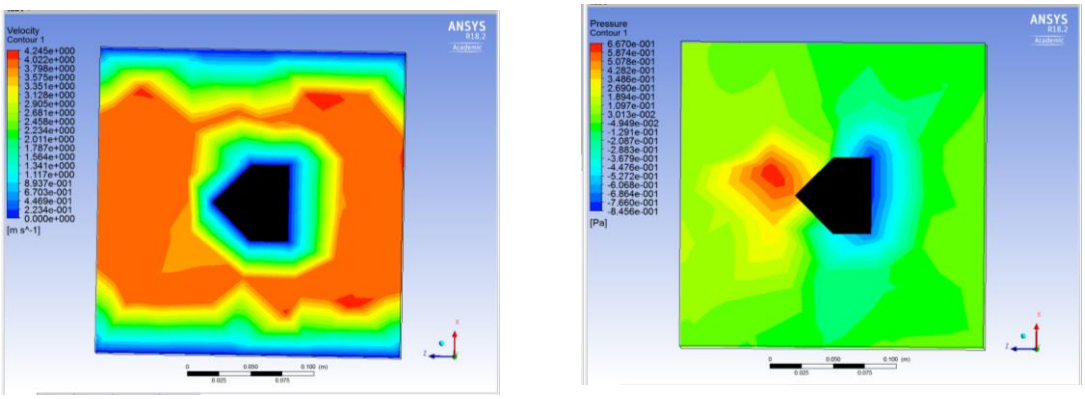
Results of the computerized modelling made using the ANSYS R18.2 program were collected. The process of fluid flowing past objects of different geometric forms – sphere, cylinder, plate with sharpened edges, was simulated (Fig. 5). Based on the matter, probe should be in the form of the fine polished plate with sharpened edges to decrease cavitation processes and therefore improve the measurement accuracy [11].



a) - sphere



b) - cylinder



c) – plate with sharpened edges

Fig. 5. Allocation of velocity and pressure when fluid flows past objects of different geometric forms: a) – sphere, b) – cylinder, c) – plate with sharpened edges

Conclusions. Thus, in order to reduce the measurement errors caused by ultrasonic radiation losses, it is possible to divide the converter into a vibrator and a probe that is moving in the liquid and connected with the vibrator using a rigid thrust. The vibrator should not be sunk into the liquid. The probe is the most effective in the form of a polished plate with sharpened edges. The linear velocity of the probe motion (and hence the frequency and amplitude of the oscillations) must be chosen in such a way for the Reynolds number not to exceed the critical value (Re <2300).

Bibliography

1. Vargaftik, N.V. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey / N.V. Vargaftik. – M.: Nauka, 1972. – 720 s.

2. Rid, R. Svoystva gazov i zhidkostey: sprav. posobiye: per. s angl. / R. Rid, Dzh. Prausnits, T. Shervud; pod red. B.I. Sokolova. – 3-ye izd., pererab. i dop. – L.: Khimiya, 1982. – 592 s.

3. Teplofizicheskiye svoystva zhidkostey / otv. red. d.t.n. Z.I. Geller. – M.: Nedra, 1973. – 546 s.

4. Shterenlikht, D.V. Gidravlika: uchebnik dlya vuzov / D.V. Shterenlikht. − M.: Energoatomizdat, 1984. − 640 s.

5. Sharapov V.M. i dr. O vliyanii davleniya na vnutrenneye treniye p'yezokeramiki TSTS// Izvestiya VUZov SSSR – Fizika,1976, №9

6. Roy I.A. Vozniknoveniye i razvitiye ul'trazvukovoy kavitatsii - Akust. zhur., №3, 1,3, 1957.

7 Aerogidromekhanika: Uchebnik dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy/ Ye. N. Bondarev, V. T. Dubasov, YU. A. Ryzhov i dr. – M.: Mashinostroyeniye, 1993. – 608 s. 2

8. Prostakov A.L. Gidroakustika i korabl' – Leningrad – Sudostroyeniye, 1967.

9. Kisil' T. YU. Ul'trazvukovoy metod, p'yezoelektricheskiye preobrazovateli i ustroystva kontrolya vyazkosti zhidkosti povyshennoy tochnosti dlya sistem upravleniya. Kand.. dis., ONPU, 2003. – s.137

© T. Yu. Kisil, Ph.D., associate professor,L.G. Kunytska, Ph.D., associate professor,V.V. Tuz, Ph.D., associate Professor

10. Konstantinov YU.M. Gidravlika // Vishcha shkola. – Kiyev, 1981. - 413 s.

11. atent kra ni №613 6 , 01 11 00, l. №11, 003. ristr dl a im r ann a v´ azkost r dini Sharapo V.M., K s l' T.Y .

8. Prostakov A.L. Gidroakustika i korabl' – Leningrad – Sudostroyeniye, 1967.

9. Kisil' T. YU. Ul'trazvukovoy metod, p'yezoelektricheskiye preobrazovateli i ustroystva kontrolya vyazkosti zhidkosti povyshennoy tochnosti dlya sistem upravleniya. Kand.. dis., ONPU, 2003. – s.137

10. Konstantinov YU.M. Gidravlika // Vishcha shkola. – Kiyev, 1981. - 413 s.

11. atent kra ni №613 6 , 01 11 00, l . №11, 003. r istr dl a im r ann a v´ azkost r dini Sharapo V.M., K s l' T.Y .

Т.Ю. Кисиль, к.т.н., доцент; Л.Г. Куницкая, к.т.н., доцент; В.В. Туз, к.т.н., доцент
Черкасский государственный технологический университет

ВЫБОР ФОРМЫ ПОГРУЖНОГО ЗОНДА В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Работа посвящена вопросу о выборе оптимальной формы погружного зонда в пьезоэлектрических измерителях вязкости жидкости. Как известно, вязкость дает наилучшее представление про жидкости, про изменение ее состояния и может считаться одной из основных характеристик. Авторами предложено для уменьшения погрешности измерения с помощью пьезоэлектрических преобразователей вязкости жидкости, обусловленную ультразвуковыми потерями на излучение, разделить преобразователь на собственно вибратор и соединенный с вибратором жесткой тягой зонд, движущийся в жидкости. Наиболее эффективен зонд в виде полированной пластинки с заостренными кромками. Кроме того, при движении в жидкости в торце вибратора могут возникнуть кавитационные пузырьки, влияющие на точность измерения вязкости. Приведена конструкция устройства, реализующего предложенное и проведено компьютерное моделирование с целью выявления оптимальной формы зонда. Результаты компьютерного моделирования доказали, что наиболее эффективный зонд в виде полированной пластинки с заостренными краями. Линейная скорость движения зонда (а следовательно, частота и амплитуда колебаний) должны выбираться такими, чтобы число Рейнольдса не превышало критическое значение (Re<<2300).

Ключевые слова: *вязкость, жидкость, ультразвуковой метод, пьезоэлектрический измеритель, погружной зонд, число Рейнльдса*

Т.Ю. Кісіль, к.т.н., доцент; Л.Г. Куницька, к.т.н., доцент; В.В. Туз, к.т.н., доцент
Черкаський державний технологічний університет

ВИБІР ФОРМИ ПОГРУЖНОГО ЗОНДУ В П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАЧАХ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ

Робота присвячена питанню щодо вибору оптимальної форми погружного зонда в п'єзоелектричних вимірювачах в'язкості рідини. Як відомо, в'язкість дає найкраще уявлення про рідини, про зміну її стану і може вважатися однією з основних характеристик. Авторами запропоновано для зменшення похибки вимірювання за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів в'язкості рідини, обумовлену ультразвуковими втратами на випромінювання, розділити перетворювач на власне вібратор і з'єднаний з вібратором жорсткою тягою зонд, що рухається в рідині. Найбільш ефективний зонд у вигляді полірованої пластинки з загостреними краями. Крім того, при русі в рідини в торці вібратора можуть виникнути кавітаційні бульбашки, що впливають на точність вимірювання в'язкості. Наведено пристрій розроблений таким чином, що реалізує запропоноване і проведено комп'ютерне моделювання з метою виявлення оптимальної форми зонда. Результати комп'ютерного моделювання довели, що найбільш ефективний зонд у вигляді полірованої пластинки з загостреними краями. Лінійна швидкість руху зонда (а отже, частота і амплітуда коливань) повинні вибиратися такими, щоб число Рейнольдса не перевищувало критичне значення (Re<<2300).

Ключові слова: *в'язкість, рідина, ультразвуковий метод, п'єзоелектричний вимірювач, погружний зонд, число Рейнольдса*

Стаття надійшла до редакції 08.05. 01 8.

© T. Yu. Kisil, Ph.D., associate professor,L.G. Kunytska, Ph.D., associate professor,V.V. Tuz, Ph.D., associate Professor

УДК 621.891
Є.В. Корбут, канд.тех. наук, доцент, Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського

ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ ВПКМ ПРОЦЕСОМ РІЗАННЯМ

Анотація. Перспективи розвитку нової техніки, особливо авіаційної та космічної, насьогодні пов'язують зі широким використанням композиційних матеріалів, унікальність властивостей яких дозволяє у багатьох випадках значно підвищити експлуатаційні характеристики конструкційний виробів, а також знизити трудоємність і матеріалоємність їх виготовлення, сприяючи тим самим росту конкурентоздатності вітчизняної продукції на світовому ринку. Реалізація можливостей конструкційних властивостей, закладених у композитах, залежить від ступеня гарантованого забезпечення якості виробів на етапі їх механічної обробки.

Найбільш технологічно складними задачами при виготовленні виробів з композиційних матеріалів є підвищення працездатності механічної обробки (точіння, свердлення та ін.) і, у тому числі інструменту, від характеристик якого залежить надійність та економічність його роботи за умов високих швидкостей, навантажень, температур, хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом, а також високих вимог до геометрії обробки та якості оброблених поверхонь. Процеси різання характеризуються складністю та різноманітністю, що зумовлено широким колом інструментальних матеріалів та оброблюваних деталей.

Ключові слова: різання, композитні матеріали, стружкоутворення, сили різання, інструмент температура різання.

На теперішній час прогрес в авіабудуванні, автобудуванні та в інших галузях промисловості в основному пов'язується з розробкою і широким застосуванням композиційних матеріалів (КМ) [1-4]. КМ мають комплекс властивостей і особливостей, що відрізняються від традиційних конструкційних матеріалів (металевих сплавів) і в сукупності відкривають широкі можливості як для вдосконалення існуючих конструкцій найрізноманітнішого призначення, так і для розробки нових конструкцій і технологічних процесів. Створення композиційних матеріалів має на меті наступні цілі: здешевлення матеріалів, одержуваних на основі комбінації тих або інших речовин з меншою вартістю, у порівнянні з металами; додання цим матеріалам бажаного комплексу властивостей; зниження питомої маси; збільшення строків старіння і т.д.

Варто звернути увагу на те, що ніколи не вдається досягти всіх зазначених позитивних властивостей в одній композиції. Більше того, досягнення тих або інших бажаних властивостей систем часто супроводжується й появою негативних явищ, наприклад, утрудненнями в обробці різанням композицій, що різко ускладнює одержання з них виробів, небажано змінює деякі фізико-механічні показники системи. Тому важливим є розглянути процес різання ВПКМ.

У зв'язку із наявністю високих міцнисних властивостей у композиційних матеріалів на полімерній основі необхідно звернути увагу на особливості процесу різання полімерних композиційних матеріалів.

Щоб оцінити властивості цих матеріалів з точки зору оброблюванності їх різанням необхідно перш за все розглянути основні питання механізму стружкоутворення, рівень сил, деформацій і температур, які виникають у процесі різання.

Про явища, які виникають в процесі різання будь якого матеріалу, а також про якість оброблюваних поверхонь в найбільшій мірі дозволяє судити механізм стружкоутворення.

Так як ВПКМ проявляють високу анізотропію внаслідок своєї пошарової структури, то саме це суттєво змінює процес стружкоутворення при їх різанні, роблячи його абсолютно несхожим на процеси різання металічних матеріалів, в тому числі і хрупких.

За данними досліджень [5, 6] при різанні ВПКМ спостерігаються різні типи стружок. Дослідження показують, що механізм стружкоутворення і тип стружки при різанні цих композиційних матеріалів залежить від кута направленості волокон по відношенню до вектора швидкості і головного руху, переднього кута γ інструменту, радіуса округлення різальної кромки ρ, матеріала матриці та волокнистого наповнювача і характера армування.

Найбільший вплив на механізм стружкоутворення і тип стружки мають кут направленості волокон θ та передній кут γ. При розташуванні волокон паралельно швидкості

© Є.В. Корбут, канд.тех. наук, доцент

головного руху і різанні інструментом з високим позитивним кутом γ стружка формується за рахунок розшарування та хрупкого зносу. При різанні з γ =0 або з γ <0 стружка формується за рахунок стиску з повздожнім згином волокнистого наповнювача. При позитивній направленності волокон в діапазоні 0<θ<75°, коли зрізування волокон є основним видом стружкоутворення , передній кут γ не впливає на механізм формоутворення стружки. Проте в цих умовах передній кут γ має вирішальне значення що до типу стружки. При великому позитивному куті γ утворюється суставчата стружка. Зменшення кута γ приводить до утворення елементної стружки. При різанні перпендикулярно до волокнистого наповнювача ВПКМ інструментом з позитивним кутом γ стружка формується за рахунок зрізування волокнистого наповнювача, а інструментом з γ =0 або від'ємним переднім кутом γ - за рахунок макророзриву [7].

Задній кут α суттєво не впливає на механізм стружкоутворення чи топологію оброблюванної поверхні, за винятком незначного підвищення якості поверхні при великих значеннях α [7].

За даними робіт [8, 9] в умовах різання з малим відношенням товщини зрізу "а" до радіуса округлення різальної кромки ρ механізм стружкоутворення змінюється зі зміною ρ. Якщо радіус округлення різальної кромки дорівнює поперечному розміру волокнистого наповнювача або менше то процес різання еквівалентний різанню абсолютно гострим інструментом. На процес стружкоутворення впливає і матеріал матриці в залежності від режиму різання. При високих швидкостях різання і малих подачах в реактопластах інтенсивно утворюються тріщини із-за високої швидкості деформації, і розмір стружки зменшується.

В термопластах виникає значна деформація із-за підвищених температур в зоні різання, що призводить до утворення довгої товстоподібної стружки, а низькі швидкості і великі подачі призводять до утворення товстої стрічкоподібної стружки як при різанні термопластів так і реактопластів [10].

В залежності від механічних і фізичних властивостей волокнистого наповнювача залежить процес стружкоутворення при різанні ВПКМ. При різанні ВПКМ армованих вугле- та стекловолокном, спостерігається хрупкий злам волокон, а при різанні ВКПМ на основі аромідних волокон -пластичний розрив волокнистого наповнювача [11].

На практиці однонаправлені ВПКМ використовують рідко. Більш широке використання знайшли різнонаправлені ВПКМ. Дослідженнями встановлено [11, 12] що закономірності різання цих матеріалів подібні однонаправленним. Характеристики обробленої поверхні індивідуальних шарів в різнонаправлених ВПКМ в основному відповідають однонаправленим ВПКМ. Проте різнонаправлені прошарки обмежують внеплощинну деформацію, котра характерна для різання однонаправлених ВПКМ.

Наведенний аналіз показав, що специфічні умови стружкоутворення та зношення лезового інструменту обумовлюються:

- порівняно малою міжшаровою міцністю ВПКМ, яка здатна привести до розшарування ВПКМ під дією сил різання. Для запобігання цьому необхідно кінематично забезпечувати направлення сил різання для стиснення шарів ВПКМ між собою;
- малою пластичностю ВПКМ, що приводить до утворення при різанні елементної стружки ;
- значною пружністю матеріалу, яка викликає зменшення діаметра отворів при їх обробці, в результаті чого виникають значні сили тертя на задніх поверхнях інструменту, що вимагають збільшення задніх кутів леза інструменту;
- токсичністю і шкідливістю стружки, для якої необхідно створювати умови її ефективного видалення із зони різання, що особливо характерно при свердлінні;
- малою теплопровідністю ВПКМ, яка призводить до інтенсивного нагріву інструменту навіть при відносно невеликих швидкістях різання;
- небажаністю застосування мастильно-охолоджуючих рідин при різанні внаслідок зниження міцності і електричних властивостей при змочуванні.

Зважаючи на особливості стружкоутворення перш за все постає питання аналізу сил різання та температури в зоні різання при механічній обробці ВПКМ.

У процесі різання ВКПМ на ріжучий клин інструменту діють сили, прикладені до передніх і задніх поверхнях, співвідношення яких інше, ніж при обробці металів [13]. Так за даними більшості досліджень [7] при спрямованості волокон 0 <θ <75° радіальна проекція

сили різання більше, ніж тангенціальна проекція сили різання, що і відрізняє процес різання ВПКМ від лезової обробки металів,при якій тангенціальні складові сили різання завжди більші. За даними [13] це пояснюється пружною силіою, яка діє на задню поверхню інструмента, що більше сили, діючої на передній поверхні.

Складові сили різання при лезовій обробці волокнистих полімерних матеріалів в великій мірі залежать від кута направленості волокон. В роботі [7] відмічається, що при значенні кута направленості волокон від 0 до 60° сила різання збільшується, при θ від 60 ^{0}до 120 ^{0} зменшується, а при θ°>120° збільшується.

На значення сили різання впливають при заданій геометрії леза інструменту механічні властивості ВПКМ, режими різання та коефіцієнт тертя.

Тертя на робочих поверхнях інструмента значно впливає на напругу та деформації в площині здвигу, відповідно і на тип стружки. Коефіцієнт тертя μ при різані вуглепластиків залежить від кута направленності волокон θ і ця залежність має синусоїдальну форму.

Разом з тим тенденція зміни коефіцієнту тертя μ в залежності від кута направленності волокон θ за даними різних досліджень практично індетичні.

Проте слід відзначити, що значення для кожного виду ВПКМ коефіцієнта μ в достатній мірі не визначені.

Співвідношення складових теплового балансу при різанні ВПКМ і металів суттєво різняться, проте підпорядковуються теорії протікання теплових процесів при різанні металів.

Зниження температур в зоні різання при обробці ВПКМ досягається:
- за рахунок зменшення сил тертя між оброблюваним матеріалом і задньою поверхнею леза інструменту, а також між стружкою і передньою поверхнею леза в разі застосування ретельно полірованого інструменту;
- при використанні алмазного інструменту, який має значно менший коефіцієнт тертя з оброблюваним матеріалом і більш високий коефіцієнт теплопровідності;
- при використанні інструментів з максимально великими передніми і задніми кутами, на різання якими витрачається мінімальна робота, а отже, мінімальним буде і тепловиділення;
- при охолодженні стисненим повітрям або охолоджувальною рідиною, сумісної з видом ВПКМ;
- шляхом підбору відповідних режимів різання, при цьому найбільш сильний вплив на температуру надає швидкість різання.

Аналіз теплових процесів показує, що перспективним напрямком зниження температури в зоні різання може бути використання нових конструкцій покриття. В той же час, необхідно відмітити, що цей напрям зменшення температури різання в процесі механічної обробки ВПКМ не досліджений. Наведений аналіз особливостей процесу різання волокнистих полімерних конструкційних матеріалів показує, що незважаючи на різницю їх фізико-механічних характеристик для кожного з них процес різання ідентичний в загальному вигляді.

Слід відзначити, що характеристики процесу різання досліджувались на основі прямокутного різання. Залишається не дослідженим процес косокутного різання. Для його дослідження перш за все необхідно визначити вид обробки та найбільш вживаний інструмент здійснюючий косокутне різання.

Особливості різання волокнистих полімерних композиційних матеріалів за даними робіт [7] в основному досліджувалась механіка прямокутного різання. В той же час косокутне різання в порівнянні з прямокутним має суттєві відмінності, які залежать, як від виду та способу оброблення, конструкції, геометрії інструмента, так і від покриття, його структури, виду і способу нанесення.

На діаграмі (рис. 1) представлена в процентному співвідношенні структура механічної обробки ПКМ в авіабудуванні.

© Є.В. Корбут, канд.тех. наук, доцент

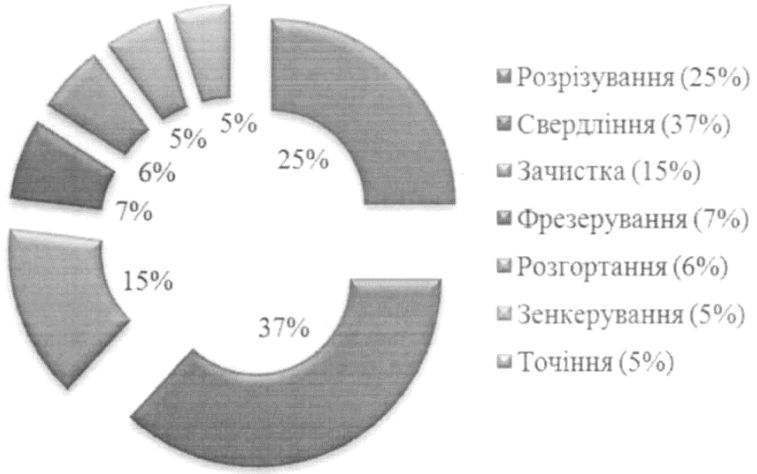


Рис 1. Структура механічної обробки полімерних композитів в процентному співвідношенні.

Аналіз процентного співвідношення операцій, що застосовуються в авіабудуванні, показує, що найбільший процент серед механічних операцій займає свердління. Це пояснюється великою кількістю обробки отворів для болтових і заклепочних з'єднань при складанні авіаційних конструкцій. Слід відзначити, що процес свердління відповідає косокутному різанню і в порівнянні з іншими видами обробки характеризується певними технологічними особливостями. В основному це велика схильність до пошкоджень оброблюваної поверхні, необхідність підтримання певної гостроти різальної кромки для підтримки мінімальної температури та сил різання, запобігання перегріву та термічної деструкції ВПКМ, що потребує вибору певних режимів різання для кожного з оброблюваних матеріалів та інструменту. Саме ці особливості приводять при свердлінні до технологічного критерію затуплення.

Таким чином, зважаючи на технологічні особливості обробки отворів та на те що процес свердління є найбільш поширеним при обробці ВПКМ в авіабудуванні, цей процес доцільно вибрати для досліджень при косокутному різані.

В зв'язку з чим постає питання розгляду особливостей процесу свердління ВПКМ.

Література

1. Авиационно-космические материалы и технологии / [В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, Н. Е. Калинина и др.] – Запорожье, изд. ОАО “Мотор Сич“, 2009. – 383с.
2. Лабунец В. Ф. Авиационные конструкционные материалы с высокой удельной прочностью: Учебное пособие / Лабунец В. Ф. – К.: КМУГА, 1993. – 116с.
3. Строение и свойства авиационных материалов: Учебник для вузов / [А. Ф. Белов, В. П. Венедиктова, А. С. Висков и др.]: Под ред. А. Ф. Белова, В. В. Николаенко. – М.: Металлургия, 1989. – 368с.
4. Матеріалознавство: [підручник] / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, Т. С. Климова, І. Г. Черниш. – К.: НАУ. – 2011. – 492 с.
5. Лобанов Д. В. Разработка и реализация технологических методов создания, изготовления и выбора фрезерного инструмента для эффективной обработки композиционных неметаллических материалов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Новосибирск, 2013
6. Composite materials. Fatigue and fracture / Erian A. Armanios, editor. Printed in Ann Arbor, MI, 1997. – 573.
7. Криворучко Д.В., Залога В.А., Пасечник В.А., Колесник В.А., Емельяненко С.С. Механическая оюработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор)/ монография Сумы 2013, с. 272.
8. Ghidossi P Contribution a l'etude de l'effet des conditions d'usinage d'eprouvettes en composites a' matrice polymere sur leur reponse mecanique: Ph.D. dissertation : 05.03.01/ P. Ghidossi . Ecole, 2003. -166p

9. Iliesku D. Approches experimentale et numerique de l'usinage a sec des composites carbone/epoxy : Ph.D. dissertation : 05.03.01/ D.Iliesku – Paris, 2008. – 219p.

10. Hochgen H. Machinability of Some Fiber-Renforced Thermoset and Thermoplastics in Drilling/ H.Hochgen, H.Y.Puw, K.C. Yao// Materials and Manufafacturing Processes. – 1994. Vol.6. – P.653-682p.

11. Arola D. Orthogonal cutting of Fiber-Renforced composites: a finite element analysis/ D.Arola, M. Ramulu// Int. J.of Mechanical Science. -1997. –Vol.39,no5. – 597 – 613p.

12. Kaneeda T. CFRP cutting mechanism (1st report) : Surface generation mechanism at very low speeds/ T.Kaneeda, T.Masayuki// Journal of the Japan Society of Precision Engineering. – 1989.- Vol. 55. – P. 1456 – 1461

13. Deborah, D.L. Chang Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies. Printed in Great Britain, 2004. – 293.

Е.В. Корбут, канд.тех. наук., доцент
Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ВПКМ ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЕМ

Перспективы развития новой техники, особенно авиационной и космической, на сегодня связывают с широким использованием композиционных материалов, уникальность свойств которых позволяет во многих случаях значительно повысить эксплуатационные характеристики конструкционный изделий, а также снизить трудоемкость и материалоемкость их изготовления, способствуя тем самым росту конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке.

Наиболее технологически сложными задачами при изготовлении изделий из композиционных материалов является повышение работоспособности механической обработки (точение, сверление и др.) И, в том числе инструмента, от характеристик которого зависит надежность и экономичность его работы в условиях высоких скоростей, нагрузок, температур, химического взаимодействия с обрабатываемым материалом, а также высоких требований к геометрии обработки и качества обработанных поверхностей. Процессы резания характеризуются сложностью и разнообразием, что обусловлено широким кругом инструментальных материалов и обрабатываемых деталей.

Ключевые слова: резание, композиционные материалы, стружкообразование, силы резания, инструмент, температура резания.

Korbut I., associate professor
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute», Kyiv, Ukraine

FEATURES OF MACHINING OF VPKM BY THE CUTTING PROCESS

Prospects for the development of new technology, especially aviation and space, are now associated with the widespread use of composite materials, the uniqueness of their properties allows in many cases to significantly improve the performance characteristics of structural products, as well as to reduce the labor intensity and material consumption of their manufacture, thereby increasing the competitiveness of domestic products at world market.

The most technologically complex tasks in the manufacture of products from composite materials is to increase the efficiency of machining (turning, drilling, etc.). And, including tools, the characteristics of which depend on the reliability and economy of its operation under high speeds, loads, temperatures, chemical interactions with processed material, as well as high requirements for processing geometry and quality of the treated surfaces. Cutting processes are characterized by complexity and variety, which is due to a wide range of tool materials and machined parts.

Keywords: cutting, composite materials, chip formation, cutting forces, tool, cutting temperature

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018.

© Є.В. Корбут, канд.тех. наук, доцент

УДК 005

Коробко А. І., канд. техн. наук, доц.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет;
ХФ УкрНДІПВТ імені Леоніда Погорілого

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ВИПАДКОВОЇ І МЕТОДИЧНОЇ ПОХИБОК НА РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАННЯ
(в порядку обговорення)

В статті запропоновано новий спосіб оцінювання впливу випадкової і методичної похибок на результат вимірювання за показниками невизначеності вимірювання. В якості кількісного показника впливу методичної похибки запропоновано відношення різниці між теоретичними і експериментальними даними до середньої похибки їх визначення. В якості кількісного показника впливу випадкової похибки запропоновано відношення невизначеності вимірювання експериментальних даних до невизначеності вимірювання теоретичних даних. Указані показники засновано на припущенні того, що теоретичні і експериментальні дані розподілені нормально. Теоретичний розподіл змінюється в межах сумарної невизначеності вимірювання типу В досліджуваного параметру. Фізична суть показника впливу методичної похибки – ймовірність з якою результати вимірювання середнього значення показника (визначене експериментально) знаходяться в межах можливого відхилення теоретичного значення цього показника.

***Ключові слова**: невизначеність вимірювання, співпадіння результатів, ймовірність, випадкова похибка, методична похибка, теоретичне дослідження, експериментальне дослідження, вимірювання, похибка визначення середнього значення.*

Постановка проблеми. Випробування продукції на усіх етапах її життєвого циклу є важливим елементом забезпечення її якості. Особливо актуальними випробування є на етапі проведення науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт та на етапі виробництва продукції. Саме на цих етапах життєвого циклу у продукції формуються ті властивості, що будуть направлені на задоволення потреб споживачів на наступних етапах життєвого циклу. Тобто, на етапах науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт та виробництва продукції формується її якість. Випробування проводяться з конкретною метою, яка направлена на вирішення задач отримання достовірної інформації про об’єкт і доопрацювання його математичної моделі. На цьому етапі постає задача оцінювання точності і адекватності вимірювання показників та визначення міри впливу випадкової і методичної похибок на результат вимірювання. Ці задачі є досить складними.

В статті запропоновано новий спосіб оцінювання впливу випадкової і методичної похибок на результат вимірювання, оцінювання збігу теоретичних і експериментальних даних на основі методів математичної статистики, використовуючи в якості показника ймовірність з якою математичне очікування експериментальних даних знаходиться у межах невизначеності вимірювання теоретичного значення показника. В якості кількісного показника впливу методичної похибки запропоновано відношення різниці між теоретичними і експериментальними даними до середньої похибки їх визначення. В якості кількісного показника впливу випадкової похибки запропоновано відношення невизначеності вимірювання експериментальних даних до невизначеності вимірювання теоретичних даних. Указані показники засновано на припущенні того, що теоретичні і експериментальні дані розподілені нормально.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При проведенні наукових досліджень важливим є питання визначення на скільки розроблена математична модель вимірювання значень показника (випробувань) співпадає з реальною моделлю вимірювання (випробувань). Інакше кажучи, наскільки експериментальний розподіл даних відповідає теоретичному. Розв’язання указаних задач базується на основних положеннях теорії ймовірності і математичної статистики.

Питанню дослідження збігу теоретичних і експериментальних розподілів присвячено значна кількість робіт, як фундаментальних посібників з теорії ймовірності та теорії експерименту [1, 2, 3], так і публікації з вирішення окремих приватних задач [4, 5, 6]. Проте, слід відмітити, що до сьогоднішнього дня у відомій літературі немає єдиного підходу до

© Коробко А. І., канд. техн. наук, доц.

термінів і визначень з цього питання [7]. У зв'язку з цим виникають розбіжності у трактуванні окремих понять.

Детальний аналіз показників і критеріїв для встановлення відповідності теоретичного розподілу експериментальному здійснено у роботі [8]. Ці показники мають назву «критерії погодження». Це критерії Пірсона χ^2, Колмогорова-Смірнова, Крамера-фон Мізера-Смірнова, Андерсена-Дарлігна, Купера та інші. Також, для перевірки адекватності математичної моделі даним експерименту застосовують критерій на основі співставлення дисперсії відтворюваності середнього значення функції відгуку і дисперсії адекватності [9].

Крім сказаного, у роботі [10] запропоновано універсальну функцію густини ймовірності. Проте вона є досить складною для практичного застосування. У роботі [11] для вирішення задачі підвищення точності прогнозування надійності запропоновано показник за яким аналізується тільки та ділянка емпіричної кривої, що характеризує кількість бракованих деталей, тобто кінець гілки.

Виділення невирішеної проблеми. Кожний із розглянутих критеріїв має свою сферу застосування. Проте, в якості спільного недоліку можна виділити те, що вони потребують необхідність наявності великої вибірки (від 50, а в окремих випадках від 300 спостережень). Існуючі критерії не в повній мірі дають відповідь на питання щодо того, на скільки у кількісному виді співпадають теоретичні і експериментальні дані. Також до недоліку можна віднести те, що існуючі критерії враховують метрологічні характеристики вимірювань інтегрально, тобто при оцінюванні збігу розподілів окремо не розглядаються невизначеність або похибка з якою проводяться вимірювання.

Мета і постановка задач дослідження. Метою дослідження є встановлення міри впливу випадкової і методичної похибок на результат вимірювання шляхом розробки відповідних показників і критеріїв. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

− розробити показник і критерій оцінювання впливу методичної похибки на результат вимірювання із застосуванням невизначеності вимірювання;

− розробити показник і критерій оцінювання впливу випадкової похибки на результат вимірювання із застосуванням невизначеності вимірювання.

Результати дослідження. Показник і критерій оцінювання впливу методичної похибки на результат вимірювання із застосуванням невизначеності вимірювання. Методи випробувань реалізуються шляхом вимірювання значень певних параметрів за визначеною методикою і з використанням регламентованих засобів вимірювальної техніки. Безумовно, як методика, так і засоби вимірювальної техніки мають похибки. У зв'язку з цим, результати експериментальних досліджень будуть відрізнятися від результатів розрахунків за розробленою математичною моделлю. На результат вимірювання будуть впливати випадкова, систематична і методична похибки. За рахунок цього буде спостерігатись розкид отриманих експериментальних даних, а їх математичне очікування буде відрізнятись від теоретичного (розрахованого за математичною моделлю).

Теоретична модель випробувань складається на основі, і є результатом, ґрунтовних наукових досліджень. Така модель має певні допущення і тому вона не буде в повній мірі відповідати реальному процесу протікання явища, що досліджується. Використовуючи теоретичну модель проводяться певні розрахунки і формуються попередні висновки. Теоретична модель (модельне рівняння) вимірювання показника, що досліджується має вид

$$y_{\text{т}} = f\left(X \pm U_X\right), \tag{1}$$

де $X=\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ − множина значень величин, що входять у модельне рівняння вимірювання теоретичного значення досліджуваного показника y;

$U_X=\{U_{x1}, U_{x2}, \ldots, U_{xn}\}$ − множина значень розширених невизначеностей з якими вимірюються показники X, що входять у модельне рівняння вимірювання досліджуваного показника y;

n − кількість величин, що входять у модельне рівняння вимірювання досліджуваного показника y.

Результат теоретичного вимірювання можна представити у виді розподілу з числом вимірювань, що наближається до безкінечності. Такі результати розподіляються за нормальним законом, а математичне очікування $\overline{y}_{\text{т}}$ (середнє значення) буде рівнятись результату розрахунку за (1) без врахування невизначеності вимірювання U_X:

$$\overline{y}_{\text{т}} = y_{\text{т}}. \tag{2}$$

© Коробко А. І., канд. техн. наук, доц.

За теоретичного дослідження на результат вимірювання за (1) не буде впливати випадкова похибка, а методична, апріорі, рівняється нулю. У цьому разі значення U_X будуть визначатись невизначеностями типу В, які є аналогом систематичних похибок у класичній метрології [12]. Значення U_X можуть бути взяті із апріорних даних, свідоцтва про калібрування або паспорту засобу вимірювальної техніки (за прямих вимірюваннь), встановлене в нормативному документі на метод вимірювань (випробувань), тощо [12].

Невизначеність вимірювання U_X розраховується з довірчою ймовірністю P=0,95, тому межі зміни показника y будуть охоплювати майже всю площу під кривою розподілу (рис. 1) Виходячи з (1), можна сказати, що умовні межі зміни теоретичного значення показника y будуть визначатись величиною його невизначеності вимірювання

$$y_{\text{т max}}\left(y_{\text{т min}}\right)=\bar{y}_{\text{т}}\pm U_{y\text{т}}. \tag{3}$$

де $y_{\text{т max}}$, $y_{\text{т min}}$ – максимальне і мінімальне теоретичне значення показника y;

$U_{y\text{т}}$ – невизначеність вимірювання показника y.

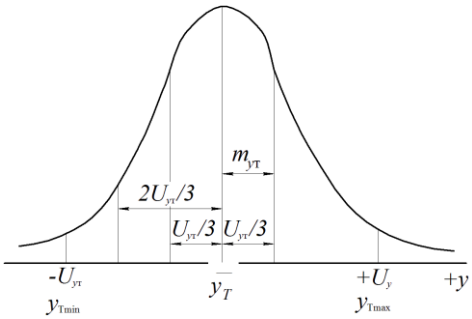


Рис. 1. Розподіл теоретичних значень показника y

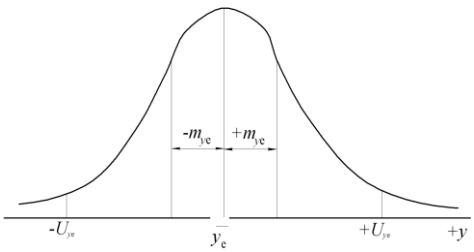


Рис. 2. Розподіл експериментальних даних вимірювання показника y

Похибка визначення середнього теоретичного значення може бути визначена як

$$m_{y\text{т}}=\frac{U_{y\text{т}}}{3}, \tag{4}$$

При здійсненні вимірювань в реальних умовах на їх результат будуть впливати випадкова і систематична похибки. За рахунок дії випадкової похибки розширюється інтервал (у порівнянні з теоретичними даними вимірювань), в якому може знаходитись дійсне значення вимірюваної величини

$$U_{ye}\geq U_{y\text{т}}. \tag{5}$$

Крім цього, за рахунок недосконалості математичної моделі (модельного рівняння) вимірювання показника (методична похибка), математичне очікування експериментальних даних може відрізнятись від теоретичного

$$\bar{y}_{\text{т}}\neq\bar{y}_e. \tag{6}$$

Математичне очікування, середнє квадратичне відхилення і похибка визначення середнього значення експериментальних даних визначаються за класичними формулами теорії ймовірності [13] (рис. 2)

$$\bar{y}_e=\frac{\sum_{i=1}^{j}y_{\text{e}i}}{j}; \tag{7}$$

$$\sigma_{ye}=\sqrt{\frac{1}{j-1}\sum_{i=1}^{j}\left(y_{\text{e}i}-\bar{y}_e\right)^2}; \tag{8}$$

$$m_{ye}=\frac{\sigma_{ye}}{\sqrt{j}}, \tag{9}$$

де $y_{\text{e}i}$ – i-те значення вимірюваної величини y_{e};

j – кількість вимірювань величини y_{e}.

Для оцінювання впливу методичної похибки на результат вимірювання визначимо межі можливих відхилень теоретичних даних $\bar{y}_e$ від експериментальних $\bar{y}_{\text{т}}$ (Δy) в долях від похибки

визначення різниці між цими величинами m_y

$$k_м = \frac{\Delta y}{m_y}. \quad (10)$$

Де

$$\Delta y = \left|\bar{y}_т - \bar{y}_е\right|; \quad (11)$$

$$m_y = \sqrt{m_{yт}^2 + m_{yе}^2}. \quad (12)$$

На рис. 3 показано графічно співпадіння результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

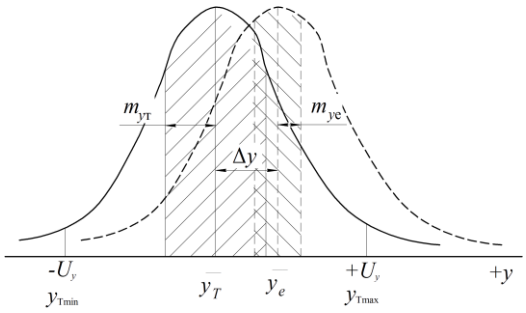


Рис. 3. Графічна інтерпретація співпадіння результатів теоретичних і експериментальних досліджень

За спеціальними таблицями, що наведені в літературі з математичної статистики (наприклад в [14, с. 78]), в залежності від величини $k_м$, визначається ймовірність з якою середнє значення теоретичного розподілу виходить за довірчі межі визначення середнього значення досліджуваної величини визначеної експериментальним шляхом (табл. 1).

Таблиця 1

Коротка таблиця значень інтегралу ймовірності [14, с. 78]

t	P_t	t	P_t	t	P_t	t	P_t
0,2	0,1585	1,2	0,7699	2,2	0,9722	3,2	0,9986
0,4	0,3108	1,4	0,8385	2,4	0,9836	3,4	0,9993
0,6	0,4515	1,6	0,8904	2,6	0,9907	3,6	0,9997
0,8	0,5763	1,8	0,9281	2,8	0,9949	3,8	0,9999
1,0	0,6827	2,0	0,9545	3,0	0,9973	4,0	0,9999
t − довірчий коефіцієнт P_t − ймовірність							

Показник $k_м$ може бути кількісним показником вираження методичної похибки і характеризує ймовірність з якою теоретична модель не відповідає експериментальній. Для визначення ймовірності $P_с$ з якою теоретична модель відповідає експериментальній необхідно знайти величину

$$P_с = 1 - P_{k_м}. \quad (13)$$

Де $P_{kм}$ − ймовірність співпадіння теоретичних і експериментальних даних [14, с. 78].

Значення показника $k_м$ змінюється в межах $k_м$=[0; ∞).

При значенні $k_м$=0,68 ймовірність співпадіння теоретичних і експериментальних результатів буде 50 %. При значенні $k_м$=1 ймовірність неспівпадіння теоретичних і експериментальних результатів буде 68 %. Тобто, з ймовірністю 68 % математичне очікування експериментальних даних вийде за межі похибки визначення теоретичних значень. За більшого значення різниці Δy в (10) ймовірність співпадіння буде зменшуватись. Якщо різниця середніх значень буде більш ніж в два рази перевищувати похибку їх визначення (ймовірність неспівпадіння 95 %), то методичну похибку можна назвати суттєвою і необхідно прийняти міри для удосконалення математичної моделі. Якщо $k_м$<1,3 (ймовірність співпадіння результатів більше 80 %) то можна вважати, що методична похибка незначно впливає на результати, а самі результати є співставними.

Показник і критерій оцінювання впливу випадкової похибки на результат вимірювання із застосуванням невизначеності вимірювання. Для оцінювання впливу

випадкової похибки порівнюються між собою значення невизначеності теоретичного розподілу і експериментального

$$k_{\text{в}} = \frac{U_{ye}}{U_{y\text{т}}}. \quad (14)$$

За значень $k_{\text{в}} \geq 2$ значення випадкової похибки буде перевищувати значення систематичної похибки. У цьому випадку можна зробити висновок про те, що випадкова похибка суттєво впливає на результат вимірювання. Зменшити її можна шляхом здійснення ще однієї серії вимірювань. Якщо після додаткових вимірювань значення $k_{\text{в}}$ не зменшилось, необхідно здійснити міри з усунення зовнішніх факторів, що впливають на точність вимірювання.

Висновки. В результаті проведеного дослідження розроблено новий спосіб оцінювання впливу випадкової і методичної похибок на результат вимірювання за показниками невизначеності вимірювання. В якості кількісного показника впливу методичної похибки запропоновано відношення різниці між теоретичними і експериментальними даними до середньої похибки їх визначення. В якості кількісного показника впливу випадкової похибки запропоновано відношення невизначеності вимірювання експериментальних даних до невизначеності вимірювання теоретичних даних. Указані показники засновано на припущенні того, що теоретичні і експериментальні дані розподілені нормально. Теоретичний розподіл змінюється в межах сумарної невизначеності вимірювання типу В досліджуваного параметру. Фізична суть показника впливу методичної похибки – ймовірність з якою результати вимірювання середнього значення показника (визначене експериментально) знаходяться в межах можливого відхилення теоретичного значення цього показника.

Інформаційні джерела

1. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа хи-квадрат : Р 50.1.033-2001. [Дата введения 2002-07-01]. − М. : Изд-во стандартов, 2002. − 87 с. (Рекомендации).

2. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М. : Наука, 1971. − 208 с.

3. Надежность и эффективность в технике. Т. 6. Экспериментальная отработка и испытания. – М. : Машиностроение, 1989. – 320 с.

4. Greenwood, P. E., Nikulin, M. S. (1996). A guide to chi-squared testing. New York : John Wiley & Sons, 280 p.

5. Лемешко Б. Ю. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. I. Проверка простых гипотез / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – Т. 11. – № 2 (34). – С. 96-111.

6. Лемешко Б. Ю. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. II. Проверка сложных гипотез / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – Т. 11. – № 4 (36). – С. 78-93.

7. Фундаментальные проблемы теории точности / [Под ред. В. П. Булатова, И. Г. Фридлендера]. − СПб. : Наука, 2001. − 504 с.

8. Лемешко Б. Ю. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. Монография. / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова. − Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.

9. Славутский Л. А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента. Учебное пособие / Л. А. Славутский. − Чебоксары : Изд-во ЧГУ, 2006. – 200 с.

10. Булатов В. П. Расчет точности машин и приборов / В. П. Булатов, И. Г. Фридлендер, А. П. Баталов и др. [Под общ. ред. В. П. Булатова и И. Г. Фридлендера]. − СПб. : Политехника, 1993. − 495 с.

11. Басова Е. В. Новый аппарат оценки согласия эмпирического и теоретических распределений / Басова Е. В., Копылов Л. В., Петухов С. Л. // ААИ Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров : 77-я Международная научно-техническая конференция МАМИ, 27-28 марта 2012 г. : материалы. – Москва, 2012. – С. 9-19.

© Коробко А. І., канд. техн. наук, доц.

12. Захаров И. П. Неопределенность измерений. Для чайников и… начальников. Учебное пособие. Издание 3-е переработанное и дополненное / И. П. Захаров. – Харьков : ФЛП Андреев К. В., 2015. – 51 с.

13. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения : ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 — [Чинний від 2008-10-01]. — К. : Держспоживстандарт України, 2007. — 18 с. — (Державний стандарт України)

14. Мерков А. М. Санитарная статистика (пособие для врачей) / Мерков А. М., Поляеков Л. Е. − М. : Издательство «Медицина», 1974. − 384 с.

Коробко А. И., канд. тех. наук, доц.
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет;
ХФ УкрНИИПИТ имени Леонида Погорелого

ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ И СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ (в порядке обсуждения)

В статье предложен новый способ оценки влияния случайной и методической погрешностей на результат измерения по показателям неопределенности измерения. В качестве количественного показателя влияния методической погрешности предложено отношение разницы между теоретическими и экспериментальными данными от средней погрешности их определения. В качестве количественного показателя влияния случайной погрешности предложено отношение неопределенности измерения экспериментальных данных к неопределенности измерения теоретических данных. Указанные показатели основано на предположении того, что теоретические и экспериментальные данные распределены нормально. Теоретическое распределение изменяется в пределах суммарной неопределенности измерения типа В исследуемого параметра. Физическая суть показателя влияния методической погрешности – вероятность, с которой результаты измерения среднего значения показателя (определенного экспериментально) находятся в пределах возможного отклонения теоретического значения этого показателя.

Ключевые слова: *неопределенность измерения, совпадение результатов, вероятность, случайная погрешность, методическая погрешность, теоретическое исследование, экспериментальное исследование, измерение, погрешность определения среднего значения.*

Korobko A., Ph. D., Associate Professor
Kharkiv national automobile and highway University; ”Leonid Pogorilyy Ukrainian Scientific Research Institute of Forecasting and Testing of Machinery and Technologies for Agricultural Production” Kharkiv branch

INFLUENCE OF METHODOLOGICAL AND RANDOM ERRORS TO THE RESULT OF MEASUREMENT (in the order of discussion)

The article offers a new way of estimating the influence of random and methodical errors to the result of measurement for the measurement uncertainty index. The ratio of the difference between theoretical and experimental data is proposed from the average error of their determination for the quantitative indicator of the influence of methodical error. The ratio of the uncertainty in the measurement of experimental data to the uncertainty in measuring theoretical data for a quantitative measure of the effect of a random error is proposed. These indicators are based on the assumption that the theoretical and experimental data are normally distributed. The theoretical distribution varies within the total uncertainty of measurement of type B of the parameter under study. The physical essence of the indicator of the influence of the methodical error is the probability with which the results of measuring the average value of the indicator (determined experimentally) are within the limits of a possible deviation of the theoretical value of this indicator.

Keywords*: uncertainty of measurement, coincidence of results, probability, random error, methodological error, theoretical investigation, experimental study, measurement, error of determination of mean value.*

Стаття надійшла до редакції 22.04.2018

© Коробко А. І., канд. техн. наук, доц.

УДК 621.315.592

А.С. Кримусь, Г.Л. Мирончук, к.ф.м.н., Г.П. Хмарук, м.н.с, Д.Б. Мирончук студ.
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ СЕНСОРИ НА ОСНОВІ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ МОНОКРИСТАЛІВ $AgGaGe_3Se_8$

У роботі розглянуто вплив температури та лазерного опромінення на п'єзоелектричні властивості кристалів $AgGaGe_3Se_8$. Досліджено лазерно індукований п'єзоелектричний ефект та градієнт температур. А також показано, що даний ефект може бути використаний для створення керованих лазером п'єзоелектричних сенсорів.

Ключові слова: *п'єзоелектричні властивості, градієнт температур, халькогенідні матеріали.*

Постановка проблеми. Одержання напівпровідникових матеріалів з прогнозованими наперед оптоелектронними параметрами є актуальною технологічною проблемою сучасної твердотільної електроніки. До таких матеріалів відносяться складні напівпровідникові сполуки, зокрема тетрарні халькогеніди, параметри яких можна задавати змінюючи компонентний склад і їх кількісне співвідношення в сполуці. Халькогенідні матеріали у вигляді стекол або кристалів є перспективними матеріалами для роботи з оптичними лазерними імпульсами [1-3]. Зазвичай це реалізується через зміну анізотропії оптичних констант, що є наслідком особливостей халькогенідних стекол [4]. Як правило вони володіють деякими необоротними змінами, що обмежують їх застосування в оптоелектронних системах. Халькогенідні кристали є більш стабільнішими відносно опромінення лазерним світлом, основним з яких являється фототермічна стійкість по відношенню до невпорядкованих матеріалів: скло, кераміка, багатокомпонентні сполуки тощо [5].

В даний час одними з найбільш часто використовуваних нелінійно оптичних матеріалів з широким вікном прозорості і відповідними оптичними властивостями є монокристали $AgGaS_2$ і $AgGaSe_2$. З'єднання $AgGaGe_3Se_8$ є почетверенними аналогами потрійних сполук $AgGaSe_2$ [6, 7]. Вони були вирощені при спробі покращити параметри потрійних фаз додаванням дихалькогеніду германію [8]. Основна причина використання халькогенідних кристалів $AgGaGe_3Se_8$ в якості лазерно керованих матеріалів викликана великою кількістю дефектних станів [9, 10], які взаємодіють з зовнішнім лазерним випромінюванням. Це дає великий потенціал для розширення оптичної поляризації, та використання кристалів $AgGaGe_3Se_8$ в якості п'єзоелектричних сенсорів.

Метою роботи є встановлення впливу температури та лазерного опромінення на п'єзоелектричні властивості кристалів $AgGaGe_3Se_8$.

Постановка завдань. Для досягнення поставленої мети досліджено залежності п'єзоелектричних модулів від температури та від освітлення монохроматичним світлом.

П'єзоелектричні дослідження проводились за допомогою d_{33}-метра (APC International, Ltd.), який дозволяє вимірювати значення п'єзоелеткричного модуля в межах 1–200 пКл/В з роздільною здатністю 0,1 пКл/В та похибкою в 2%. Температурна залежність п'єзоелектричного модуля була виміряна з використанням термокамери, яка дозволяє проводити вимірювання у діапазоні температур 293–357 К, з стабілізацією температури до 0.2 К. Для дослідження лазерно індукованого п'єзоелектричного ефекту використовувався лазер з довжиною хвилі 532 нм потужністю 400 мВт. Для дослідження градієнта температур використовувались дві термопари відстань між якими 3 мм. Для кращого теплообміну між зразком та термопарами використовувалась галій-індієва евтектика.

Результати дослідження. Згідно [9, 10] кристали $AgGaGe_3Se_8$ є нецентросиметричними та високо дефектними, що робить їх перспективними для використання в якості п'єзоелектричних матеріалів керованих лазерним світлом. Виміряні значення п'єзоелектричних модулів принципових тензорних компонент при кімнатній температурі становлять 5,0; 18,4; 35,8 пм/В для d_{11}, d_{22}, d_{33}, відповідно. Як видно, значення модулів у різних напрямках суттєво відрізняються одне від одного, що свідчить про значну анізотропію та ацентричний просторовий розподіл електронної густини заряду [11]. Максимальне значення п'єзоелектричного модуля спостерігається в напрямку d_{33} тому подальші дослідження проводились саме в цьому напрямку.

© А.С. Кримусь, Г.Л. Мирончук, к.ф.м.н., Г.П. Хмарук, м.н.с, Д.Б. Мирончук студ.

При збільшенні температури п'єзоелектричні модулі зростають (табл. 1), що спричинено зменшенням ширини забороненої зони при збільшенні температури, і, як наслідок, ростом концентрації вільних носіїв заряду у відповідних енергетичних зонах кристалів. Іншою причиною такого зростання може бути теплова зміна параметрів гратки.

Таблиця 1

Значення п’єзоелектричних коефіцієнтів сполук x мол.%$AgGaGeS_4$ – (100-x) мол.% $AgGaGe_3Se_8$

Зразок	d_{eff}, пм/В 302 К, без освітлення	d_{eff}, пм/В 352 К, без освітлення	d_{eff}, пм/В з освітленням	Фотоіндуковані зміни, %
$AgGaGe_3Se_8$	35.8	46.2	10.1	71.8

Як видно з табл.1 значення п’єзоелектричного коефіцієнта, є більшим в порівнянні з еталонним кристалічним кварцом (2,3 пм/В), але значно нижчими ніж у $BaTiO_3$ (190 пм/В) чи $PbNb_2O_6$ (80 пм/В). Проте цей тип кристалів як правило гігроскопічні [12]. Тому досліджуваний матеріали є більш стійким у порівнянні з $BaTiO_3$ та $PbNb_2O_6$.

П’єзоелектричний коефіцієнт є чутливим до дії лазерного опромінення, спектральна енергія якого (2,33 еВ), що є близьким до ширини заборонної зони кристалів (табл.1). Для порівняння освітлення кристалів лазером з довжиною хвилі 808 нм (1,53 еВ) не створило ніяких змін у значеннях п’єзоелектричного сигналу. Ввімкнення лазера при t=0 призводить до значного зменшення п'єзоелектричного коефіцієнта, яке відбувається протягом перших ~40 с освітлення. Подальша дія лазера не вносить якихось істотних змін до значень модулів. Після вимкнення лазера відбувається релаксація п’єзоелектричних коефіцієнтів до їхнього початкового значення без незворотних змін. Зменшення п'єзоелектричного модуля під дією лазера може бути зумовлено насиченим поглинанням, двохфотонним та насиченим поглинанням та ін [13].

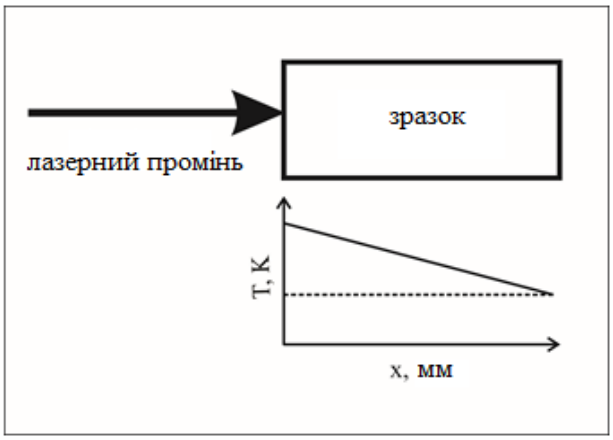


Рис. 1. Утворення градієнта температур у зразку при освітленні лазера

Слід зауважити, що опромінення кристалів лазером з довжиною хвилі 532 нм, енергія фотонів якого є близькою за значенням до ширини забороненої зони досліджуваних напівпровідників, та потужністю 400 мВт, призводило до нагрівання досліджуваних зразків. Практично весь лазерний промінь з фотонами, довжина хвилі яких є близькою до ширини забороненої зони напівпровідника, поглинався у при поверхневому шарі напівпровідника (до 30 нм). Таке поглинання викликало нагрівання зразків. Причому викликане таким чином нагрівання є нерівномірним по об’єму зразка. Грань, на яку падає лазерний промінь вбирає практично всю енергію, і нагрівання відбувається тільки на ній. Далі, за рахунок теплопровідності тепло передається у об'єм кристала. У зв'язку з таким нагріванням виникає так званий лазерно-індукований градієнт температур (рис 2.).

Даний градієнт досягав значень 3 К/мм у досліджуваних зразках. Результатом утворення такого градієнту може бути вплив на густину розподілу заряду у напівпровіднику [14], і відповідна зміна п'єзоелектричних властивостей [15, 16].

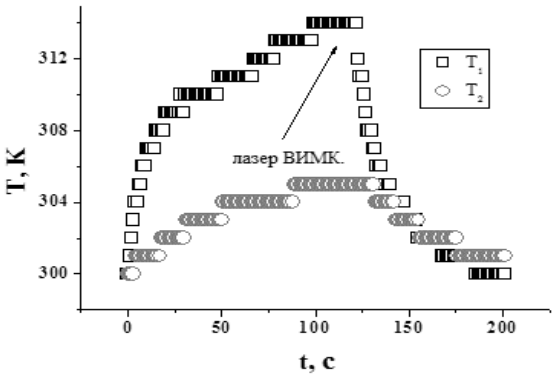


Рис. 2. Кінетика зміни температур на освітленій (T_1) та неосвітленій (T_2) гранях

Таким чином, освітлення лазером суттєво впливає на температуру зразка. При ввімкненні лазера (t=0 с) температура освітленої грані починає стрімко зростати. Схоже зростання маємо і з неосвітленою гранню, але воно відбувається із “запізненням” та є не настільки великим (рис.2.).

У результаті в кристалі виникає градієнт температур, кінетика зміни якого представлена на рис.3.

Цікавість такого ефекту полягає у тому, що градієнт температур може створювати додатковий ацентризм просторового розподілу зарядів, що у свою чергу впливає на п’єзоелектричні властивості кристалу [17].

Тобто, при дослідженні лазерно-індукованого п'єзелектричного ефекту у халькогендіних кристалах окрім чистого лазерно-індукованого, та температурно-індукованого ефекту, ще потрібно розглядати градієнт температур, як один із чинників впливу на п'єзоелектричні властивості кристалу. Принципова відмінність температурного (зростання п'єзомодуля при збільшенні температури) та лазерно-індукованого (зменшення п'єзомодуля при освітленні монокристаллу) ефектів дозволяє розділити ці ефекти [18].

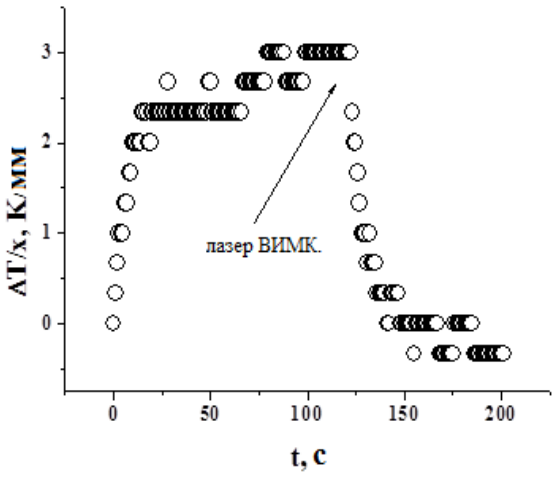


Рис. 3. Кінетика лазерно-індукованого градієнта температур у монокристалі $AgGaGe_3Se_8$

Висновки. Виміряні значення п'єзоелектричних модулів принципових тензорних компонент при кімнатній температурі становлять 5,0; 18,4; 35,8 пм/В для d_{11}, d_{22}, d_{33} відповідно, що свідчить про значну анізотропію кристалів $AgGaGe_3Se_8$. Встановлено, що з зростанням температури від 302 до 352 К спостерігається зростання пєзомодуля від 35,8 до 46,2 пм/В, а при освітленні монокристалу зменшення п'єзомодуля до 10,1 пм/В. Встановлено, що лазерноіндуковані зміни п’єзоелектричного коефіцієнта становлять 71,8% та є повністю реверсивними.

Таким чином, даний ефект може бути використаний для створення керованих лазером п’єзоелектричних сенсорів.

Інформаційні джерела

1. A. Grachev, A. Kamshilin, Electric polarization induced by optical orientation of dipolar centers in non-polar piezoelectrics // Opt. Express 13 (2005) p. 8565-8570.

2. L. N. Luk'yanova, V. A. Kutasov, P. P. Konstantinov, V. V. Popov / Effect of charge scattering anisotropy on the thermoelectric properties of the $(Bi,Sb)_2(Te,Se,S)_3$ solid solutions // Phys. Solid State 50 (2008) 597.

3. Yoon Myung, Hyung Soon Im, Chang Hyun Kim, Chan Su Jung, Yong Jae Cho, Dong Myung Jang, Han Sung Kim, Seung Hyuk Back, Jeunghee Parkor / Photo-induced cation exchange reaction of germanium chalcogenide nanocrystals synthesized using gas-phase laser photolysis reaction // Chem. Commun. 49 (2013) 187.

4. S. A. Dembovsky, in Physics and Applications of Non-Crystalline Semiconductors in Optoelectronics, edited by A. Andriesh and M. Bertolotti, Kluwer Academic Publishers, 1997, p. 275

5. O. V. Parasyuk, A. O. Fedorchuk, G. P. Gorgut, O. Y. Khyzhun, A. Wojciechowski, I. V. Kityk / Crystal growth, electron structure and photo induced optical changes in novel $Ag_xGa_xGe_{1-x}Se_2$ (x= 0.333, 0.250, 0.200, 0.167) crystals / Optical Materials 35 (2012) 65–73.

6. V. A. Aliyev, G. D. Guseinov, F. I. Mamedov, L. M. Chapanova / Anomalous temperature dependence of the band gap in $AgGaSe_2$ and $AgInSe_2$ // Solid State Commun. 59 (1986) 745–746

7. T. K. Kasumov, F. I. Mamedov / Combined photoconductivity in $AgGaSe_2$ single crystals // Phys. Status Solidi (a) 113 (1989) K241–K244.

8. I. D. Olekseyuk, A. V. Gulyak, L. V. Sysa, G. P. Gorgut, A. F. Lomzin / Crystal chemical properties and preparation of single crystals of $AgGaSe_2GeSe_2$ γ-solid solutions // J. Alloys Compd. 241 (1996) 187–190.

© А.С. Кримусь, Г.Л. Мирончук, к.ф.м.н., Г.П. Хмарук, м.н.с, Д.Б. Мирончук студ.

9. G. Lakshminarayana, M. Piasecki, G. E. Davydyuk, G. L. Myronchuk, O. V. Yakymchuk, O. V. Parasyuk, I. V. Kityk / Photovoltaic, photoelectric and optical spectra of novel $Ag_xGa_xGe_{1-x}Se_2$ (0.167x0.333) quaternary single crystals // Materials Chemistry and Physics 135 (2012) 837-841

10. A. S. Krymus, G. L. Myronchuka, O. V. Parasyuk, G. Lakshminarayana, A. O. Fedorchuk, A. El-Naggar, A. Albassam, I. V. Kityk / Photoconductivity and nonlinear optical features of novel $Ag_xGa_xGe_{1-x}Se_2$ crystals // Materials Research Bulletin 85 (2017) 74–79.

11. I. V. Kityk, N. AlZayed, P. Rakus, A. A. AlOtaibe, A. M. El-Naggar, O. V. Parasyuk / Laser-induced piezoelectric effects in chalcogenide crystals // Physica B 423 (2013) 60–63.

12. Fei Liang, Lei Kang, Zheshuai Lin, and Yicheng Wu / Mid-infrared nonlinear optical materials based on metal chalcogenides: structure-property relationship // *Cryst. Growth Des.,* 2017, 17 (4), pp 2254–2289

13. J. E.Debs. Piezo-locking a diode laser with saturated absorption spectroscopy / Debs J. E, Robins N. P, Lance A, Kruger M. B, Close J. D. // Appl Opt. – 2008, – №47 28.

14. G. Bigun. Electron density near clean and alkali covered semiconductor surfaces / G. Bigun, Yu. Suchorski // Surface Science. – 1991. – №247 2–3. – С.111-114.

15. F. S. Hickernell. The piezoelectric semiconductor and acoustoelectronic device development in the sixties / Hickernell F. S. // IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control. – 2005. – №52. – С.737-45.

16. O. V Parasyuk., A. Novel. Effect of CO_2 Laser Induced Piezoelectricity in $Ag_2Ga_2SiS_6$ Chalcogenide Crystals / O. V. Parasyuk, G. L. Myronchuk, A. S. Krymus, et.al. // Crystals. – 2016. – №6 9. – С.107.

17. D. Wolpert. Temperature Effects in Semiconductors / Wolpert D., Ampadu P.; Adaptive Systems. Springer, New York. – 2011.

18. W. Kuznik, P. Rakus, K. Ozga, O. V. Parasyuk, A. O. Fedorchuk, L. V. Piskach, A. Krymus, I. V. Kityk / Eur. Phys. J. Appl. Phys. 70, 30501 (2015).

А.С. Крымусь, Г.Л. Мырончук к.ф.м.н., Г.П. Хмарук м.н.с., Д.Б. Мырончук ст.
Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ МОНОКРИСТАЛИВ $AgGaGe_3Se_8$

В работе рассмотрено влияние температуры и лазерного облучения на пьезоэлектрические свойства кристаллов $AgGaGe_3Se_8$. Исследовано лазерно индуцированный пьезоэлектрический эффект и градиент температур. А также показано, что данный эффект может быть использован для создания управляемых лазером пьезоэлектрических сенсоров.

Ключевые слова: *пьезоэлектрические свойства, градиент температур, халькогенидных материалы.*

A. Krymus, G. Myronchuk Ph.D, G. Hmaryk, D. Myronchuk
Lesya Ukrainka Eastern European National University, Lutsk

PIEZOELECTRIC SENSORS BASED ON CHALCOGENIDE MONOCRYSTALS $AgGaGe_3Se_8$

The influence of temperature and laser irradiation on the piezoelectric properties of $AgGaGe_3Se_8$ crystals is considered in the paper. The laser-induced piezoelectric effect and temperature gradient have been studied. A also shows that this effect can be used to create a laser-controlled piezoelectric sensors.

Keywords: *piezoelectric properties, temperature gradient, chalcogenide materials.*

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018.

© А.С. Кримусь, Г.Л. Мирончук, к.ф.м.н., Г.П. Хмарук, м.н.с, Д.Б. Мирончук студ.

УДК 621.791:621.926

Лебедев В.Г., д.т.н., проф., Фроленкова О.В., ассистент
Одесский национальный политехнический университет

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ZRO_2 КРУГАМИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. *Предметом исследования является математическое моделирование процесса шлифования напылённого керамического слоя на основе диоксида циркония при шлифовании алмазными и эльборовыми кругами, для обеспечения (получения) бездефектной поверхности термобарьерного слоя, с целью избежания отслаивания напылённого слоя от металла детали (изделия). Показано, что наилучшие значения остаточных напряжений (G=4,1*108 Па), при величине максимальной контактной температуры приблизительно равной 280°С на поверхности термобарьерного покрытия достигаются, при шлифовании эльборовым кругом ЛО 250/160 С10 100% (Nz25). Значения расчётных величин контактных температур и остаточных напряжений при углублении внутрь слоя по Y, при обработке как алмазным так и эльборовым кругами понижаются и начиная с глубины Y=6,5*10-4 мм, остаются без особых изменений. И эти показатели наилучшие при зернистости круга АС4 250/160 В2-01 100% и ЛО 250/160 С10 100% (Nz25)*

Ключевые слова: *диоксид циркония, теплозащитное покрытие, контактные температуры.*

Введение. Широкое применение различного вида покрытий в современной промышленности, обусловлено решением поставленных задач по улучшению эксплуатационных характеристик деталей, например, камер сгорания, систем трубопроводов и сопловой направляющего аппарата, газотурбинные лопатки и т.д. Термобарьерные покрытия нанесенные газотермическими методами, а именно: плазменным, газопламенным и газодинамическим напылением, электродуговой металлизации, плазменной и лазерной наплавки придают поверхности металлов повышенные твердость, термостойкость, антикоррозионные и многие другие свойства.

В частности, для увеличения срока службы рабочей поверхности турбинных лопаток, защиты от высокотемпературной газовой коррозии и высокого градиента температур, наносятся термобарьерные покрытия (ТВС) с помощью газопламенного напыления. В качестве теплового барьера чаще всего применяют оксид циркония стабилизированный оксидом иттрия.

На сегодняшний день применяется два основных метода – атмосферное плазменное напыление APS и электроннолучевое вакуумное плазменное нанесение EB-PVD керамических покрытий на металлические основания.

Любой метод не обеспечивает необходимую точность и заданную шероховатость поверхности. Все это вызывает необходимость после напыления проводить шлифование для достижения упомянутых параметров.

Однако, процесс шлифования характеризуется высокими контактными температурами, которые могут вызывать трещины напыленного слоя при шлифовании и после него. Возможно, проникновение теплового поля значительной температуры на границу раздела: напыленный слой – основной металл, что может привести к отслаиванию напыленного слоя из-за различия в коэффициентах теплового расширения напыленного слоя и основного металла. Оксид циркония обладает большим преимуществом, поскольку его коэффициент теплового расширения близок к коэффициенту теплового расширения большинства металлов. Это обстоятельство существенно уменьшает остаточные напряжения на границе покрытие-металл, что значительно снижает риск отслаивания термобарьерного слоя при шлифовании.

Кроме того, теплопроводность термобарьерного покрытия очень низкая и можно ожидать низких температур на границе раздела покрытие-металл.

Однако, сравнительно большие коэффициенты теплового расширения могут способствовать возникновению высоких остаточных напряжений, которые могут привести к трещинам напыленного слоя, повторному напылению с перешлифовкой. Следовательно, основным лимитирующим фактором при шлифовании напыленного термобарьерного слоя, является контактная температура шлифования.

© Лебедев В.Г., д.т.н., проф., Фроленкова О.В., ассистент

В настоящее время нет базы данных по назначению режимов шлифования кругами из КНБ и СА, которые бы обеспечивали бездефектный поверхностный слой после обработки.

Поскольку экспериментальные исследования температуры весьма трудоемкие, целесообразно математически промоделировать процесс шлифования, чтобы математически создать эту базу и в дальнейшем с помощью немногочисленных экспериментов уточнить математическую модель.

Цель работы – разработка математической модели шлифования покрытий из оксида циркония, кругами из КНБ и СА и математическое моделирование процесса шлифования с целью определения контактных температур шлифования не вызывающих дефектов поверхностного слоя.

Объект исследования – процесс шлифования синтетическими сверхтвердыми материалами.

Предмет исследования – шлифование керамического термобарьерного покрытия из ZrO_2.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Определить силы резания единичным зерном.
2. Определить тепловую мощность, развиваемую единичным зерном при резании термобарьерного слоя.
3. Определить величину теплового потока возникающего в пятне контакта круга с деталью путем суммирования тепловых потоков от единичных зерен.
4. Разработать алгоритм, блок-схему и саму программу расчетов (в среде MathCad), которая дает возможность определить суммарные силы резания, контактные температуры шлифования термобарьерного покрытия, глубину проникновения теплового поля контактной температуры.
5. Определить величину остаточных напряжений на поверхности покрытия, по толщине покрытия и на границе покрытие-металл.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В статье [1] приводятся сведения о влиянии кислорода на теплофизические свойства циркония и циркониевых сплавов: температуру плавления, температуру аллотропических превращений, теплоёмкость, теплопроводность, плотность и коэффициент линейного расширения.

Авторы работы [2] исследуют возможность применения оптических методов неразрушающего контроля теплозащитных керамик в промышленных условиях. Были исследованы спектральные характеристики объемной Al_2O_3 керамики и ZrO_2 покрытия, применяемых для тепловой защиты в энергетической промышленности. Изучались возможности применения к защитным Al_2O_3 и ZrO_2 керамикам различных оптических методов неразрушающего контроля (визуальные методы, методы зондирования, методы анализа углового спектра рассеяния, методы анализа динамики спекл-изображений). После проведения ряда экспериментов было установлено, что более полную информацию о качестве керамики можно получить из анализа динамики спекл-изображений.

В работе [4] с целью улучшения качества сцепления покрытия с материалом подложки и снижения пористости, приводятся результаты исследования макроструктуры и микротвердости плазменных покрытий, подвергнутых электромеханическому упрочнению.

Целью работы [7] было исследование влияния исходных материалов на структуру и свойства теплозащитного покрытия. Авторами исследовался порошок окиси циркония стабилизированный иттрием в исходном состоянии, после обработки плазмой и образцы теплозащитного покрытия, полученные из порошков разного фракционного состава.

В обзоре представленной литературы рассматривались вопросы связанные с исследованием макроструктуры и микротвердости плазменных покрытий, подвергнутых электромеханическому упрочнению; возможностью применения оптических методов неразрушающего контроля теплозащитных керамик; исследование влияния исходных материалов на структуру и свойства теплозащитного покрытия и, о влиянии кислорода на теплофизические свойства циркония и циркониевых сплавов, но не обсуждалась проблема последующей механической обработки напыленного керамического слоя из оксида циркония, следовательно, исследования в настоящей работе представляют собой новизну и актуальность.

3. Материалы и методы исследований. Исследования проведены с применением математического моделирования. В качестве материала используется оксид циркония, в

© Лебедев В.Г., д.т.н., проф., Фроленкова О.В., ассистент

качестве режущего инструмента шлифовальные круги из синтетических сверхтвердых материалов.

4. Аналитические и экспериментальные исследования. Шлифование характеризуется такими специфическими особенностями, как: силы резания при снятии отдельных стружек абразивными зернами; толщина слоя, снимаемого одним абразивным зерном; тепловые явления - мгновенные и контактные температуры. [6].

Для того, чтобы определить контактную температуру шлифования необходимо знать тепловую мощность, которая образуется в пятне контакта круга с деталью. Указанная тепловая мощность Q, является суммой тепловых мощностей зерен круга, которые одновременно работают в зоне контакта, следовательно, схема расчета должна быть такая:

1. Средняя величина тепловой мощности отдельного режущего зерна, зависящая от средней толщины стружки снимаемой зерном.
2. Количество зерен, одновременно работающих в пятне контакта.
3. Суммирование этих величин, что дает суммарный тепловой импульс.

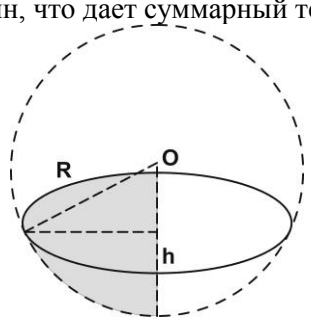


Рис.1. Площадь половины контакта шарового сектора с металлом

Режущие зерна на смотря на то, что они заострены, имеют радиусы закругления, поэтому если принять модель зерна с радиусом закругления в виде части шаровой поверхности, то при углублении зерна в металл на некоторую величину h, мы получим площадь половины контакта шарового сектора с металлом (рис.1):

$$\frac{1}{2}S = 2\pi Rh \qquad (1)$$

Напряжение скалывания, определяется как:

$$G_{скалывания} = \frac{P_{Z\,ед}}{1/2\,S} = \frac{2P_{Z\,ед}}{S}, \qquad (2)$$

Следовательно, тангенциальная сила резания единичным зерном равна:

$$P_{Z\,ед} = G_{скаливаня} \times \frac{1}{2}S, \qquad (3),$$

а произведение $P_{Z\,ед}$ на скорость вращения круга, будет равно тепловой мощности, которую развивает единичное зерно:

$$q = P_{ZC} \times V_{KP}, \qquad (4).$$

Однако, для того чтобы определить q, тепловую мощность от единичного зерна необходимы надежные данные по G скалывания, которых для оксида циркония в литературе нет. Поэтому, для определения тепловой мощности q, была использована методика С.Г. Редько, [5] которая основывается на вдавливании алмазной пирамидки на определенную глубину.

Так как для создания модели источника тепла, в первую очередь необходимо знать единичную силу P_Z, которая достаточно точно определяется при шлифовании металлических сплавов по значению предела прочности на растяжение и сдвиг, и по величине площади контакта зерна с металлом. Применяя вышеупомянутую методику, предложенную С.Г. Редько, дало возможность по величине углубления зерна в металл определять величину P_Y, а потом P_Z, как $0{,}55P_Y$. В результате получается простая зависимость (2):

$$P_Z(t) = 7{,}15 \times H_V \times h(t)^2 \times k_d, \qquad (5)$$

В результате расчетов, проведенных по формуле (4), мы получаем, что тепловая мощность от единичного зерна, имеет величину до q=103,16 Вт. Это обуславливает высокую плотность суммарного теплового потока в зоне шлифования.

Учитывая, величины коэффициента тепловой активности керамики ZrO_2 (т.е. термобарьерного покрытия):

$$\varepsilon_{кер} = 3{,}3 \times 10^3, \; Дж / м^2 Сс^{0,5} \qquad (6)$$

и коэффициента тепловой активности комплекса (зерно+связка)

$$\varepsilon_{кер} = 8{,}55 \times 10^3, \; Дж / м^2 Сс^{0,5} \qquad (7),$$

были получены расчетные значения теплового потока Q(t), который переходит в шлифуемую деталь, представлены (табл. 1).

Таблица 1

Величина плотности теплового потока Q в зависимости от изменения глубины шлифования t, при режимах Vкр=30 м/с, Vд=1/6 м/с, Sп=0,001 м/об, круг ЛО 180/150V1 100%

t, мм	$5{,}0*10^{-6}$	$1{,}0*10^{-5}$	$1{,}5*10^{-5}$	$2{,}0*10^{-5}$	$2{,}5*10^{-5}$	$3{,}0*10^{-5}$
Q(t), Вт/м^2	$4{,}3*10^6$	$0{,}86*10^7$	$1{,}29*10^7$	$1{,}72*10^7$	$2{,}15*10^7$	$2{,}58*10^7$

Анализируя расчетные данные, можно сказать, что с уменьшением глубины шлифования, величина плотности теплового потока уменьшается.

Алгоритм расчета представлен на рисунке 2. Алгоритм дает возможность определить: суммарные силы резания, контактную температуру шлифования термобарьерного слоя и глубину проникновения теплового поля контактной температуры.

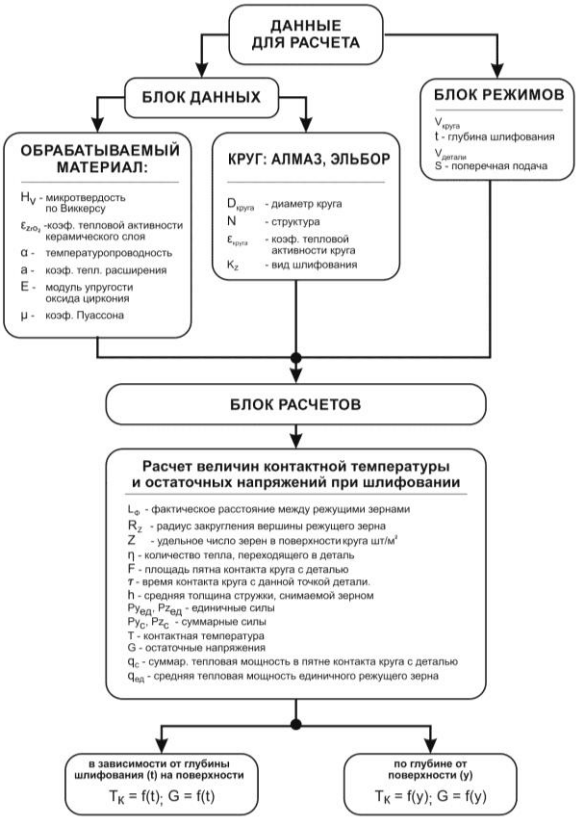


Рис. 2 Алгоритм расчетов для аналитического анализа температурного процесса при шлифовании термобарьерного покрытия и оценки напряженного напыленного слоя после шлифования

Перед запуском расчетной части программы, производится загрузка данных характеризующих обрабатываемый материал, шлифовальный круг и режимы обработки. Далее идет блок расчетов, в котором рассчитываются величины контактных температур $T_к$ и остаточных напряжений G на поверхности в зависимости от глубины шлифования (t) и в глубину от поверхности шлифования по координате (y).

В этом же блоке, определяются значения величин $P_{Yед}$ и $P_{Zед}$ и, соответственно, значения суммарных сил P_{Yc} и P_{Zc}. Это дает возможность рассчитать значение суммарной тепловой мощности в пятне контакта круга с деталью q_c. Расчеты производились для кругов: синтетический алмаз –

АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12),
АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16),
АС4 250/160 В2-01 100% (Nz25);
и КНБ
ЛО 125/100 С10 100% (Nz12),
ЛО 160/125 С10 100% (Nz16),
ЛО 250/160 С10 100% (Nz25).

Данный алгоритм был реализован в программе MatCad. В результате расчетов получены следующие данные:

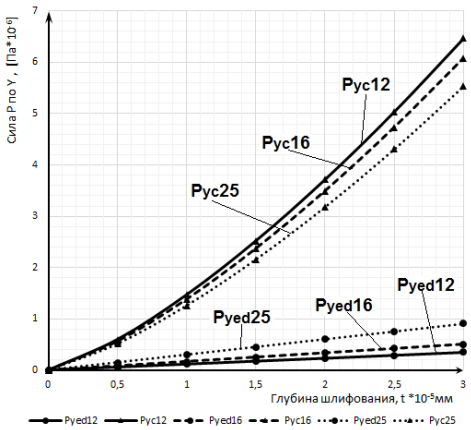


Рис. 3. Значения сил P_{Yed} и P_{YC} в зависимости от глубины шлифования кругами АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12), АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16), АС4 250/160 В2-01 100% (Nz25)

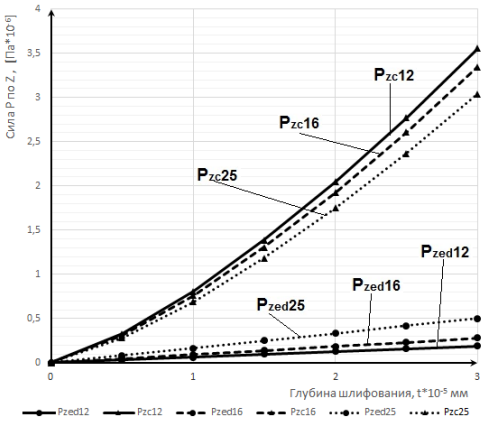
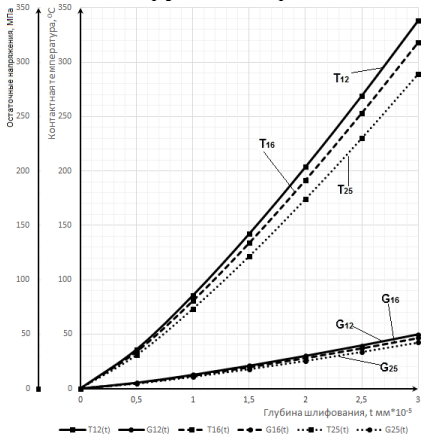
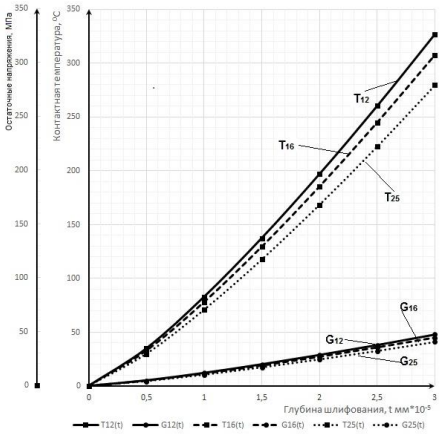


Рис. 4. Значения сил Pz_{ed} и Pz_C в зависимости от глубины шлифования кругами КНБ ЛО 125/100 С10 100% (Nz12), ЛО 160/125 С10 100% (Nz16), ЛО 250/160 С10 100% (Nz25)

Анализируя полученные графики, приведенные на рисунке 3, можно отметить, что при углублении зерна в термобарьерное покрытие единичная сила P_{Yed} при изменении величины зернистости круга N12, N16, N25 при шлифовании как алмазным, так и эльборовым кругами увеличивается, соответственно и суммарные силы P_{YC} увеличиваются. Оптимальными величинами при расчетах получаются значения при шлифовании алмазным кругом с зернистостью N16, потому что они естественно усредняют значения получаемые при использовании зернистости N12 и N25. Соответственно полученные аналитическим путем единичная и суммарная силы P_{ZC} и P_{Zed} (рисунок 4) тоже оптимальные при шлифовании алмазным кругом с зернистостью N16.



а



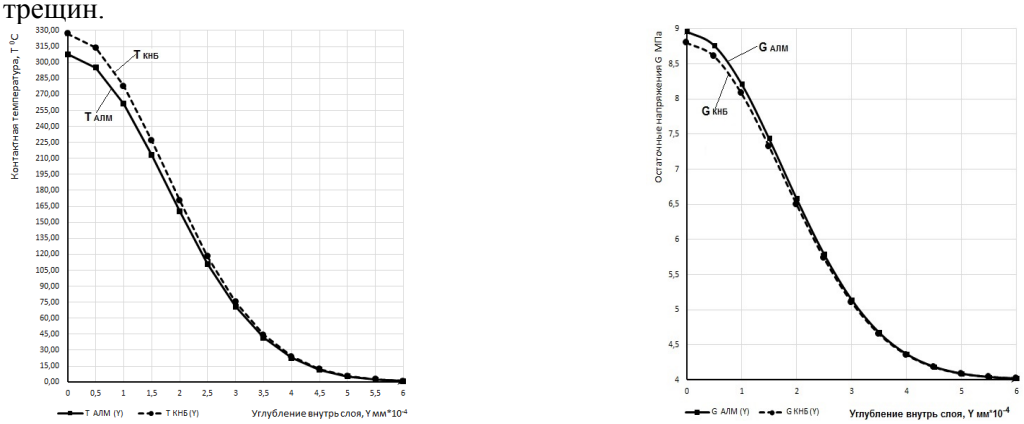
б

Рис. 5. Значения контактных температур и напряжений на поверхности при шлифования кругами АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12), АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16), АС4 250/160 В2-01 100% (Nz25) (а) и ЛО 125/100 С10 100% (Nz12), ЛО 160/125 С10 100% (Nz16), ЛО 250/160 С10 100% (Nz25) (б)

На рисунке 5 (а, б) получены зависимости значений контактных температур T(t) и остаточных напряжений G(t) на поверхности шлифования кругами АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12), АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16), АС4 250/160 В2-01 100% (Nz25) (а) и ЛО 125/100 С10 100% (Nz12), ЛО 160/125 С10 100% (Nz16), ЛО 250/160 С10 100% (Nz25) (б), можно отметить, что при шлифовании эльборовым кругом с зернистостью Nz25 значения максимальной контактной температуры приблизительно равны 280°С и соответственно при этой температуре, при шлифовании на глубину $3*10^{-5}$мм, наименьшее расчетное значение остаточного напряжения будет равно, $G=4,1*10^{8}$ Па.

Анализируя значения контактных температур и значения остаточных напряжений можно сделать вывод, что при выбранных режимах шлифования контактные температуры не

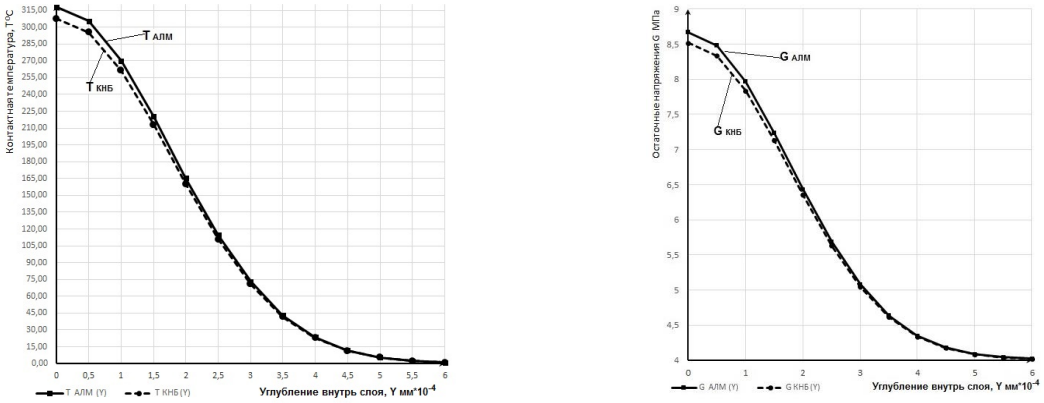
вызывают значительных остаточных напряжений, которые могли бы привести к образованию трещин.



а) б)

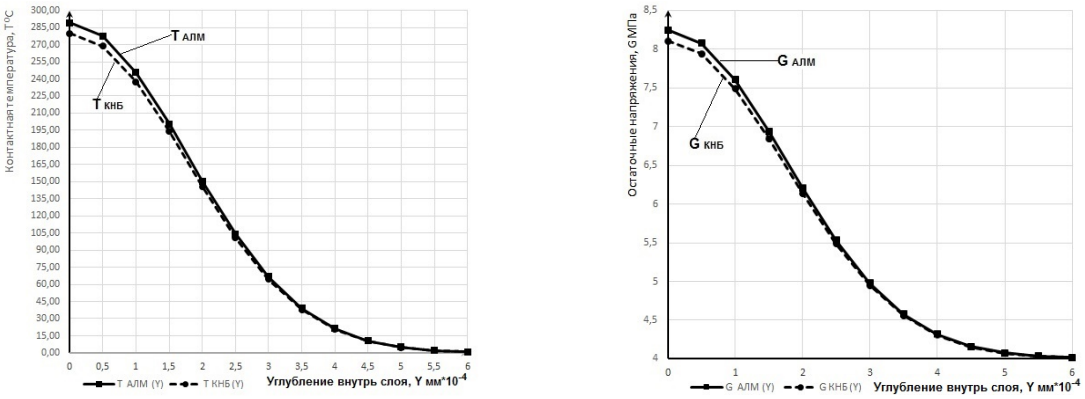
Рис. 6. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) на величину углубления внутрь прошлифованного слоя Y, при шлифования кругами АС4 125/100 В2-01 100% (Nz12) и ЛО 125/100 С10 100% (Nz12)

Далее проанализируем результаты аналитических расчетов, изображенных на рисунках 6–8. Графически показано, что при углублении внутрь слоя по Y, значения контактных температур T(Y) и остаточных напряжений G(Y) как при обработке алмазным кругом, так и при эльборовом понижается и остается практически без изменений начиная со значения Y= 6,5º*10^{-4}мм. Наилучшие результаты получены при величине зернистости шлифовального круга Nz25.



а) б)

Рис. 7. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) на величину углубления внутрь прошлифованного слоя Y при шлифования кругами АС4 160/125 В2-01 100% (Nz16) и ЛО 160/125 С10 100% (Nz16)



а) б)

Рис. 8. Значения контактных температур (а) и остаточных напряжений (б) на величину углубления внутрь прошлифованного слоя Y при шлифования кругами АС4 250/160 В2-01 100% (Nz25) и ЛО 250/160 С10 100% (Nz25)

Данные расчетов показывают, что на нижней кромке напыленного термобарьерного слоя температуры, соответствуют температуре окружающей среды, а величина остаточных напряжений настолько мала, что не может вызвать отслаивание напыленного слоя.

Обсуждение результатов. При анализе данных полученных расчетным путем, можно сказать, что знание оптимальных значений сил резания P_{Yed} P_{YC} P_{Zed} P_{ZC}, дает возможность рассчитать допустимые значения контактных температур и величины остаточных напряжений при выбранных режимах шлифования.

Контактная температура является наиболее важным фактором, она распространяется вглубь шлифуемой поверхности, разогревая ее, что может вызывать появление значительных остаточных напряжений в напыленном слое.

Наше исследование показывает, что шлифование алмазными и эльборовыми кругами с указанными выше зернистостями и с теми режимами, которые используются при обработке, является безопасным технологическим процессом, как для термобарьерного слоя, так и для основного металла, на который данный термобарьерный слой напылен.

Выводы

1. При расчете значений единичных сил P_{Yed} и P_{Zed} и суммарных сил P_{ZC} и P_{YC} в зависимости от глубины шлифования, получены оптимальные значения при шлифовании алмазным кругом с зернистостью Nz16 (АС4 160/125 В2-01 100%).

2. Произведенный аналитический расчет при глубине шлифования $3*10^{-5}$мм, обработка эльборовым кругом ЛО 250/160 С10 100% с зернистостью Nz25 на поверхности термобарьерного покрытия, дает наилучшие значения остаточных напряжений, $G=4,1*10^{8}$ Па при величине максимальной контактной температуры приблизительно равной 280°С, т.е. при этой температуре остаточный напряжения будут наименьшие.

3. При расчете величин контактных температур и остаточных напряжений при углублении внутрь слоя по Y, при обработке как алмазным так и эльборовым кругами значения контактных температур и остаточных напряжений понижаются и начиная с глубины $Y=6,5*10^{-4}$ мм, остаются без особых изменений. И эти показатели наилучшие для круга АС4 250/160 В2-01 100% при зернистости Nz25 и ЛО 250/160 С10 100% при зернистости Nz25.

4. Результаты исследования показывают, что шлифование алмазными и эльборовыми кругами термобарьерных покрытий при исследованных в настоящей работе режимах, является приемлемым технологическим процессом, который обеспечивает бездефектную поверхность термобарьерного слоя и исключает его отслаивание от основного металла детали.

Список использованных источников

1. *Черняева Т.П.* Теплофизические свойства сплавов цирконий-кислород / Т. П. *Черняева*, *А. И. Стукалов*, В. *М. Грицина* // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика и технология конструкционных материалов». 2002, №1, с. 106-111.

2. *Ропот П. И., Васильев Р. Ю.* Дефектоскопия ZrO_2 покрытий и объемных Al_2O_3 керамик оптическим методом / Веснік МДПУ імя І. П. Шамякіна. Серия «Физика» г.Мозырь, Гомельская обл.,– 2007. – № 1(16). – С.14-20.

3. *Н.Н.Клименко, В.Г.Лебедев, и др*. Методика измерения температур шлифования термопарами при обработке наплавленных и напыленных поверхностей машиностроительных деталей. Физические и компьютерные технологии (Труды 20-й Международной научно-практической конференции, 23-24 декабря 2014). – Д: ЛИРА. – Харків, 2015. – С. 34-38.

4. *Багмутов В. П.* Исследование микротвердости плазменных покрытий после электромеханической обработки / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров, С. Н. Паршев // Известия ВолгГТУ. – 2007. – № 5. – С.125-130.

5. *РедькоС.Г.* Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С.Г.Редько. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1986. – 231 с.

6.*Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов / Е.Н.Маслов. – М. : Машиностроение, 1984. – 320 с.

7. *Мельников А.А., Христосова В.Ю.* Исследование влияния размеров частиц исходного порошка окиси циркония на структуру и свойства теплозащитного покрытия на деталях ГТД / Известия Самарского научного центра РАН 2015 . – № 6-3(17). – С.683-685.

© Лебедев В.Г., д.т.н., проф., Фроленкова О.В., ассистент

В.Г. Лебедєв д.т.н., проф., О.В. Фроленкова асистент
Одеський національний політехнічний університет

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРИТТЯ ZRO_2 КОЛАМИ З СИНТЕТИЧНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Предметом дослідження є математичне моделювання процесу шліфування напиляним керамічного шару на основі діоксиду цирконію при шліфуванні алмазними і ельборовими колами, для забезпечення (отримання) бездефектной поверхні термобарьерного шару, з метою уникнення відшаровування напиляним шару від металу деталі (вироби).

*Показано, що найкращі значення залишкових напружень (G = 4,1*108 Па), при величині максимальної контактної температури приблизно 280 °С на поверхні термобарьерного покриття досягаються, при шліфуванні ельборовим кругом ЛО 250/160 С10 100% (Nz25).*

*Значення розрахункових величин контактних температур і залишкових напруг при поглибленні всередину шару по Y, при обробці як алмазним так і ельборовим колами знижуються і починаючи з глибини Y = 6,5 * 10-4 мм, залишаються без особливих змін. І ці показники найкращі при зернистості круга АС4 250/160 В2-01 100% і ЛО 250/160 С10 100% (Nz25)*

***Ключові слова**: діоксид цирконію, теплозащитное покриття, контактні температури.*

V.G. Lebedev doctor of technical sciences, prof., O.V. Frolenkova assistant
Odessa National Polytechnic University

IMITATION MODELING OF THE GRINDING PROCESS OF ZRO_2 THERMAL BARRIER COATING BY CIRCLES OF SYNTHETIC SUPERHARD MATERIALS

The subject of the study is the mathematical simulation of the grinding process of a sprayed ceramic layer based on zirconium dioxide when grinding with diamond and borazon circles to provide a defect-free surface of the thermobarrier layer, in order to avoid flaking of the sprayed layer from the metal of the component (product).

It is shown that the best values of residual stresses (G=4.1 108 Pa), with a maximum contact temperature of about 280 ° C on the surface of the thermobarrier coating, are achieved when grinding by the borazon circle LO 250/160 C10 100% (Nz25).*

*The values of the calculated values of contact temperatures and residual stresses when deepening inside of the layer along Y, during processing by both diamond and borazon circles decrease and starting from a depth Y=6.5*10-4 mm remain unchanged. And these figures are the best with the grain size of the circle AC4 250/160 B2-01 100% and LO 250/160 C10 100% (Nz25).*

***Key words**: zirconia, thermal protective coating, contact temperatures.*

Стаття надійшла до редакції 01.02.2018.

© Лебедев В.Г., д.т.н., проф., Фроленкова О.В., ассистент

УДК 621.86

Ляшук О. Л. д. т. н, доц., Дячун А.Є. к. т. н. доц, О.Л. Третьяков
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕСІ НАРІЗАННЯ ЗОВНІШНІХ РАДІУСНИХ КАНАВОК ПРИСТРОЄМ ІЗ ДЕКІЛЬКОМА РІЗЦЯМИ

Наведено конструкцію пристрою для визначення деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок чотирма різцями одночасно Виведені аналітичні залежності для визначення деформації заготовки в напрямку осі y при статичних навантаженнях та одержано диференціальне рівняння пружної лінії деформації заготовки в напрямку осі z: Наведено графічні залежності величини деформації в напрямку осі y заготовки із сталі діаметром d=20 мм довжиною l=140мм в процесі нарізання зовнішньої канавки. Встановлено, що для забезпечення вищої точності нарізання зовнішньої канавки доцільно застосувати пристрій для нарізання канавки замість використання одного різця, оскільки це призводить до зменшення величини деформації заготовки за рахунок вищої жорсткості системи заготовка-пристрій, а також часткової компенсації сил різання протилежно розташованих різців.

Ключові слова: *гвинтова канавка, технологічний процес, гвинтовий елемент, різцева головка*

Постановка проблеми. Стан розвитку технологічних процесів у машинобудуванні вимагає істотного покращення експлуатаційних і технологічних параметрів машин та технологічного оснащення, які б забезпечили високу конструктивну та технологічну якість виготовлення деталей машин, що дало б змогу підвищити та покращити якість продукції, підвищити надійність і довговічність машин, зменшити собівартість їх виготовлення і відновлення. На основі вище сказаного виникає необхідність у дослідженні навантажень на елементи системи пристрій-різці-заготовка та характер деформації її складових.

Аналіз результатів останніх досліджень. Дослідження технологічних процесів проточування циліндричних поверхонь різцевими головками та їх динаміки присвячені роботи вчених Глубенцова А.Н. [1], Комарова М.С. [2], Гевка Б.М. [3] та інших. Однак питання навантаження окремих елементів різцевих головок в процесі нарізання в їхніх роботах не розглядались. Дослідженням питання проектування і виготовлення гвинтових елементв присвячені праці Гевка Б.М. [3, 9], Пилипця М.І. [3, 8] , Рукотяна С.Е. [6], Василькова В.В. [3, 10] та багатьох інших. Однак в цих працях обґрунтовано лише технології виготовлення гвинтових елементів, а питання проектування технологічних процесів і технологічного забезпечення для виготовлення вузлів на їх основі залишилося поза увагою.

Мета роботи є дослідження деформацій окремих елементів різцевих головок, зокрема різців в процесі нарізання ними зовнішніх радіусних канавок.

Реалізація роботи. Деформація заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок декількома різцями одночасно на токарно-гвинторізному верстаті призводить до виникнення відхилень форми гвинтової канавки, тому дослідження цього процесу є важливою задачею. Основними причинами відхилень форми гвинтової канавки є:

1) недосконалість конструкції різців, їх ріжучих і направляючих елементів;
2) неправильна подача інструментів на початку проточування;
3) неправильно вибрані режими різання;
4) не достатня жорсткість пристрою для нарізання канавки;
5) неоднорідність матеріалу оброблюваної деталі;
6) втрата стійкості різців в процесі різання;
7) затуплення ріжучих кромок різців;
8) відсутність взаємного врівноважування радіальних сил різання на різцях.

Перші чотири причини носять систематичний характер і можуть бути легко усунені. Решта причин потребують більш детального вивчення, тому що їх поява носить випадковий характер.

Отже, найсуттєвіший вплив на точність гвинтової канавки мають фактори, що діють в площині, яка перпендикулярна осі обертання заготовки.

© Ляшук О. Л. д. т. н, доц., Дячун А.Є. к. т. н. доц, О.Л. Третьяков

В процесі розрахунків приймаємо жорсткість шпинделя і патрона набагато більшою ніж жорсткість заготовки, тому деформації у цих елементах не враховані. Радіальні переміщення заготовки визначаємо із аналізу деформацій пружної системи, представленої на рисунку 1, на якому зображено розрахункову схему для визначення деформації заготовки 5 в процесі нарізання зовнішньої радіусної канавки 8 чотирма різцями 1, 2, 3, 4 одночасно, що розміщені у пристрої для нарізання канавки. Ріжучі кромки різців опираються на поверхні різання. Розглянемо в першому наближенні статичні деформації заготовки.

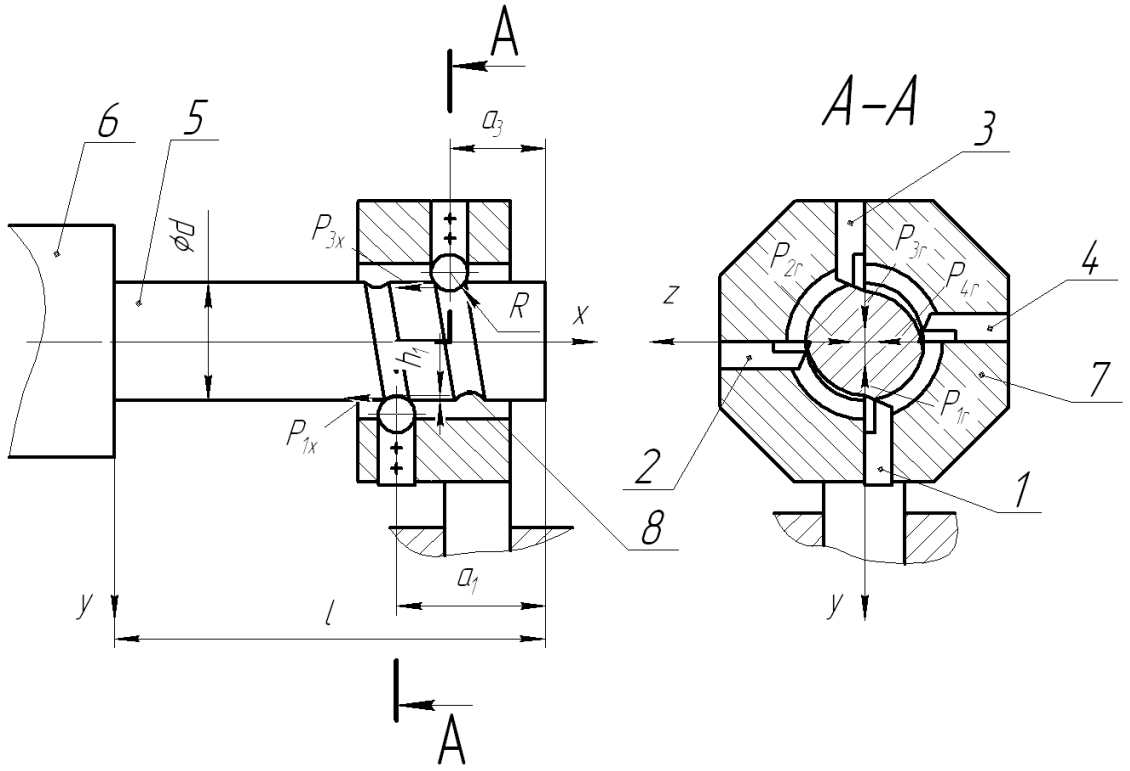


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок чотирма різцями одночасно: 1, 2, 3, 4 – радіусні канавочні різці; 5 – заготовка; 6 – патрон; 7 – пристрій для нарізання канавки; 8 – зовнішня радіусна канавка

На заготовку в процесі різання радіусної канавки діють радіальні P_{1r}, P_{2r}, P_{3r}, P_{4r}, осьові P_{1x}, P_{2x}, P_{3x}, P_{4x} та тангенціальні P_{1z}, P_{2z}, P_{3z}, P_{4z} сили різання на кожному різці. Ці сили різання залежать від величини подачі різців S, швидкості різання V, радіуса R та глибини канавки h_i і визначаються експериментальним методом. При цьому їх можна представити степеневими функціями:

$$P_{ir} = K_1 R^{m_1} S^{y_1} V^{n_1} h_i^{z_1}; \quad (1)$$

$$P_{ix} = K_2 R^{m_2} S^{y_2} V^{n_2} h_i^{z_2}; \quad (2)$$

$$P_{iz} = K_3 R^{m_3} S^{y_3} V^{n_3} h_i^{z_3}, \quad (3)$$

де K_1, K_2, K_3, m_1, m_2, m_3, y_1, y_2, y_3, n_1, n_2, n_3, z_1, z_2, z_3 – коефіцієнти, що визначаються експериментально і залежать від властивостей оброблюваних та різальних матеріалів, а також від геометрії різального інструменту;
i – номер різця.

Для заготовки при статичному навантаженні диференціальне рівняння пружної лінії деформації в напрямку осі y в процесі нарізання зовнішньої канавки одним різцем без застосування пристрою для нарізання канавки має наступний вигляд [7, 8]:

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = M(x) - P_{1x}\cdot y, \quad (4)$$

де E – модуль пружності матеріалу заготовки, МПа;
I – момент інерції поперечного перерізу циліндричної заготовки, мм^4;
$M(x)$ - момент згину, Н·мм;

Диференціальне рівняння пружної лінії деформації заготовки в напрямку осі y в процесі нарізання зовнішньої канавки декількома різцями із застосуванням пристрою для нарізання канавки має наступний вигляд:

$$(EI + E_2 I_2)\frac{d^2 y}{dx^2} = M(x) - (P_{1x} + P_{2x} + P_{3x} + P_{4x}) \cdot y\,, \tag{5}$$

де E_2 – модуль пружності матеріалу пристрою для нарізання канавки, МПа;
I_2 – момент інерції поперечного перерізу пристрою для нарізання канавки в напрямку осі y, мм^4.

Момент згину визначаємо за формулою:

$$M(x) = \int_x^{l-a_3} P_{3r}dx + \int_x^{l-a_1} -P_{1r}dx + M(0)\,, \tag{6}$$

де l – довжина заготовки, мм;
$M(0)$=0 – момент згину в початковому перерізі, Н·мм;
a_i – відстань від кінця заготовки до середини розташування різця, мм;

Підставляючи рівняння (6) в рівняння (5), одержуємо:

$$(EI + E_2 I_2)\frac{d^2 y}{dx^2} = \int_x^{l-a_3} P_{3r}dx + \int_x^{l-a_1} -P_{1r}dx - (P_{1x} + P_{2x} + P_{3x} + P_{4x}) \cdot y\,. \tag{7}$$

Момент інерції поперечного перерізу циліндричної заготовки [7]:

$$I = \frac{\pi d^4}{64}\,, \tag{8}$$

де d – діаметр циліндричної заготовки, мм.

Після інтегрування рівняння (7), враховуючи (8), одержуємо:

$$\left(E\frac{\pi d^4}{64} + E_2 I_2\right)\frac{d^2 y}{dx^2} = P_{3r}(l - a_3 - x) - P_{1r}(l - a_1 - x) - (P_{1x} + P_{2x} + P_{3x} + P_{4x}) \cdot y\,. \tag{9}$$

Диференціальне рівняння (9) описує деформацію заготовки в напрямку осі y при статичних навантаженнях.

Проводячи аналогічні розрахунки, одержуємо диференціальне рівняння пружної лінії деформації заготовки в напрямку осі z:

$$\left(E\frac{\pi d^4}{64} + E_2 I_3\right)\frac{d^2 z}{dx^2} = P_{4r}(l - a_4 - x) - P_{2r}(l - a_2 - x) - (P_{1x} + P_{2x} + P_{3x} + P_{4x}) \cdot z\,. \tag{10}$$

де I_3 – момент інерції поперечного перерізу пристрою для нарізання канавки в напрямку осі z, мм^4.

Загальні розв’язки диференціальних рівняння (9) та (10) мають вигляд:

$$y = A_1 \sin(k_1 x) + A_2 \cos(k_1 x) + y^*\,, \tag{11}$$

$$z = A_3 \sin(k_2 x) + A_4 \cos(k_2 x) + z^*\,, \tag{12}$$

де A_1, A_2, A_3, A_4 – коефіцієнти, які визначаються із початкових умов, мм;
y^*, z^* - часткові розв'язки рівнянь;
k_1, k_2 – частотні характеристики.

Початкові умови для розв'язку рівнянь (9) та (10) наступні при x=0: y=0, $\frac{dy}{dx}=0$, z=0, $\frac{dz}{dx}=0$.

Відхилення від круглості деталі після проточування визначається виразом

$$\Delta r = y - z\,. \tag{13}$$

Загальна деформація заготовки при статичних навантаженнях:

$$u = \sqrt{y^2 + z^2}\,. \tag{14}$$

Оскільки диференціальні рівняння (9) та (10) є досить складними, проводимо його точний розв'язок за допомогою числового методу. Результати розв'язку представлено у вигляді графіків на рис. 2, 3 , 4.

Реальне значення величин деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок є вищими внаслідок виникнення динамічних навантажень. Оскільки частота обертання заготовки є набагато нижчою за частоту власних коливань заготовки та пристрою для нарізання канавки і ймовірність виникнення резонансу є незначною, реальне значення величини деформації заготовки в процесі нарізання зовнішніх радіусних канавок визначається добутком величини загальної деформації заготовки при статичних розрахунках на коефіцієнт динамічності: $u_d = u \cdot k_d$.

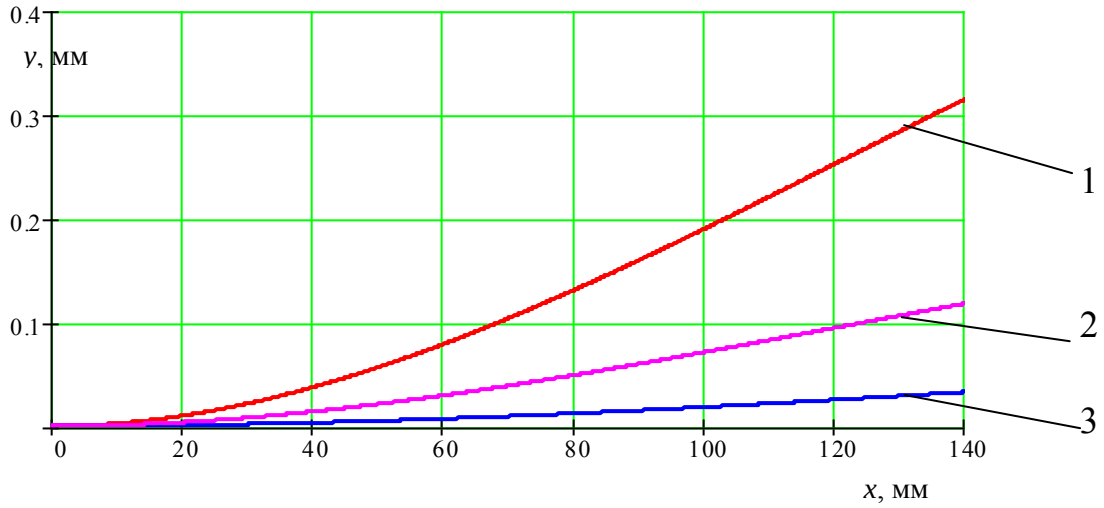


Рис. 2. Графіки залежності величини деформації в напрямку осі y заготовки із сталі діаметром d=20 мм довжиною l=140мм в процесі нарізання зовнішньої канавки: 1) при нарізанні канавки одним різцем без застосуванням пристрою для нарізання канавки; 2) при врізанні першого різця, коли не відбувається часткова компенсація сил різання протилежно розташованих різців із застосуванням пристрою для нарізання канавки 3) при нарізанні канавки всіма різцями із застосуванням пристрою для нарізання канавки

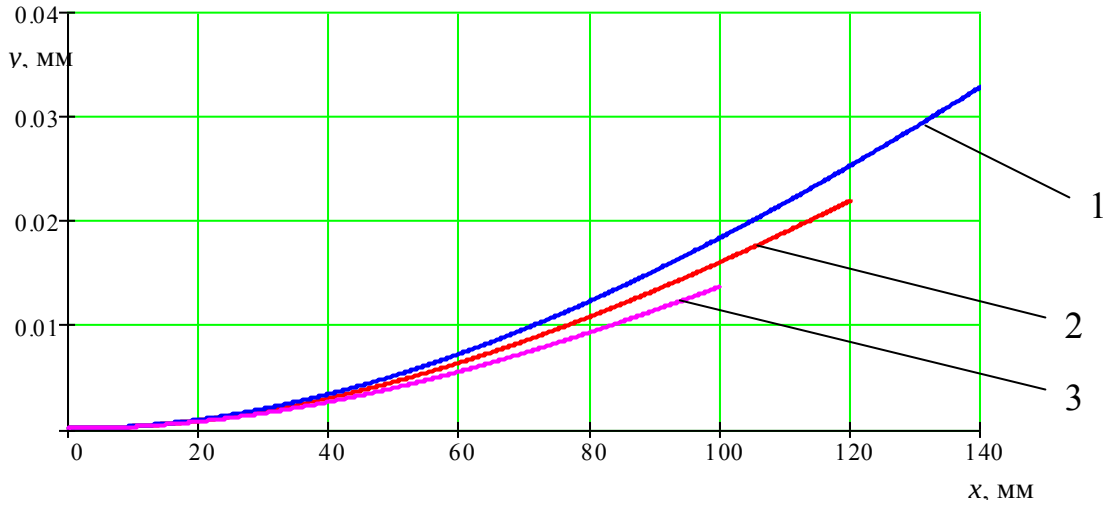


Рис. 3. Графіки залежності величини деформації в напрямку осі *y* заготовки із сталі діаметром *d*=20 мм при нарізанні канавки всіма різцями із застосуванням пристрою для нарізання канавки: 1) *l*=140мм; 2) *l*=120мм; 3) *l*=100мм

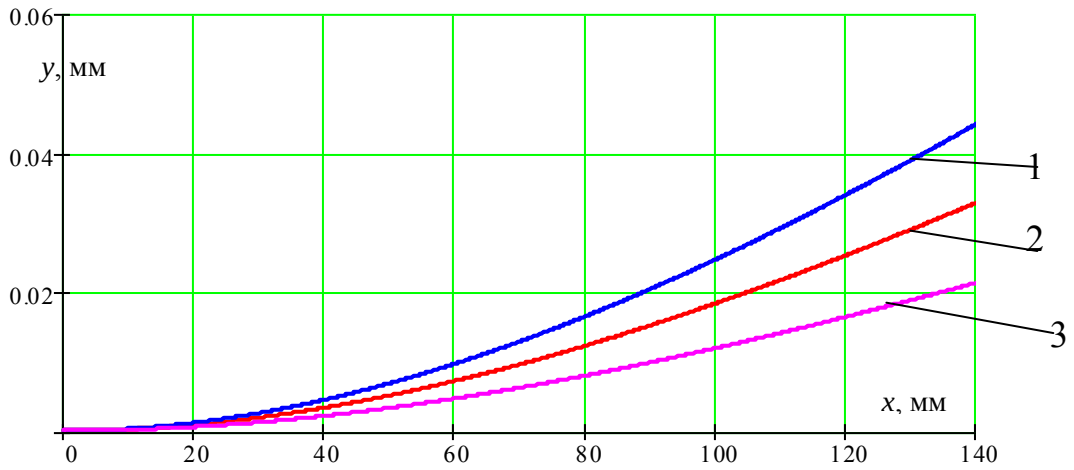


Рис. 4. Графіки залежності величини деформації в напрямку осі *y* заготовки із сталі довжиною *l*=140мм при нарізанні канавки всіма різцями із застосуванням пристрою для нарізання канавки: 1) *d*=15мм; 2) *d*=20мм; 3) *d*=25мм

Висновки. Для забезпечення вищої точності нарізання зовнішньої канавки доцільно застосувати пристрій для нарізання канавки замість використання одного різця, оскільки це призводить до зменшення величини деформації заготовки за рахунок вищої жорсткості системи заготовка-пристрій, а також часткової компенсації сил різання протилежно розташованих різців. Із рисунка 3 можна побачити, що збільшення довжини заготовки *l* призводить до збільшення величини деформації заготовки в напрямку осі *y*, а на рисунку 4 наведено, що зменшення діаметра заготовки *d* призводить до збільшення величини деформації заготовки в напрямку осі *y*.

Інформаційні джерела

1. Голубенцев А.Н. Динамика переходных процессов в машинах со многими массами / Голубенцев А.Н. – М.: МАШГИЗ, 1969. – 238 с.

2. Комаров М.С. Динамика механизмов машин / Комаров М.С. – М.: Машиностроение, 1969. – 296 с.

3. Теоретичні основи формоутворення різнопрофільних гвинтових заготовок деталей машин / [Гевко Б.М., Пилипець М.І., Васильків В.В., Радик Д.Л.]. – Тернопіль: ТДТУ, 2009. – 457 с.

© Ляшук О. Л. д. т. н, доц., Дячун А.Є. к. т. н. доц, О.Л. Третьяков

4. Павловський М. А. Теоретична механіка / Павловський М. А. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.

5. Бронштейн И. Н. Справочник по математике / И. Бронштейн, К. Семендяев – М.: Наука, 1981. – 718с.

6. Деформация при холодной вальцовке спиралей шнеков / С.Е.Рокотян, В.Е. Гурвич // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – №10. – С. 8-10.

7. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М. : Наука, 1976. – 608 с.

8. Пилипець М.І. Науково-технологічні основи виробництва навивних заготовок деталей машин: дис... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Михайло Ількович Пилипець; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». – Львів, 2002. – 445 с.

9. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей / [Б. М. Гевко, О. Л. Ляшук, І. Б. Гевко та ін.]. – Тернопіль : ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 367 с.

10. Васильків В.В. Розвиток науково-прикладних основ розроблення технологій виробництва гвинтових і шнекових заготовок з використанням уніфікації: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.08 / Василь Васильович Васильків; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». – Львів, 2015. – 312 с.

Ляшук О. Л. д. т. н, доц., Дячун А.Е. к. т. н. доц, О.Л. Третьяков
Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ НАРЕЗКИ ВНЕШНИХ РАДИУСНЫЕ КАНАВОК УСТРОЙСТВОМ С НЕСКОЛЬКИМИ РЕЗЦАМИ

Приведено конструкцию устройства для определения деформации заготовки в процессе резки внешних радиусных канавок четырьмя резцами одновременно. Выведенные аналитические зависимости для определения деформации заготовки в направлении оси y при статических нагрузках и получено дифференциальное уравнение упругой линии деформации заготовки в направлении оси z Приведены графические зависимости величины деформации в направлении оси y заготовки из стали диаметром d = 20 мм длиной l = 140мм в процессе резки внешней канавки. Установлено, что для обеспечения высокой точности резки внешней канавки целесообразно применить устройство для нарезания канавки вместо использования одного резца, поскольку это приводит к уменьшению величины деформации заготовки за счет более высокой жесткости системы заготовка устройство, а также частичной компенсации сил резания противоположно расположенных резцов.

Ключевые слова: *винтовая канавка, технологический процесс, винтовой элемент, резцовая головка*

O. Lyashuk, A. Diachun , A. Tretyakov
Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University

THE STUDY OF THE WORPIECE DEFORMATION IN THE PROCESS OF CUTTING EXTERNAL RADIUS GROOVES BY THE DEVICE WITH SEVERAL CUTTING TOOLS

The design of the device for determining the deformation of the workpiece during the cutting of outer radius grooves with four incisors simultaneously is given. The derived analytical dependences for determining the deformation of the workpiece in the direction of the y axis under static loads, and the differential equation of the elastic deformation line of the workpiece in the z axis direction is obtained. Graphical dependences of the deformation amount in the direction of the y axis of the workpiece from steel with a diameter d = 20 mm of length l = 140 mm during cutting outer groove. It is found that for high accuracy cutting external groove advisable to use a device for cutting a groove instead of using a cutter, as it leads to a decrease of the preform deformation due to the higher stiffness of the system preform device, as well as partial compensation for the cutting forces oppositely disposed incisor.

Keywords: *screw groove, technological process, screw element, incisive head*

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018.

© Ляшук О. Л. д. т. н, доц., Дячун А.Є. к. т. н. доц, О.Л. Третьяков

УДК 621.822.681.2369.64:
Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н. Луцький національний технічний університет
Джугурян Т.Г., д.т.н. Щецінська морська академія (Польща)

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ В ПІДШИПНИКОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Підшипники кочення, як елементи передач в механізмах різного призначення характеризуються рядом якісних показників, що визначають їх експлуатаційні властивості, одним з яких виступає точність та якість передачі обертального руху, а також точність посадок у з'єднаннях з іншими елементами механізмів. Вирішення проблеми забезпечення точності можливе лише в технологічному процесі виготовлення комплектуючих елементів підшипників. Забезпечення необхідної точності готового виробу базується на дотриманні ряду принципів і методів, які передбачають послідовне неперервне відслідковування розмірних та інших взаємопов'язаних геометричних параметрів поверхонь деталей, але визначальним етапом формування результату є викінчувальні шліфувальні операції. Важлива роль відводиться метрологічним та технологічним основам точності контролю розмірів та вибору критеріїв оцінки похибки розмірів деталей підшипників, тобто конкретизації рівня мети, що повинна бути досягнута в кінцевому результаті.

Ключові слова: *підшипник, поверхня, шліфування, точність, якість.*

Дослідження в галузі точності технологічних процесів і операцій являються базою та передумовою для створення систем управління якістю виробів, що особливо важливо для умов автоматизованого виробництва.

Вимогам сучасного виробництва не задовольняє управління, що обмежується першопочатковим налагоджуванням устаткування, підналагоджуваннями координат розміщення інструменту, або заміною неякісного інструменту.

Багато технологічних процесів вимагають використання вдосконалених засобів керування, в тому числі самоналагоджувальні системи керування, які забезпечують оптимальний хід технологічного процесу навіть при випадкових коливаннях характеристик оброблюваності матеріалу і інтенсивності зношуваності інструменту, а також при температурних, силових та інших збуреннях.

Для створення таких систем управління точністю та якістю виробів необхідне математичне описання технологічного процесу з врахуванням наслідків впливу на нього широкого спектру різнорідних зовнішніх та внутрішніх чинників.

Комплексна задача підвищення точності і ефективності оброблення вирішується як за рахунок використання традиційних методів підвищення точності, які ґрунтуються на покращенні технологічних характеристик верстатів і проектування технологічних процесів з заданою точністю (конструкторські методи керування точністю та керування координатами розміщення інструменту відносно заготовки), так і за рахунок безпосереднього керування режимами різання, пружною системою, збуреннями, що впливають на процес механооброблення. Переваги останнього напряму полягають не тільки в можливості зменшення впливу деяких чинників, що сприяють появі похибок формоутворення, але і повного їх вилучення шляхом використання зворотних зв'язків. Дослідження взаємозв'язків між чинниками, що супроводжують процес формоутворення, являється досить складним завданням багатофакторного аналізу, вирішення якого дозволило виділити домінуючі з них, які і покладені в основу функціонування систем автоматичного та адаптивного керування процесом механічної оброблення деталей.

Аналіз робіт з проблем технологічного забезпечення точності деталей в машинобудуванні показує, що в дослідженні точності можливо виділити три основних напрямки [2]: перший напрямок носить геометричний характер, базується на теорії розмірних ланцюгів, розроблений Б.С. Балакшиним [1]; другий пов'язаний з дослідженням в основному жорсткісних характеристик деталей, технологічного устаткування, спорядження і їх впливу на точність та жорсткість технологічних систем [5]; третій напрямок базується на поєднанні та врахуванні всього комплексу чинників, в тому числі геометричних і жорсткісних.

В геометричному розмірному аналізі на основі теорії розмірних ланцюгів розроблені правила та принципи, як наприклад принцип єдності баз Б.С. Балакшина [1], принцип

© Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.

найкоротшого шляху А.П. Соколовського, принцип суміщення та постійності баз А.Н. Кована, умова найменшої похибки В.П. Фіраго, котрі дозволяють раціонально вибирати способи базування деталей для забезпечення заданої точності. Розроблена схема формування похибок, що враховує реальні форми деталей, дозволила допуски на положення деталі в машині виразити як функції параметрів, які характеризують відхилення форм від ідеальних. В результаті такого підходу встановлено, що внаслідок криволінійності поверхонь деталі можуть взаємодіяти між собою через комплект опорних точок, котрі розглядаються як матеріалізація системи координат, що зв'язана з деталлю. При цьому до кожної деталі прив'язуються системи координат, що побудовані на основних і допоміжних базах, та система координат машини. Складові переносу і відносного повороту координатних систем дозволяють судити про відносне положення як поверхонь деталей, так і деталі в цілому. Цей підхід віддзеркалився в ГОСТ 21495-76 згідно з яким при базуванні деталей досягається співпадання координатних систем опорних точок, побудованих на елементах пристроїв і на основних базах деталей. Деталі розглядаються як абсолютно тверді тіла, форма яких не змінюється від зусиль закріплення та різання, що має підґрунтя при обробці жорстких деталей.

Уточнення схеми оцінки похибки досягається шляхом відмови від розгляду деталей і вузлів як абсолютно твердих тіл та моделювання власних контактних деформацій.

Виділення цього направлення в самостійне пояснюється тим, що власні і контактні переміщення в загальному балансі точності складають величини порядку 40-90% [3]. В цьому напрямку Д.І. Решетовим, З.М. Левіною, В.В. Камінською, В. А. Кудіновим та іншими авторами проведені обширні дослідження стосовно точності, вібростійкості та довговічності верстатів.

Оцінка статичної похибки обробленої деталі, як наслідок деформацій еквівалентної пружної системи може бути проведена за залежністю [1]:

$$\delta = \Delta_{ЗАГ} \frac{K_{ЭУС} \cdot K_p}{1 + K_{ЭУС} \cdot K_p}, \qquad (1)$$

де δ – похибка обробленої деталі;

$\Delta_{ЗАГ}$ – відома похибка заготовки;

$K_{ЭУС}$ – статична характеристика (податливість еквівалентної пружної системи верстата);

$K_P = K_{УД} \cdot b$ – коефіцієнт різання;

$K_{УД}$ – питома сила різання;

B – ширина зрізуваного шару.

В третьому із згадуваних раніше напрямків дослідження точності враховується сумарний вплив геометричних, жорсткісних та інших чинників, що супроводжують процес механооброблення. Найбільш повна комплексна точністна модель процесу оброблення розроблена Б.М. Базровим. Ця модель знайшла віддзеркалення в роботах інших дослідників.

В основу аналітичних досліджень точності у всіх роботах покладена лінійна модель виду:

$$\Delta = \Delta_y + \Delta_c + \Delta_д . \qquad (2)$$

Або її модифікації, де Δ – похибка оброблення; Δ_y, Δ_c, $\Delta_д$ – відповідно похибки встановлення, статичного та динамічного налаштування. Нелінійність, що виникає в процесі формування похибок, не враховуються.

Методика проектно-точністних розрахунків розроблена Н.А. Бородачевим, враховує максимальну кількість технологічних факторів і дозволяє отримати достатньо правдиві результати. Однак, використання даної методики ускладнюється через відсутність довідкового матеріалу у відповідності з прийнятою автором диференціацію виробничих процесів.

Базуючись на розрахунково-аналітичному методі, запропонованому А.П. Соколовським і в подальшому розвинутим в роботах [1, 2, 3, 4, 5] можливо попередньо визначити величину похибки, яку деталь буде мати після механічної оброблення. Метод полягає у визначенні окремих складових похибок, що залежать від певних чинників та їх суми. При розрахунку враховуються наступні фактори, що викликають відповідні похибки: геометрична неточність верстата (Δ_1), зношуваність ріжучого інструменту (Δ_2), теплові деформації технологічної системи (Δ_3), пружні деформації технологічної системи (Δ_4), неточність налаштування верстата

© Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.

(Δ_5), тобто визначаючі систематичні складові похибки.

Величина сумарної похибки визначається в загальному вигляді як $\Delta_{сум} = \Delta_c + \Delta_{сл}$, де Δ_c – алгебраїчна сума систематичних похибок; $\Delta_{СЛ} = \sqrt{(\Delta_{СЛ1})^2 + (\Delta_{СЛ2})^2 + (\Delta_{СЛ3})^2}$ – випадкові похибки, що визначаються нерівномірністю твердості матеріалу деталі ($\Delta_{сл1}$), неточністю вимірювань ($\Delta_{сл2}$), змінним припуском матеріалу деталі ($\Delta_{сл3}$).

При підсумовуванні похибок необхідно враховувати тип виробництва: одиничне, дрібносерійне, серійне і масове. В одиничному і дрібносерійному виробництвах приходиться враховувати лише систематичні похибки (Δ_c), тому що механічне оброблення в умовах такого виробництва має ряд особливостей і істотного значення набувають розмірно-силові фактори, що впливають на точнісні характеристики деталей. Характер виробництва в більшості сучасних галузей промисловості можна віднести до дрібносерійного, тому величина сумарної похибки може бути визначена як

$$\Delta_{сум} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6, \quad (3)$$

де Δ_6 – похибка від гіроскопічного ефекту.

При обробці на устаткуванні, у якого жорсткості передньої і задньої бабок близькі одна до одної, похибку від гіроскопічного ефекту можна не враховувати, тому що вона близька до нуля.

Похибка, яка визначається виразом (3), являє собою похибку форми деталі. Похибка геометричної форми представляє різницю відповідних розмірів однієї і тієї ж деталі, обумовленої кресленням, і входить у вигляді складової частини в сумарну похибку оброблення і складає її переважаючу частину 50-70% [2, 3].

Пружні деформації нежорсткої заготовки під дією сили різання входять у складову Δ_4 залежності (3). При цьому дія сил різання супроводжується зніманням припуску із заготовки, зменшується її маса, а відповідно, і момент інерції, змінюється конструктивна форма заготовки. З урахуванням діаметрального розміру вала через знімання припуску величина прогину вала в перехідному перетині від однієї шийки вала до іншої буде визначатися залежністю [7]:

$$y_\partial = \frac{P_x^5}{3EI_1L^2} + \frac{P}{EI_2}\left[\left(\frac{L^3 - x^3}{3}\right)\left(1 - \frac{x^2}{L}\right) - 2\left(\frac{L^2 - x^2}{2}\right)\left(x - \frac{x^2}{L}\right) + x(L - x)\right], \quad (4)$$

При $x = L/2$ $y_\partial = \left[PL^3/EI_1 + PL^3/EI_2\right]\cdot 1/96$, де x – координата поздовжнього перетину, у якій визначається прогин; I_1, I_2 – моменти інерції ступіней вала; P – поперечна сила.

Вплив фактору змінної маси на точність оброблення стає істотним, коли величина припуску, що знімається, складає не менше 20% від величини діаметра заготовки.

Методика визначення похибок для деталей типу вал, викладена в [9] з урахуванням виразу (3) дозволяє з достатньою точністю розрахувати переважаючу похибку і, надалі намітити шляхи її усунення.

Технологічний процес шліфування має ряд істотних відмінностей від процесів різання лезовим інструментом: хаотичне розташування і різновисотність величезної кількості дрібних зерен на робочій поверхні круга; переривчаста ріжуча кромка у шліфувального круга; неправильна геометрична форма абразивних зерен і наявність у них округлених вершин, що утворюють негативні передні кути різання від 40° до 150°; висока твердість, гострота, крихкість і термостійкість абразивних зерен; динамічний вплив кожного зерна на оброблюваний поверхневий шар; високий ступінь нагрівання оброблюваного матеріалу і стружки; висока швидкість і мала глибина різання; диспергування (роздрібнення) стружки супроводжується значними витратами енергії на подолання тертя (у 4-5 разів більше, ніж при фрезеруванні й у 12-15 разів більше, ніж при точінні).

Ці особливості позначаються на точності оброблення, шорсткості і фізико-механічних властивостях поверхневого шару металу, визначають методику аналізу і досліджень процесів шліфування.

У роботах [8, 9] шліфування розглядається як процес масового дуже тонкого надшвидкісного мікрорізання окремими зернами шліфувального круга. Стружка знімається окремим зерном за час 10^{-4}-10^{-5} с, тобто практично миттєво. Абразивні зерна мають різну форму і розміри, розташовані хаотично по периферії круга з різною глибиною залягання.

© Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.

Кожне зерно прорізає в металі канавку, що відповідає розмірам і формі його виступаючої частини. Це викликає появу повздовжніх нерівностей поверхні, що представляють сукупність безсистемно розташованих виступів і западин. Вирівнювання нерівностей відбувається, коли сукупність абразивних зерен наближається до суцільного ріжучого леза, що має місце при збільшенні швидкості кола $V_к$, зниженні швидкості деталі $V_д$ і повздовжньої подачі $S_{пр}$, зменшенні розмірів зерен.

Вирішальний вплив технологічних параметрів робочих поверхонь на експлуатаційні властивості відзначено в роботах [1, 2, 3, 4, 5]. Наприклад, наявність хвилястості призводить до зменшення опорної площі контактної поверхні у 5-10 разів у порівнянні з такою ж поверхнею, що має тільки мікронерівності (шорсткість).

Залежність процесу формування поверхні при шліфуванні від властивостей матеріалу оброблюваної деталі, гостроти ріжучих зерен, хімічного споріднення контактуючих пар, пластичної деформації і вібрацій докладно розглянута в роботі [2]. Варто відзначити, що на характер нерівностей обробленої поверхні може впливати перевага одного з цих факторів. Але умови формування поверхні, внаслідок затуплення і зміни форми зерен шліфувального круга, безупинно змінюються в часі.

Значний вплив на формоутворення поверхонь деталей при шліфуванні здійснюють вібрації, що є наслідком періодично виникаючих дефектів вузлів верстата й інструмента, тертя поверхні інструмента оброблювану поверхню й інші причини. При чистовому шліфуванні на утворення хвилястості, наприклад, найбільш активно впливають коливання оброблюваної деталі, шліфувальної бабки, шліфувального круга, співвідношення швидкостей деталі і круга, їхні розміри, число проходів і зрушення фаз хвиль при наступних проходах.

Амплітуда і частота вібрацій залежать від вібростійкості верстата, деталі та інструмента. У ряді випадків коливання можуть мати змінну амплітуду, величина якої в даний момент часу випадкова. Це вкрай ускладнює встановлення причин появи вібрацій, характеру і закономірності їхнього впливу на формування поверхні деталі при її шліфуванні.

Сформовані представлення про механізм різання абразивними зернами, характеру руйнування металу й інших фізичних явищ при шліфуванні багато в чому суперечливі. Мало відомостей про особливості формування точності форми при шліфуванні нежорстких заготовок. Аналітичні залежності, приведені в [3, 4], у більшості випадків носять частковий характер, тому що отримані для конкретних умов і видів шліфування. Дані про взаємозв’язок і вплив окремих технічних і технологічних параметрів і умов на формування якості й експлуатаційних властивостей деталей під час шліфування не враховують характерних рис оброблення поверхонь обертання кілець підшипників з позицій керування хвилястістю поверхонь.

Типовий технологічний маршрут шліфування кілець підшипників подано на рис. 1. Практично на всіх операціях застосовуються системи активного контролю розмірів. Такі системи дозволяють в процесі оброблення компенсувати як функціональні, так і власне випадкові похибки [8]. Таким чином, ці системи мають найбільші компенсаційні властивості і, відповідно, відповідають найбільш простим математичним моделям [9]. Високочастотна складова технологічних похибок відноситься до найбільш складних для компенсації, так як виникає в результаті коливань величин припусків на оброблення. Для її зменшення необхідно підвищувати точність попередніх операцій [3]. Тому системи активного контролю використовуються на всіх шліфувальних операціях.

В загальному, до активного контролю відноситься будь-який метод контролю, за результатами якого вручну або автоматично здійснюється вплив на технологічний процес [5]. Активний контроль можна розглядати як систему "регулювання розмірів". Це дозволяє стабілізувати величину припуску на викінчувальних операціях шліфування, тобто зменшити високочастотну складову технологічних похибок.

Як раніше встановлено, основним критерієм оцінки похибок оброблення є величина поля сумарного розсіювання розмірів партії деталей, оброблених на металорізальному верстаті. Головними чинниками, що зумовлюють розсіювання розмірів деталей, є розмірне зношування різального інструменту, теплові та силові деформації технологічної системи [7].

Геометрична або статична точність верстату в основному визначає похибки форми оброблюваних деталей і на розсіювання розмірів суттєвого впливу не виявляє. Основний сенс використання методу активного контролю розмірів заключається саме в усуненні впливу на

© Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.

точність оброблення зношування різального інструменту, теплових і силових деформацій технологічних систем.

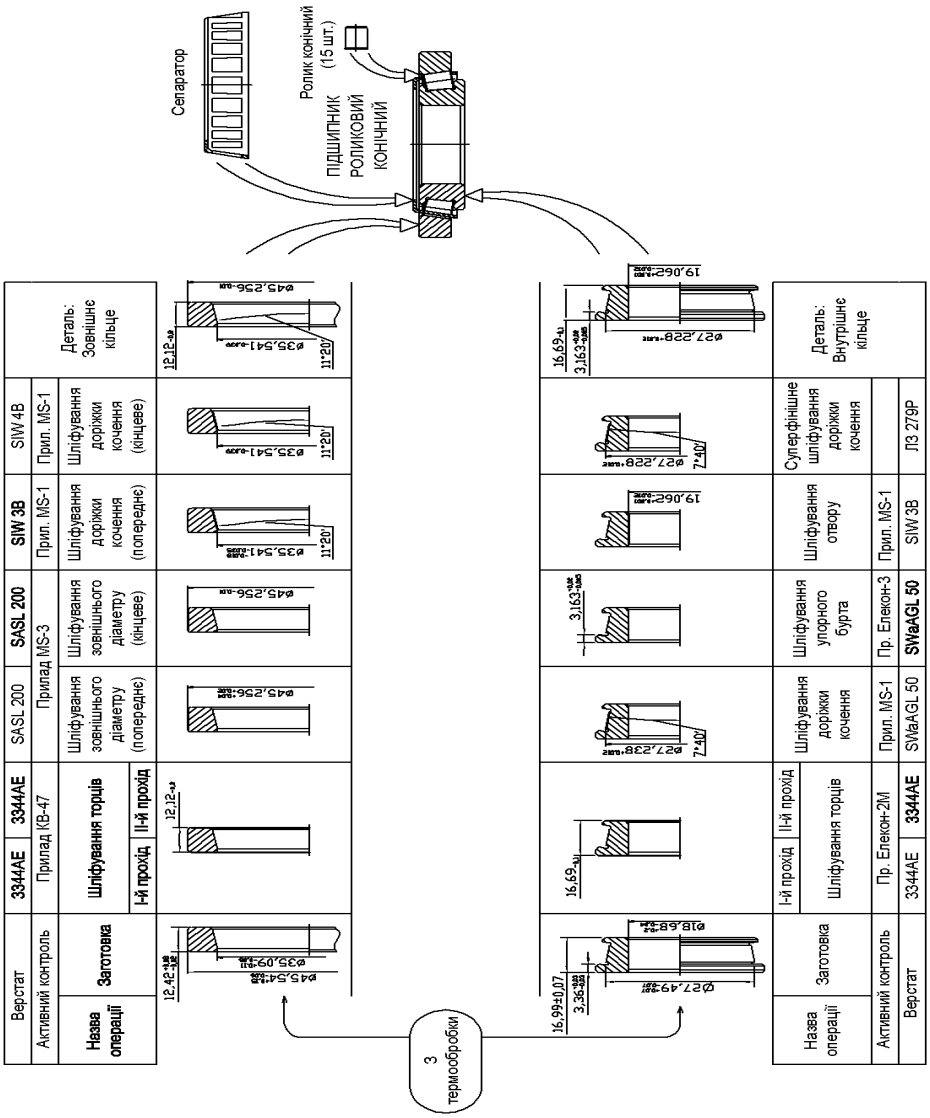


Рис. 1. Технологічний маршрут шліфування кілець

Похибки вимірювальних приладів входять до складу сумарної похибки активного контролю [7]. Але частка статичної похибки приладів у загальному об’ємі сумарної похибки оброблення досить незначна. У деяких випадках частка похибки приладів складає всього 2 – 4% від величини сумарної похибки управляючого контролю. Інша частина похибки визначається в основному впливом технологічних чинників.

Похибки, викликані технологічними чинниками носять характер випадкових функціональних похибок. Функціональних – тому, що змінюються у функції часу, випадкових – так як в різних дослідах або за різних реалізацій випадкових розмірних функцій виникає ціле сімейство характеристичних кривих. Випадковий характер цих похибок зумовлюється тим, що вони залежать від великої кількості різних факторів, що діють спонтанно, але створюють визначальний вплив.

Розмірне зношування різального інструменту під час шліфування залежить не тільки від методу шліфування, але й від глибини різання, поздовжньої подачі, колової швидкості деталі, її діаметру, твердості та якості матеріалу заготовки, якості шліфувального круга, його діаметру й величини затуплення, методу й режиму правки круга, геометрії правлячого інструменту, швидкості різання, вібрацій тощо.

© Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.

Силові деформації технологічної системи залежать від жорсткості вузлів верстату, кількості та жорсткості стиків, глибини різання, величини поздовжньої подачі, окружної швидкості деталі, її діаметру, твердості та якості матеріалу заготовки, якості й діаметра шліфувального круга, швидкості різання, температури нагрівання вузлів верстату, в'язкості та кількості мастила, сил тертя в механізмах верстату тощо.

Теплові деформації під час шліфування залежать від конструкції окремих вузлів верстату, кількості охолоджуючої рідини та її теплових і фрикційних властивостей, протяжності теплових розмірних ланок, від характеристик шліфувального круга, величини подач, швидкості й глибини різання, матеріалу й розмірів заготовок, температури навколишнього середовища, сил тертя, кількості й якості змащування, інтенсивності використання обладнання, маси елементів, які можуть деформуватись, вібрації.

Отже, похибки розмірів є результатом сумісного впливу зношування й затуплення різального інструменту, теплових та силових деформацій. Очевидно, що й сумарна дія цих чинників також має випадковий характер.

На рис. 2 показані умовні криві зміни у часі розмірного зношування різального інструменту (1), теплових (3) та силових (2) деформацій технологічної системи, а також графік зміни теплових деформацій оброблюваних деталей (4). Штриховою лінією показано приблизну криву сумарної зміни у часі розмірів деталей під впливом сумісної дії всі вказаних чинників.

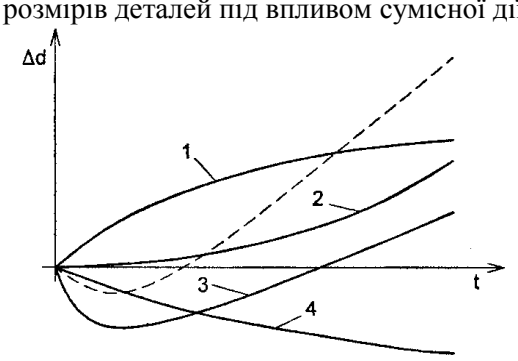


Рис. 2. Сумарний вплив на точність розмірів зношення: шліфувального круга (1), силових (2) і теплових (3) деформацій технологічної системи

Серед похибок оброблення є такі, інтенсивності зміни яких взаємно компенсуються. Якщо відразу після правки круга, або у загальному випадку – заточування або заміни різального інструменту, значний вплив на зміну розмірів виявляє зношування різального інструменту, то вплив силових деформацій у цей період виявляється найменшим. І, навпаки, зростання впливу силових деформацій, що виникає внаслідок затуплення інструменту, супроводжується одночасним зменшенням впливу його зношування [4].

Крім цього, загальна тенденція до збільшення розмірів деталей компенсується для зовнішнього шліфування їх тепловими деформаціями. Наприклад, взаємна компенсація впливу силових деформацій технологічної системи і теплових деформацій оброблюваних деталей; обидві похибки мають протилежні знаки та збільшуються по мірі затуплення різального інструменту. Слід підкреслити, що для внутрішнього оброблення отворів дія зношування інструменту, теплових деформацій оброблюваних деталей та силових деформацій технологічної системи направлена в одну сторону і викликає зменшення розмірів оброблюваних деталей.

На початковій стадії оброблення суттєвіший вплив на розміри деталей виявляють інтенсивно зростаючі теплові деформації шліфувальної бабки, що призводить до зменшення розмірів деталей. По мірі стабілізації теплових деформацій шліфувальної бабки розміри деталей починають поступово збільшуватись, причому збільшення має приблизно рівномірний характер. Тому, можна умовно вважати, що після стабілізації теплових деформацій шліфувальної бабки й різальної поверхні круга зміна функціональних опосередкованих похибок підпорядковується закону рівної ймовірності, хоча, зрозуміло, можуть зустрічатись і значні відхилення від вказаного закону. Для різних реалізацій випадкових розмірних функцій графіки зміни розмірів деталей можуть суттєво відрізнятись одна від одної.

© Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.

Таким чином, сумарний вплив на точність оброблення зношення різального інструменту, теплових та силових деформацій технологічної системи має досить складний характер і може викликати як збільшення, так і зменшення припусків оброблюваних заготовок.

Висновок. В роботі проведено дослідження взаємозв'язків параметрів якості та точності шліфованих поверхонь з режимами шліфування та конструктивно-технологічними чинниками шліфувальних операцій і на цій основі розробити стратегію та модель формування ефективної технології оброблення поверхонь кілець в умовах автоматизованого переналагоджувального підшипникового виробництва. Авторами досліджено механізм походження температурних та геометричних дефектів під час шліфування функціональних поверхонь кілець класифікаційної групи суцільними та переривчастими шліфувальними кругами і на цій основі розробити методику моделювання похибок керуючого контролю та температурних деформацій під час шліфування. Розроблено математичну модель оперативного визначення та прогнозування температури шліфування суцільними та переривчастими шліфувальними кругами.

Інформаційні джерела

1. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 556 с.
2. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.Н. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
3. Тараненко В.А. Моделирование технологических систем формообразования нежестких деталей / В.А. Тараненко. – М.: ВНИТЭМР, 1988. – Выпуск 2. – 70 с.
4. Тараненко В.А. Технологические способы и средства повышения точности обработки нежестких деталей / В.А. Тараненко, В.Г. Митрофанов, М.Г. Косов. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – Выпуск 2. – 64 с.
5. Марчук В.И. Управление параметрами качества рабочих поверхностей колец конических роликоподшипников / В.И. Марчук, В.Т. Михалевич // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: труды 5-й международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК ФЭД, 2002. – С. 127–130.
6. Марчук І.В. Технологічне керування точністю поверхонь обертання на операціях механічного оброблення / І.В. Марчук, М.В. Олексин, А.М. Ештеіві / «Сучасні технології у промисловому виробництві»: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 18–21 квітня 2017 р.): у двох частинах / редкол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. – Суми: Сумський державний університет, 2017. – Ч. 1. – 31–32 с.
7. Дегтяренко Н.С. Методика исследования температуры при шлифовании твердого сплава / Н.С. Дегтяренко, И.А. Коменкович // Вопросы заточки инструментов (труды ВНИИ инструмент). М., 1966. – выпуск 2.
8. Якимов А.В. Прерывистое шлифование / А.В. Якимов, Ю.А. Бояршинов и др. // Вестник машиностроения. – 1967. – №3. – С. 76-78.
9. Ящерицин П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей / П.И. Ящерицин. – Минск : наука и техника, 1971. – 212 с.

Марчук В.И., д.т.н., Марчук И.В., к.т.н.
Луцкий национальный технический университет
Джугурян Т.Г., д.т.н. Щецинская морская академия (Польша)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ В ПОДШИПНИКОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕ

Подшипники качения, как элементы передач в механизмах различного назначения характеризуются рядом качественных показателей, определяющих их эксплуатационные свойства, одним из которых выступает точность и качество передачи вращательного движения, а также точность посадок в соединениях с другими элементами механизмов. Решение проблемы обеспечения точности возможно только в технологическом процессе изготовления комплектующих элементов подшипников. Обеспечения требуемой точности готового изделия базируется на соблюдении ряда принципов и методов, которые предусматривают последовательное непрерывное отслеживание размерных и других

© Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.

взаимосвязанных геометрических параметров поверхностей деталей, но определяющим этапом формирования результата является финишные шлифовальные операции. Важная роль отводится метрологическим и технологическим основам точности контроля размеров и выбора критериев оценки погрешности размеров деталей подшипников, то есть конкретизации уровня цели, которая должна быть достигнута в конечном итоге.

Ключевые слова: *подшипник, поверхность, шлифовка, точность, качество.*

V. Marchuk , D.Sc., I. Marchuk, Ph.D.
Lutsk National Technical University
T. Dzhuguryan, Stok maritime academy (Poland)

TECHNOLOGICAL PROVISION OF ACCURACY AND QUALITY OF THE SURFACE OF FURNITURE IN FUSION PRODUCTION

Bearings of rolling as elements of gears in mechanisms of different purposes are characterized by a number of qualitative indicators that determine their performance properties, one of which is the accuracy and quality of the transfer of rotational motion, as well as the accuracy of plantings in the connections with other elements of mechanisms. The solution to the problem of accuracy is possible only in the technological process of manufacturing components for bearings. Ensuring the required precision of the finished product is based on the observance of a number of principles and methods that provide consistent continuous monitoring of dimensional and other interconnected geometric parameters of the surfaces of parts, but the final stage of the formation of the result is the finishing grinding operations. An important role is given to the metrological and technological basis of the accuracy of the size control and the choice of criteria for estimating the error of the dimensions of the bearings, that is, the specification of the target level, which should be achieved in the final result.

Key words: *bearing, surface, grinding, precision, quality.*

Стаття надійшла до редакції 25.03.2018.

© Марчук В.І., д.т.н., Марчук І.В., к.т.н., Джугурян Т.Г., д.т.н.

УДК 621. 315. 592

Г.В. Махновець, м.н.с., Г.Л. Мирончук, к.ф.м.н., Л.В. Піскач, к.х.н., С.А. Федосов, д.ф.м.н.
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,05; 0,1)

В даній роботі розроблено технологічні умови росту кристалів, досліджено вплив температури в інтервалі T=100-300 K на структурні перетворення, що відбуваються в кристалах $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,05; 0,1), температурну залежність темнової питомої електропровідності та спектральний розподіл фотопровідності отриманих кристалів при T=260 K.

Ключові слова: *темнова питома електропровідність, фотопровідність, енергія активації.*

Постановка проблеми. На даний час велика увага матеріалознавців напрямлена на дослідження потрійних сполук на основі $TlGaSe_2$, які належать до групи шаруватих халькогенідних кристалів. Велика цікавість до кристалів такого роду пояснюється в першу чергу широкими можливостями їх практичного застосування в оптоелектроніці внаслідок особливих електричних та фотоелектричних властивостей. Крім цього, дана цікавість обумовлена наявністю прямих і непрямих переходів в забороненій зоні, існуванням сегнетоелектричних ефектів, а також сильною анізотропією властивостей в цих кристалах [1-8].

Також однією з переваг шаруватих напівпровідників є можливість інтеркаляції їх різними іонами, атомами, молекулами, що призводить до зміни міжшарової взаємодії, анізотропних характерестик цих напівпровідників і дозволяє керувати їх фізичними властивостями [9]. До таких матеріалів відносяться, зокрема шаруваті напівпровідники типу $A^{III}B^{III}C_{II}^{VI}$, в тому числі $TlGaSe_2$, в яких в різних площинах формуються різні типи зв'язків – ковалентний і молекулярний (Ван-дер-Ваальса) [10].

Дані напівпровідники є актуальними для створення на їх основі різних сенсорів, оптоелектронних пристроїв, високоефективних і стабільних сонячних елементів, нових типів приймачів ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювань [11, 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження таких матеріалів ведуться досить широко і присвячені питанням розробки технології синтезу і вирощування високоякісних монокристалів зазначеного класу, їх різних фізико-хімічних властивостей та технічних характеристик, причому в значній частині публікацій вивчається природа структурних фазових переходів, які реалізуються в цих кристалах при зниженні температури [13]. Активно досліджується вплив дефектно-домішкової підсистеми кристалів на специфіку їх фізичних властивостей і особливості фазових переходів [14, 15].

Виділення невирішеної проблеми. Разом з тим відомостей про вплив легуючих домішок на властивості таких матеріалів недостатньо, і вони часто досить суперечливі. У зв'язку з цим **метою даної роботи** стало установлення впливу легування різного відсоткового вмісту домішки (Sn) кристалів $TlGaSe_2$, на їх електричні та фотоелектричні властивості [16], що дозволяє розширити практичне використання даних матеріалів.

Результати дослідження. Монокристали $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,05; 0,1) були отримані методом Бріджмена-Стокбаргера. Треба відмітити, що всі зазначені склади мали шарувату структуру, що дозволяло отримувати якісні та однорідні зразки. Світло було напрямлене на зразки паралельно кристалографічній осі c, тобто перпендикулярно шарам (рис.1).

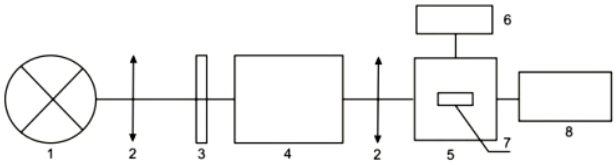


Рис. 1. Блок-схема установки для вимірювання фотоелектричних властивостей: 1 – джерело світла; 2 – конденсори; 3 – світлофільтр; 4 – монохроматор МДР-206; 5 – азотний кріостат ; 6 – терморегулятор Utrecs K 41–3; 7 – зразок; 8 – електрометр Keithley 6514 (табл. 1)

© Г.В. Махновець, м.н.с., Г.Л. Мирончук, к.ф.м.н., Л.В. Піскач, к.х.н., С.А. Федосов, д.ф.м.н.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням азотного кріостата з можливістю стабілізації температури в інтервалі 77÷300 К (точність стабілізації становила ±0.2 К). Як монохроматор використовували МДР-206. Для вивчення фотоелектричних властивостей халькогенідних монокристалів (із отриманих злитків) вирізали монокристалічні блоки у формі паралелепіпеда. Для матеріалів електричних контактів використовували галій – індієву евтектику, нанесену на торець і поверхню зразка методом утирання [17].

Таблиця 1

Технічні характеристики Keithley 6514

Рівень шумів	<1 фА
Швидкість зчитування	500 вим/с
Режим вимірювання струму	
Діапазон	Точність (1 год) 23°С ±5°С, ±% від шк.
20 пА – 200 пА	1%
2 нА – 200 нА	0,2%
2 мкА – 20 мА	0,1%
Режим вимірювання опору	
2 кОм	0,2%
20 кОм	0,15%
200 кОм – 20 МОм	0,25%
200 МОм	0,3%
2 ГОм-200 ГОм	1,5%

Досліджувані монокристали є високоомними напівпровідниками зі значенням питомої електропровідності $\sigma \sim 10^{-9}$-10^{-10} Ом$^{-1}$см$^{-1}$ (рис.2). Згідно знаку коефіцієнта термо.-е.р.с. вони є матеріалами *p*-типу провідності, і при збільшені *x* тип провідності залишається сталим [18].

Визначена E_A в діапазоні температур $260 \div 300$ К становить 0,37 еВ і 0,41 еВ для 95 mol% $TlGaSe_2$-5 mol% $SnSe_2$ й 90 mol% $TlGaSe_2$-10 mol% $SnSe_2$ – відповідно (табл. 2). На нашу думку, зміна енергії активації пов'язана зі зміною ширини забороненої зони, що добре узгоджується з оптичними дослідженнями [19].

$$\square = \sigma_0 exp(-\frac{E_A}{kT}), \quad (4)$$

де E_A - термічна енергія активації

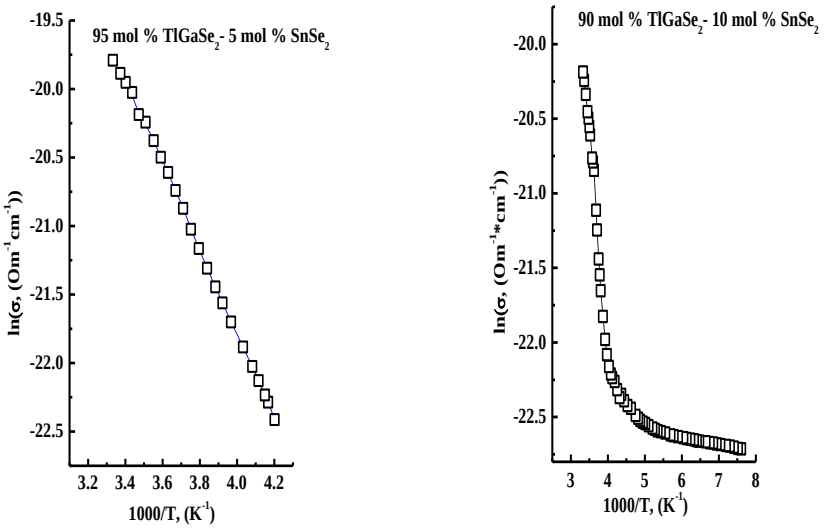


Рис. 2. Температурна залежність питомої темнової електропровідності монокристалів

На рис. 3 представлені криві спектрального розподілу фотопровідності (ФП) кристалів $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0.05; 0.1). Як слідує із рисунків, характерною особливістю кривих $\Delta\sigma(\lambda)$ є наявність двох максимумів фотопровідності. При цьому максимум I лежить в області смуги власного поглинання. Тому можна припустити, що пік I обумовлений власною фотопровідністю досліджуваних сполук. Пік II відповідає енергетичному положенню домішкового рівня (табл.2).

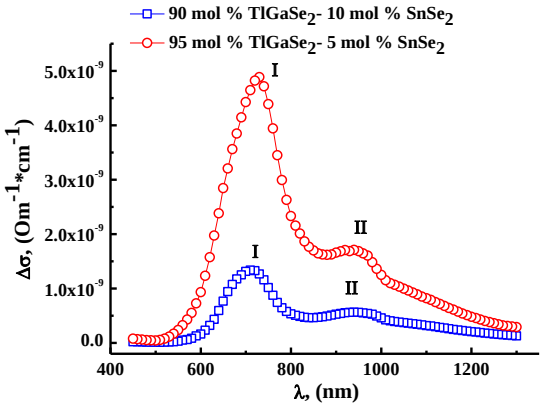


Рис. 3. Спектральний розподіл фотопровідності для досліджуваних кристалів при T=260 K

Таблиця 2

Максимуми фотопровідності кристалів і термічна енергія активації провідності

Сполуки	I_{max}, еВ (при 260 К)	II_{max}, еВ (при 260 К)	E_A, еВ
95% $TlGaSe_2$- 5% $SnSe_2$	1,7	1,32	0,37
90% $TlGaSe_2$- 10% $SnSe_2$	1,75	1,32	0,41

Важливим для практичного використання напівпровідникових пристроїв є вивчення їх фотоелектричних характеристик. Тому доцільним було дослідження спектрального розподілу фотопровідності при різних температурах.

Як видно з рис. 4 для кристалів $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0.05; 0.1), зі збільшенням x спостерігається зменшення максимуму власної фотопровідності (пік I), що можна пояснити зростанням концентрації s–центрів рекомбінації. Водночас великий домішковий фотострум засвідчує, що при статистичному заміщенні Ga на Sn утворюються центри повільної рекомбінації (r-центри). Такими центрами можуть бути катіонні вакансії, а саме V_{Tl} концентрація яких, згідно з рентгеноструктурними дослідженнями, збільшується зі зростанням x (табл.3).

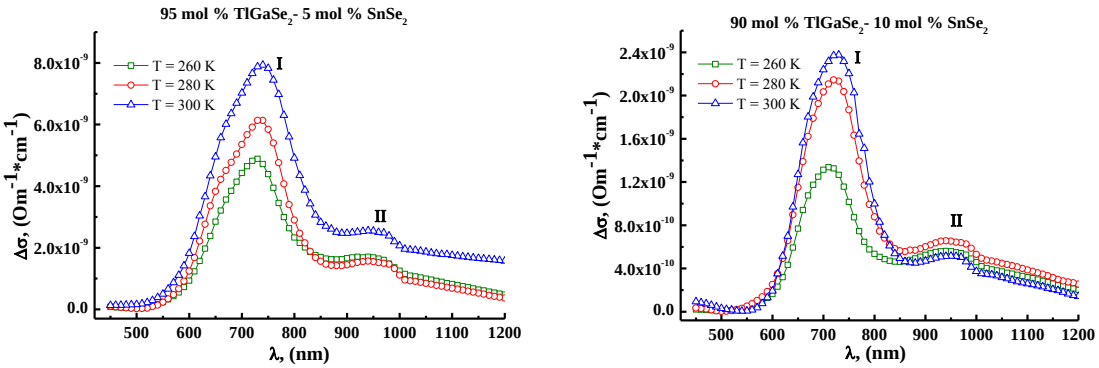


Рис. 4. Спектральний розподіл фотопровідності при різних температурах

Зростання концентрації *s*-центрів рекомбінації слабо впливає на домішкову фотопровідність, оскільки при домішковому збудженні вільні електрони не утворюються і *s*-центри практично не беруть участі в рекомбінації.

Таблиця 3

Максимуми фотопровідності при різних температурах

Зразок	T, K	λ_{max}, нм	E_{max}, еВ	λ_{min}, нм	E_{min}, еВ
95% $TlGaSe_2$-5% $SnSe_2$	240	720	1,72	930	1,33
	260	730	1,7	940	1,32
	280	730	1,7	940	1,32
	295	740	1,68	940	1,32
90% $TlGaSe_2$-10% $SnSe_2$	260	710	1,75	940	1,32
	280	720	1,72	940	1,32
	300	730	1,7	950	1,31

При (x=0,05; 0,1) енергетичне положення домішкового рівня відносно стелі валентної зони за T =260 К становить 0,38 еВ та 0,43 еВ для кристалів $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0.05; 0.1), що узгоджується з енергією активації темнової провідності. Спостерігається незначне зменшення енергетичної щілини між домішковим рівнем та стелею валентної зони із зростанням температури. Тому можна припустити, що високотемпературна електропровідність і домішкова фотопровідність зв'язані з одними й тими ж центрами, а саме акцепторами зони локалізованих станів [20].

Висновки. Визначена енергія активації в близькому до кімнатної діапазоні температур становить 0,37 еВ і 0,41 еВ для 95 mol% $TlGaSe_2$-5 mol% $SnSe_2$ й 90 mol% $TlGaSe_2$-10 mol% $SnSe_2$ – відповідно (табл. 2). Дана зміна енергії активації пов'язана зі зміною структури, а отже і зміною ширини забороненої зони. Характерною особливістю спектрального розподілу фотопровідності є наявність двох максимумів зумовлених власною і домішковою фотопровідністю.

Отже, нові сполуки є більш фоточутливими в порівнянні з $TlGaSe_2$, що робить можливим їх використання для фоторезисторів, фотодіодів та інших приладів оптоелектроніки.

Інформаційні джерела

1. Panich A. M., Kashida S. Single-crystal NMR for the layered semiconductor $TlGaSe_2$ // J. of Physics: Condensed Matter, 2008. Vol. 20. P. 3−31.
2. Senturk E. [et al.]. Incommensurate phase properties of $TlGaSe_2$ layered crystals // Crystal Research and Technology, 2005. Vol. 40, iss. 3. P. 248–252.
3. Mikailov F. A. [et al.]. Dielectric susceptibility behaviour in the incommensurate phase of $TlInS_2$ // Physica B, 2003. Vol. 334. P. 13−20.
4. Mikailov F. A. [et al.]. Phase Transactions and Metastable States in $TlGaSe_2$ // Phase Transactions, 2003. Vol. 76. P. 1057−1064.
5. Abdullayev N. A., Mammadov T. G., Suleymanov R. A. Negative thermal expansion in the layered semiconductor $TlGaSe_2$ // Physica Status Solidi (B), 2005. Vol. 242. P. 983–989.
6. Сеидов Х. Ю., Сулейманов Р. А. Аномалии электрофизических, тепловых и упругих свойств слоистых полупроводников-сегнетоэлектриков $TlGaSe_2$: нестабильность электронной подсистемы // Физика твердого тела, 2008. Т. 50. С. 1169−1176.
7. Dawood S. A. [et al.]. Structure and electrical properties of doped $TiGaSe_2$ and $TiInS_2$ single crystals // Azerbaijan J. of Physics. Fizika, 2011. Vol. 17. P. 27−30.
8. Dawood S. A. [et al.]. Admittance and permittivity in doped layered $TlGaSe_2$ single crystals // Acta Physica Polonica (A), 2014. Vol. 125, № 6. P. 1267−1271.
9. Мамедов Т. Г., Сулейманов Р. А. Влияние деформации решетки и фазовых переходов на электронные спектры слоистых полупроводников $TlGaS_2$, $TlGaSe_2$ и $TlInS_2$ // Физика твердого тела, 2003. 45 (12). С. 2141–2146.
10. Боровой Н. А., Гололобов Ю. П., Исаенко Г. Л., Степанищев Н. Б. Влияние политипии на структурные фазовые превращения в кристаллах $TlGaSe_2$ // Физика твердого тела, 2009. 51 (11). С. 2229.

© Г.В. Махновець, м.н.с., Г.Л. Мирончук, к.ф.м.н., Л.В. Піскач, к.х.н., С.А. Федосов, д.ф.м.н.

11. Мамедов Г. А., Годжаев Э. М., Магеррамов А. М., Зейналов Ш. А. Исследование рельефа поверхности атомно-силовым методом и диэлектрических свойств композиций полиэтилена высокой плотности и добавок $TlGaSe_2$. // Электронная обработка материалов, 2011. 47(6). С. 94–98.

12. Годжаев Э. М., Магеррамов А. М., Зейналов Ш. А., Османова С. С., Аллахяров Э. А. Короноэлектреты на основе композитов полиэтилен высокой плотности с полупроводниковым наполнителем $TlGaSe_2$. // Электронная обработка материалов, 2010. 46(6). С. 91–96.

13. Godzhaev E. M., Allakhyarov E. A., Khalilova Kh. S., Suleimanova A. M. Transport Properties of $TlInSe_2$ {Ln } (Ln = Eu, Sm, Yb) // Inorg. Mater, 2003. 39 (7). P. 676–679.

14. Кітик І. В., Мирончук Г. Л., Замуруєва О. В., Парасюк О. В., Свідзинський А. В. Фотоелектричні дослідження твердого розчину $TlInSe_2$-$Si(Ge)Se_2$ (x=0,1; 0,2) // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Сер. Фіз. науки., 2015. 10 (311). С. 17–21.

15. Сардарлы Р. М., Самедов О. А., Садыхов И. Ш., Алиев В. А. Релаксорные свойства $TlInS_2$, легированного Fe // Физика твердого тела, 2003. 45 (6). С. 1067–1069.

16. Кітик І. В., Мирончук Г. Л., Замуруєва О. В., Парасюк О. В., Шаварова Г. П. Температурна залежність питомої електропровідності монокристалів $Tl_{1-x}In_{1-x}Ge_xSe_2$ (x = 0,1; 0,2) вдовж та перпендикулярно до шарів // Наук. вісн. Східноєвроп. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Сер. Фіз. Науки, 2015. 10 (311). С.13–17.

17. Мустафаева С. Н., Алиев В. А., Асадов М. М. Прыжковая проводимость на постоянном токе в монокристаллах $TlGaS_2$ и $TlInS_2$ // Физика твердого тела, 1998. 40 (4). С. 612–615.

18. Abdinbekov S. S., Guseinov G. D. Physico-Chemical Investigation of $TlInSe_2$–$TlGaTe_2$ // Bulletin de la Societe Chemique de France, 1986. (3). P. 355–357.

19. Махновець Г. В., Мирончук Г. Л., Парасюк О. В. Оптичні властивості кристалів системи $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,05; 0,1) // Науковий вісник Чернівецького університету: Зб. наук. праць. – Вип. 781.: Хімія. – Чернівці: Чернівецький національний університет, 2016. №781. С. 75-80.

20. Шелег А. У., Иодковская К. В., Курилович Н. Ф. Влияние gamma-облучения на диэлектрическую проницаемость и элекропроводность кристаллов $TlGaS_2$ // Физика твердого тела, 2003. 45 (1). С. 68–70.

А.В. Махновец, м.н.с., Г.Л. Мырончук, к.ф.м.н., Л.В. Пискач, к.х.н., С.А. Федосов, д.ф.м.н.
Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,05; 0,1)

В данной работе разработаны технологические условия роста кристаллов, исследовано влияние температуры в (T=100-300 K) на структурные преобразования, происходящие в кристаллах $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,05; 0,1), температурную зависимость темновой удельной электропроводности и спектральное распределение фотопроводимости полученных кристаллов при T=260 K.

Ключевые слова: *темновая удельная электропроводность, фотопроводимость, энергия активации.*

G. Makhnovets, G. Myronchuk Ph.D, L. Piskach Ph.D, S. Fedosov D.Sc.
Lesya Ukrainka Eastern European National University

ELECTRICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF CRYSTALS $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,05; 0,1)

In this work was the technological conditions of crystal growth, the influence of a temperature (T=100-300 K) on the structural changes that occur in the crystals $Tl_{1-x}Ga_{1-x}Sn_xSe_2$ (x=0,05; 0,1), the temperature dependence of the dark conductivity and spectral distribution photoconductivity obtained of crystals at T=260 K.

Keywords: *dark specific electrical conductivity, photoconductivity, activation energy.*

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018.

© Г.В. Махновець, м.н.с., Г.Л. Мирончук, к.ф.м.н., Л.В. Піскач, к.х.н., С.А. Федосов, д.ф.м.н.

УДК 621.914.22
Равська Н.С., д.т.н., проф.
Парненко В. С., асистент.
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНОГО ДОПУСТИМОГО ДІАМЕТРА ДИСКОВОЇ ОБКАТНОЇ ФРЕЗИ ПРИ ОБРОБЦІ ВІДРІЗНИХ ПИЛ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ

Анотація. Розглянуто задачу визначення мінімально допустимого зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези при обробці відрізних пил з нерівномірним кроком. Вирішення цієї задачі розглянуто з умови дотику вихідної інструментальної поверхні з обробленою деталлю без проникнення в тіло деталі. Розглянуто випадок коли вісь обкатної фрези встановлена перпендикулярно до осі виробу, що обробляється, та при обкатному русі спостерігається обертання фрези і виробу навколо своїх осей.

За вихідний переріз виробу прийнято переріз перпендикулярний до осі виробу, в якому вершинна точка ріжучої кромки К обкатної фрези знаходиться в точці В западині профілю багатозубого виробу. Дотик різальної кромки зуба обкатної фрези, що обробляє передню поверхню виробу, с зовнішнім колом виробу, позначено точкою G, положення якої визначається кутами η_1 і η_2.

На основі виконання другої умови формоутворення визначено мінімально допустимий радіус зуба дискової обкатної фрези, та показано, що він залежить від діаметра та числа зубів виробу, від максимальних кутового кроку та висоти зуба в групі, від головного кута в плані та переднього кута багатозубого виробу, а також від числа зубів у групі багатозубого виробу, яке дорівнює числу зубів дискової обкатної фрези.

Ключові слова: формоутворення поверхонь різанням, зовнішній діаметр, обкатні дискові фрези, дискові відрізні пили, нерівномірний крок.

Для утворення заданої поверхні профіля відрізної пили згідно теорії формоутворення поверхонь деталі при обробки різанням для виконання другої умови необхідно визначити мінімально допустимий зовнішній діаметр дискової обкатної фрези, при якому не буде проникнення різальних кромок в тіло заготовки в процесі обробки [1,2].

При обкатному русі, фреза і заготовка обертаються навколо своїх осей і ці рухи пов’язані між собою залежністю.

Крім обертальних рухів при обробці здійснюється повільний рух подачі. При обробці прямозубих виробів рух подачі буде прямолінійно-поступальним. Рух подачі призводить до ковзання поверхні виробу "самої по собі" і не впливає на характер контактування вихідної інструментальної поверхні і поверхні виробу. Тому при визначенні мінімального діаметра розглянуто тільки два обертальних рухи.

Визначення діаметра дискової обкатної фрези при обробці відрізних пил з нерівномірним кроком зубів розглянуто для випадка коли вісь обкатної фрези встановлена перпендикулярно до осі виробу, що обробляється [3,4].

При визначенні діаметра розглянуто випадок, коли вершинна точка зуба обкатної фрези знаходиться в точці *К* западині профіля зуба виробу. При цьому положення профілю багатозубого виробу характеризується кутом повороту $\psi + \gamma$ (де γ - передній кут відрізної пили), що забезпечує оброблення профілю в відповідності до креслення.

Вважаємо, точка *К* різальної кромки дискової обкатної фрези розташовується в перерізі I - I (рис.1), положення якого вибрано таким чином, щоб отримати певну величину кута ψ. В перерізі I - I при обертанні фрези навколо її осі буде переміщатися вершинна різальна кромка зуба, оскільки осі фрези і виробу взаємо-перпендикулярні і при обробці дисковими обкатними фрезами спостерігається обертання фрези і виробу навколо своїх осей.

© Равська Н.С., д.т.н., проф., Парненко В. С., асистент.

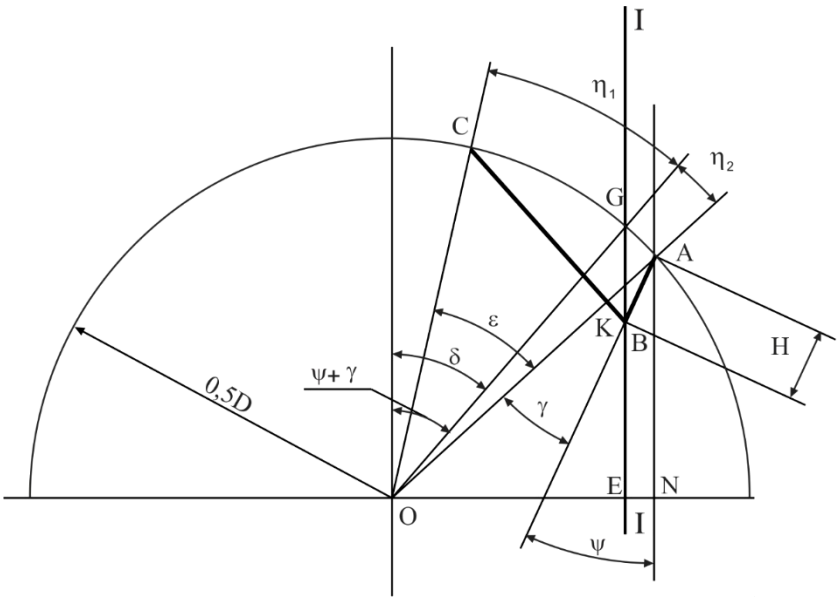


Рисунок 1. Схема визначення кутів η_1 і η_2, коли вершинна точка зуба обкатної фрези *К* знаходиться в точці *В* западині профілю багатозубого виробу, та кути $\eta_1 \neq \eta_2$

За вихідний переріз виробу приймемо переріз перпендикулярний до осі виробу, в якому вершинна точка ріжучої кромки *К* обкатної фрези знаходиться в точці *В* западині профілю багатозубого виробу. Дотик різальної кромки зуба обкатної фрези, що обробляє передню поверхню виробу, с зовнішнім колом виробу, позначимо точкою *G*, положення якої визначається кутами η_1 і η_2. З побудови маємо:

$$ON = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma),$$

$$EN = H \cdot \sin(\psi),$$

$$OE = ON - EN = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H \cdot \sin(\psi),$$

$$\sin(\delta) = \frac{OE}{0.5 \cdot D} = \sin(\psi + \gamma) - \frac{H}{0.5 \cdot D} \cdot \sin(\psi),$$

$$\eta_2 = \psi + \gamma - \delta,$$

$$\eta_1 = \varepsilon - \eta_2.$$

де *D* - діаметр виробу, що обробляється;

γ - передній кут багатозубого виробу;

ψ - кут, який характеризує положення передньої площини профілю виробу після повороту;

H - висота зуба виробу, виміряна по передній площині;

ε - кутовий крок зубів.

Кут в плані φ при проектуванні дискових обкатних фрез задається такої величини, щоб забезпечити сприятливу геометрію різальної частини. Але з досліджень [2,3], та з точки зору технології виготовлення, доцільно проектувати дискову обкатну фрезу з симетричним профілем. Тому практичний інтерес являє собою випадок, коли кути η_1 і η_2 дорівнюють один одному.

В цьому випадку величина кута ψ приймає цілком певне значення. Визначення глибини *t*, коли кут $\eta_1 = \eta_2 = \eta$ наведено на рис. 2.

Зображений профіль АВС виробу. Кут ε рівний:

$$\varepsilon = \frac{360^{\circ}}{Z}$$

Цей кут розділено на дві рівні частини, і таким шляхом визначено положення точки *G* на зовнішньому колі виробу. Проведена лінія GK, яка з одного боку обмежує кут ψ. Іншою стороною, що обмежує ψ кут буде пряма АВ. Профіль АВС повертається у вихідне положення на кут $(\psi + \gamma)$. Вихідне положення профілю зображено пунктиром.

© Равська Н.С., д.т.н., проф., Парненко В. С., асистент.

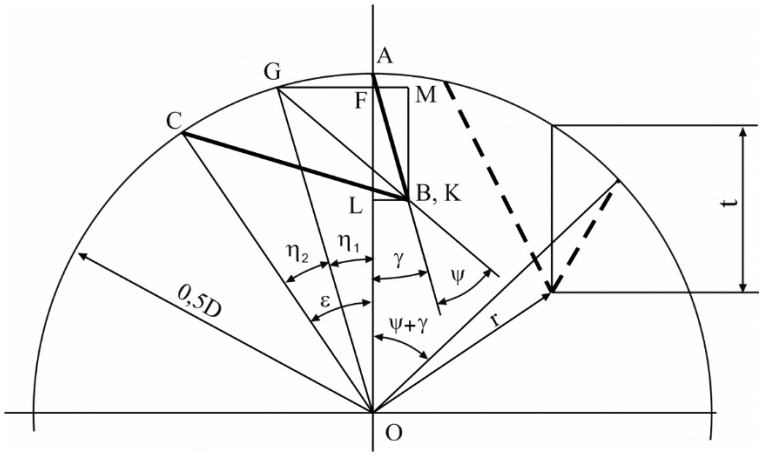


Рисунок 2. Схема визначення кутів η_1 і η_2 та глибини ***t***, коли вершинна точка зуба обкатної фрези К знаходиться в точці В западині профілю багатозубого виробу, та кути $\eta_1 = \eta_2 = \eta$

З побудови маємо:

$$GF = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\eta),$$
$$MF = BL = H \cdot \sin(\gamma),$$
$$GM = GF + MF = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\eta) + H \cdot \sin(\gamma),$$
$$OF = 0.5 \cdot D \cdot \cos(\eta),$$
$$AF = 0.5 \cdot D - OF = 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos(\eta)),$$
$$AL = H \cdot \cos(\gamma),$$
$$LF = AL - AF = H \cdot \cos(\gamma) - 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos(\eta)),$$
$$\angle GBM = \psi + \gamma,$$
$$tg(\psi + \gamma) = \frac{GM}{MB},$$
$$tg(\psi + \gamma) = \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin(\eta) + H \cdot \sin(\gamma)}{H \cdot \cos(\gamma) - 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos(\eta))}$$

У цьому випадку розмір GB дорівнює:

$$GB = \frac{GM}{\sin(\psi + \gamma)}$$

або

$$t = GB = \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin(\eta) + H \cdot \sin(\gamma)}{\sin(\psi + \gamma)}$$

При відомих величинах кутів η_1 і η_2, визначення мінімального радіуса R_0 дискової обкатної фрези наведено на рис.3.

Площина проекцій V обрана перпендикулярно осі фрези, а площину W - перпендикулярно осі виробу.

У вихідному перерізі II - II зображений профіль виробу ABC (його проекції позначені $A_3B_3C_3$ і $A_2B_2C_2$). В процесі обробки фреза обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю $\overline{\omega}_\phi$, а вироб обертається навколо її осі з кутовою швидкістю $\overline{\omega}$. За час повороту дискової обкатної фрези на один зуб, багатозубий виріб також повертається на один зуб.

Отже, можемо записати:

$$\frac{\rho_\phi}{\rho} = \frac{Z}{Z_0}$$

де ρ_ϕ - кут повороту фрези;

ρ - відповідний кут повороту оброблюваного виробу;

Z_0 - число зубів дискової обкатної фрези;
Z - число зубів оброблюваного виробу.

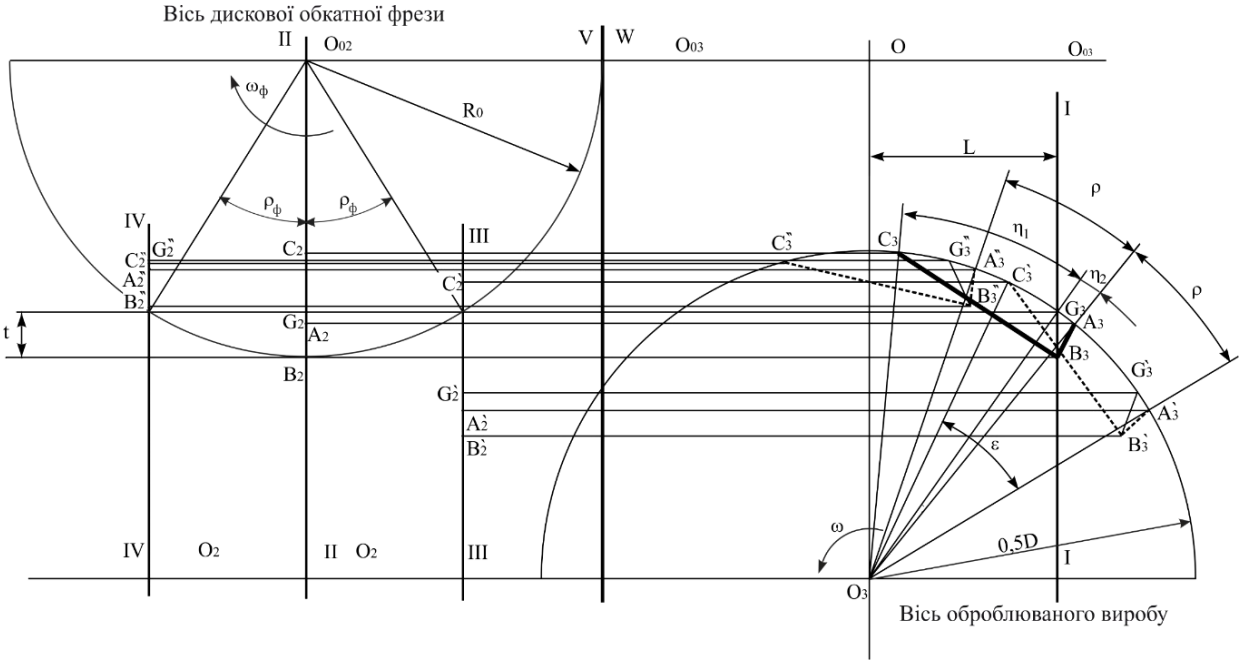


Рисунок 3. Визначення допустимого зовнішнього радіуса R_0 дискової обкатної фрези

Вершинна точка різальної кромки обкатної фрези, обертаючись навколо осі, описує в перерізі I - I коло радіуса R_0, яка в справжню величину проектується на площину V. Цей профіль ABC повертаємо за годинниковою стрілкою на кут ρ навколо осі виробу і отримуємо профіль деталі $A^IB^IC^I$ (Його проекції позначені $A^I_3B^I_3C^I_3$ і $A^I_2B^I_2C^I_2$) в перерізі III - III. Точка G розташовується, як випливає з креслення, всередині профілю $A^IB^IC^I$. Тому в момент врізування не буде проникнення розглянутої точки різальної кромки в тіло виробу і друга умова формоутворення буде дотримуватися.

Граничний випадок буде тоді, коли точка G_3 збігається з точкою C^I_3. В цьому випадку кут ρ повороту профілю виробу при переході від перерізу II - II до перерізу III - III буде дорівнює:

$$\rho = \eta_1$$

Тому, для того, щоб в цій зоні дотримувалася друга умова формоутворення, кут ρ повинен бути менше η_1, або дорівнює йому.

$$\eta_1 \geq \rho$$

Для того, щоб одержати профіль виробу у другому крайньому перерізі IV - IV повернемо профіль ABC проти годинникової стрілки на кут ρ. Профіль виробу в перерізі IV - IV буде $A^{II}B^{II}C^{II}$ (його проекції позначені $A^{II}_3B^{II}_3C^{II}_3$ і $A^{II}_3B^{II}_3C^{II}_3$). Як випливає з креслення, у цьому випадку точка G лежить за межами профілю $A^{II}B^{II}C^{II}$. Тому, в момент виходу з процесу різання крайня вершинна точка різальної кромки дискової обкатної фрези буде проникати в тіло виробу і обробка заданого профілю у відповідності з кресленням виявляється неможливою - друга умова формоутворення не виконується. Граничний випадок буде тоді, коли точка G буде збігатися з точкою A^{II}. В цьому випадку кут повороту ρ профілю виробу при переході від перетину II - II до перетину IV - IV повинен бути:

$$\rho = \eta_2$$

Отже, для того, щоб у момент виходу з контакту з виробом дотримувалась друга умова формоутворення, необхідно, щоб кут ρ був менший або дорівнює η_2.

$$\eta_2 \geq \rho$$

Таким чином маємо:

$$\eta_1 \geq \rho,$$

$$\eta_2 \geq \rho,$$

$$\varepsilon = \eta_1 + \eta_2.$$

© Равська Н.С., д.т.н., проф., Парненко В. С., асистент.

Виходячи з цього доцільно приймати кут $\eta_1 = \eta_2$.

Мінімальне значення зовнішнього радіуса $R_{0\min}$ фрези визначається по формулі:

$$\cos(\rho_\phi) = \frac{R_{0\min} - t}{R_{0\min}}$$

звідси

$$R_{0\min} = \frac{t}{1 - \cos(\rho_\phi)} \quad (1)$$

де

$$\rho_\phi = \rho \frac{Z}{Z_0}$$

З точки зору другої умови формоутворення, найбільша небезпека проникнення різальної кромки дискової обкатної фрези в тіло виробу має місце в вершинній точці різальної кромки. Аналіз показує, що найбільш часто це положення дотримується. Якщо виникає необхідність у перевірці дотримання другої умови формоутворення для інших точок різальної кромки, то методика розв'язання цієї задачі може бути прийнята тією ж самою, що і для вершинної точки різальної кромки.

На основі виконання другої умови формоутворення визначено мінімально допустимий радіус зуба дискової обкатної фрези (1), та показано, що він залежить від діаметра та числа зубів виробу, від максимальних кутового кроку та висоти зуба в групі, від головного кута в плані та переднього кута багатозубого виробу, а також від числа зубів у групі багатозубого виробу, яке дорівнює числу зубів дискової обкатної фрези.

Література

1. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов. - К.: Вища школа, 1990. – 424 с.
2. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. К.: Вища школа. Головное изд-во, 1986. 455 с.
3. Спосіб нарізування дискових пил з нерівномірним кроком зубів: пат. u 2015 02233 Україна: МПК (2016.01), B23F 5/00. № 104229; заявл. 13.03.2015; опубл. 25.01.2016, Бюл. № 2. 4 с.
4. Одинцова А. С. Фасонные фрезы для обработки храповых колес методом обкатки: дис.… канд. техн. наук: 05.03.01. Киев, 1989. 208 с.

Равская Н.С., д.т.н., проф.
Парненко В. С., ассистент.
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ДИАМЕТРА ДИСКОВОЙ ОБКАТОЧНОЙ ФРЕЗЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТРЕЗНЫХ ПИЛ С НЕРАВНОМЕРНЫМ ШАГОМ

Аннотация. Рассмотрена задача определения минимально допустимого наружного диаметра дисковой обкаточного фрезы при обработке отрезных пил с неравномерным шагом. Решение этой задачи рассмотрено из условия соприкосновения исходной инструментальной поверхности с обработанной деталью без проникновения в тело детали. Рассмотрен случай, когда ось обкаточной фрезы установлена перпендикулярно к оси обрабатываемого изделия, и при обкаточном движении наблюдается вращения фрезы и изделия вокруг своих осей.

За исходный сечение отрезной пилы принято сечение перпендикулярное оси изделия, в котором вершинная точка режущей кромки К обкаточной фрезы находится в точке В впадины профиля отрезной пилы. Соприкосновение режущей кромки зуба обкаточной фрезы, которая обрабатывает переднюю поверхность отрезной пилы, с внешней поверхностью изделия, обозначено точкой G, положение которой определяется углами η_1 и η_2.

На основе выполнения второго условия формообразования определены минимально допустимый радиус зуба дисковой обкаточной фрезы, и показано, что он зависит от диаметра и числа зубов отрезной пилы, максимальных углового шага и высоты зуба в группе,

© Равська Н.С., д.т.н., проф., Парненко В. С., асистент.

от главного угла в плане и переднего угла отрезной пилы, а также от числа зубов в группе отрезной пилы, равное числу зубов дисковой обкаточной фрезы.

Ключевые слова: формообразования поверхностей резанием, наружный диаметр, обкаточные дисковые фрезы, дисковые отрезные пилы, неравномерный шаг.

Ravska N.S. Professor, DSc.
Parnenko V.S. Assistant
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

THE DEFINITION OF MINIMALLY ADMISSIBLE DIAMETER OF THE DISK ROLLING SHAPED MILLING CUTTER IN PROCESSING OF THE CUTTING SAWS WITH IRREGULAR STEP

Annotation. The problem of determining the minimum permissible external diameter of the disk rolling shaped milling cutter during the processing of cutting saws with irregular pitch is considered. The solution of this problem is considered from the condition of contact of the initial instrumental surface with the processed part without penetration into the body of the part. Is considered the case when the axis of the milling cutter is installed perpendicular to the axis of the workpiece, and during the running motion, rotations of the milling cutter and the products around their axes are observed.

For the initial cross-section of the cutting saw, a cross-section perpendicular to the axis of the product is taken, in which the vertex point of the cutting edge K of the milling cutter is located at the point B of the grooves of the cutting saw. The contact of the cutting edge of the tooth of the milling cutter that processes the front surface of the cutting saw, with the outer surface of the article, is indicated by a point G, the position of which is determined by the angles η_1 *and* η_2.

Based on the second shaping condition, the minimum permissible radius of the tooth of the disk rolling tool shaped milling cutter. Determined and it is shown that it depends on the diameter and the number of teeth of the cutting saw, the maximum angular pitch and the tooth height in the group, from the main angle in the plan and the front angle of the cutting saw, and also on the number of teeth in the group, equal to the number of teeth of the disk milling cutter.

Keywords: shaping of surfaces by cutting, outer diameter, shaped milling cutter, disk cutting saws, irregular pitch.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018.

© Равська Н.С., д.т.н., проф., Парненко В. С., асистент.

УДК 629.3.018.2

Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.
Херсонський національний технічний університет

ПРОГРАМНО-АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИМУЛЯТОРІВ РУХУ НА ОСНОВІ ПРИВОДІВ ПРОСТОРОВОГО КОМПОНУВАННЯ

Стаття присвячена комплексному дослідженню розвитку тренажерної техніки. Авторами дається порівняльна характеристика механізмів паралельної структури з конструкціями послідовної структури. Проаналізовані існуючі роботи вчених, які досліджують тренажери з паралельної кінематикою. Запропоновано структурну схему системи управління каркасної установкою. Розроблено алгоритм системи технічної діагностики мехатронної системи тренажерної платформи. Використавши практичний досвід, проведено дослідження діапазону кутів нахилу оператора для більш ефективної імітації. Внесено пропозиції для розширення можливостей роботи тренажерної платформи.

Ключові слова: *тренажерна платформа, механізм паралельної структури, пряма задача кінематики, зворотна задача кінематики, каркасна установка.*

У світовій практиці автомобілебудування для різнобічного оцінювання функціональних можливостей автомобілів, поширюється застосування тренажерних комплексів. Для відтворення реалістичних умов, доцільно механічні навантаження доповнювати монітори симулятора візуальним супроводженням навколишніх обставин. В результаті застосування потужних комп’ютерних систем і спеціалізованого програмного забезпечення досягається реалістичність того, що відбувається [1, 2].

Транспортні тренажери характеризуються за ступенем рухливості, як одно рухливі, двох рухливі і т.п. Найбільш поширені багатоступеневі тренажерні комплекси побудовано на основі механізмів паралельної структури (МПС) [1]. МПС мають наступні переваги у порівнянні з механізмами послідовної структури:

- висока жорсткість, що обумовлена роботою телескопічного пристрою на розтягнення-стиснення і рівномірним розподілом зусиль по всій структурі;
- більш висока точність позиціонування;
- збільшена вантажопідйомність при однаковій вазі механізмів;
- закріплені на нерухомій основі приводні вузли, що знижує вплив сил інерції ланок механізму при русі;
- при меншій масі вихідної ланки забезпечуються більш високі швидкості переміщень і прискорення;
- різко знижується металоємність.

Незважаючи на наявність багатьох переваг, механізми паралельної структури мають ряд недоліків і обмежень. Наприклад, кілька замкнутих кінематичних ланок збільшують жорсткість і вантажопідйомність механізму, але при цьому зменшують робочий простір маніпулятора. Недоліком є незручність управління: переміщення вихідної ланки в межах одного ступеня свободи має бути скоординованим з роботою всіх приводів[4]. Це завдання вирішується повною або частковою кінематичною розв'язкою переміщення вихідної ланки, при якій одна ступінь свободи вихідної ланки співвіднесена (пов'язана) з одним конкретним приводом. Негативною стороною вирішення цього завдання є збільшення навантаження на окремий привід, можливо послаблення жорсткості конструкції і підвищення вимог до приводів.

В Україні дослідження тренажерів з паралельною кінематикою проводяться в НТУУ «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського професором Кузнєцовим Ю.М. [1], в Одеському національному політехнічному інституті проф. Яглінським В.П. [3-6], в Херсонському національному технічному університеті проф. Дмитрієвим Д.О. [7] і проф. Рудаковою Г.В. [8].

Розв’язку задач про положення рухомих платформ багатоступеневих механізмів присвячено роботи багатьох відомих науковців: Крайнева С. Л., Коліскора А.Р., Глазунова А.А, Воробйова П.А., Лебедева С.В. та інших [9].

© Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.

У загальному вигляді до задач кінематики просторових механізмів відносяться:

1. Пряма задача кінематики Визначення траєкторії руху вихідної ланки за заданими законами руху приводних ланок.
2. Зворотна задача кінематики - Визначення законів переміщення керуючих приводних координат, що забезпечують потрібний закон переміщень вихідної ланки.
3. Розв'язок системи рівнянь для розрахунку керування виконавчими приводами з метою забезпечення заданої траєкторії переміщень вихідної ланки.

При аналізі існуючих МПС з точки зору програмування системи керування важливе значення має зворотна задача кінематики. Але при синтезі нового технологічного обладнання з паралельною кінематикою особливу роль відіграє саме пряма задача кінематики тому, що критеріями створення високопродуктивних тренажерів є здатність виконавчого органу (ВО) забезпечувати поставлені технологічні задачі.

МПС характеризуються тим, що ВО пов'язаний з несучою системою з'єднувальними кінематичними ланками змінної довжини, кожна з яких містить одну поступальну пару, забезпечену приводом, та дві сферичні пари.

«*l*-координатний» механізм представляє собою два відносно рухомих тіла (ВО та несуча система механізму), з'єднаних між собою стрижнями змінної довжини *l*. Зміною однієї або декількох довжин *l* можна змінювати відносне положення з'єднаних тіл, тобто можна здійснювати маніпулювання робочим органом у визначеному робочому просторі. Довжини *l* з'єднувальних кінематичних ланок однозначно визначаються положенням виконавчого органу.

Згідно розглянутого методу [3], за допомогою побудови сфер та положень точок на ній, можуть бути систематизовані положення самого тіла.

На відміну від загальновідомих рівнянь руху вільного тіла з використанням кутів Ейлера, наведені рівняння описують рух тіла за допомогою тільки лінійних величин [8].

Для ряду структур *l*-координатних механізмів координати точок виконавчого органу в системі OXYZ можуть бути визначені аналітично. У таких структурах кількість точок на тілі або на базі дорівнює трьом та у одній з них сходяться три відрізка, внаслідок чого у кожній з структур можна виділити три піраміди, ребра яких утворені відрізками l_1, l_2, . . . , l_6, які з'єднують точки бази, та відрізками, які з'єднують точки тіла.

Сутність чисельно-аналітичного метода полягає в утворенні структури *l*-координат, для якої декартові координати точок тіла визначаються у явному вигляді, визначення значень додаткових координат, заданому *l*-координатами та знаходженню декартових координат заданих точок тіла.

Для вирішення прямої задачі кінематики в структурах типу гексапод запропоновано [4] ітераційний метод визначення положення рухомої платформи у просторі за рахунок отримання координат трьох точок *a*, *b*, *c*, в яких телескопічні штанги шарнірно з'єднані з вихідною ланкою (рис. 1).

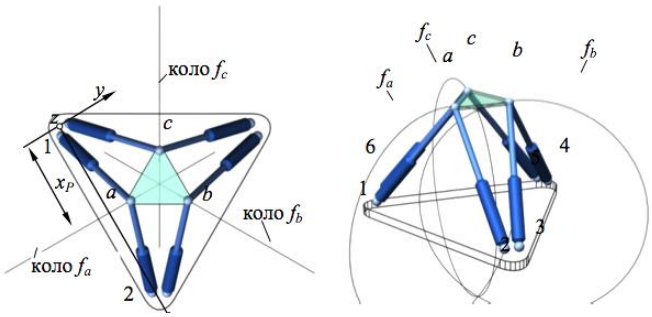


Рис.1. Розташування областей в компоновці верстату

Розглянемо будь-яку пару штанг змінної довжини l_1, l_2, з'єднаних в одній точці, наприклад *A* (рис. 2). Дана структура представляє собою механізм–типу біпод з трьома замкненими контурами, які складають просторовий МПС – гексапод.

© Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.

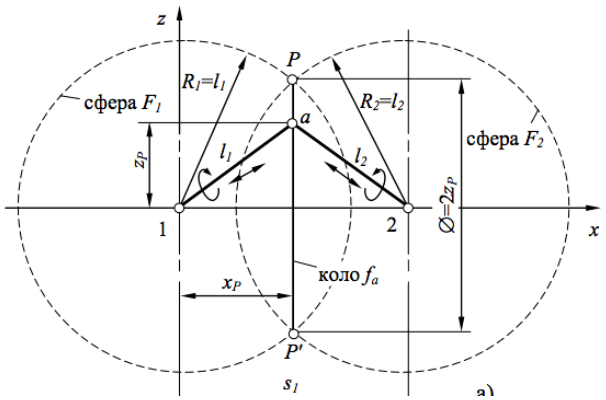


Рис. 2. Схема кінематики біподу

При заданих величинах l_1, l_2 та положенні нижніх кінців штанг (x_1, z_1) і (x_2, z_2), відповідно, точка *a* на кінці стрижня l_1 може займати у просторі будь-яке положення на поверхні сфери F_1 з радіусом $R_1=l_1$, а кінець штанги l_2 положення на поверхні сфери F_2 з радіусом $R_2=l_2$. Спільною областю, де може бути визначено точку *a* шарнірного з'єднення трикутного контура, буде перетин двох сфер F_1 і F_2, що уявляє собою криву другого порядка - коло f_a радіусом $R_a=z_P$. Точка *P* є допоміжною в визначенні параметрів кола f_a, зокрема радіусу і положення на міжосьовій відстані |1-2| [6].

Слід зауважити, що коло f_a має сталу орієнтацію у просторі і завжди перпендикулярно до осі *0x*, його положення f_a (*C*) визначається координатою x_P, і як радіус z_P. залежить від вхідних змінних l_1, l_2. В компоновці гексапода (x_1, z_1) і (x_2, z_2) не змінні.

Параметри x_P і z_P в свою чергу визначаються системою рівнянь двох кіл, радіуси яких $R_1=l_1$ і $R_2=l_2$ відповідають екваторам сфер F_1 і F_2, відповідно

$$\begin{cases} x_P^{\ 2} + z_P^{\ 2} = l_1^{\ 2}; \\ (x_P - s_1)^2 + z_P^{\ 2} = l_2^{\ 2}, \end{cases} \tag{1}$$

звідки

$$x_{P1,2} = \frac{s_1^{\ 2} + l_1^2 - l_2^2}{2 \cdot s_1^{\ 2}}, \quad z_{P1,2} = \pm\sqrt{l_1^2 - x_{P1,2}^2}. \tag{2}$$

Наступним етапом має бути визначення належності кожної точки шарнірного з'єднання штанг *a*, *b*, *c* на рухомій платформі власній області, тобто $a \in f_a$, $b \in f_b$, $c \in f_c$ при виконанні умови

$$U = \begin{cases} d_{ab} - \varepsilon = \left|\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2}\right|; \\ d_{bc} - \varepsilon = \left|\sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2 + (z_b - z_c)^2}\right|; \\ d_{ca} - \varepsilon = \left|\sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2 + (z_c - z_a)^2}\right|, \end{cases} \tag{3}$$

де d_{ab}, d_{bc}, d_{ca} - сталі відрізки між точками *a-b*, *b-c*, *a- c*, відповідно, що визначаються конструктивним виконанням рухомої платформи; ε - задана похибка наближення розрахунків.

Отримання координат x_a, x_b, x_c, z_a, z_b, z_c виконується методами математичного програмування шляхом ітерацій з підстановкою значень (x_a, z_a), (x_b, z_b), (z_a,z_c) по черзі у вкладені цикли направленого руху кожної точки *a*, *b*, *c* уздовж власної області визначення f_a, f_b, f_c .

Дану методику також можна використати для МПС з постійною довжиною штанг і змішаною кінематикою. Тоді, наприклад, в структурі біглайду змінними будуть (x_1, z_1) і (x_2, z_2), а l_1, l_2 – сталі величини. Трикутний замкнений контур біподу або біглайду є основним в будові просторових МПС, тому ітераційний метод в поєднанні з аналітичним визначенням точки з'єднання двох штанг просторової стрижневої системи найбільш підходить для теоретичних досліджень майбутніх компоновок тренажерів з паралельною кінематикою [1].

© Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.

Викладені алгоритми використовують як основні для розрахунку керованого переміщення ВО тренажеру, моделювання положень багатоланкового просторового МПС і побудов динамічних моделей тренажерів з паралельною кінематикою нового покоління.

В процесі виконання роботи було виготовлено дослідний зразок тренажеру, використовуючи спеціальне апаратне і програмне забезпечення.

1.До апаратного забезпечення відносяться:

- механічний каркас;
- тренажерне крісло;
- комп’ютерна система управління приводами.

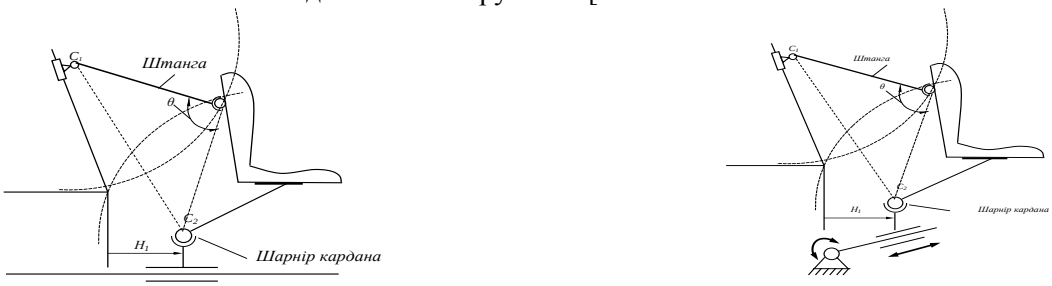
На експериментальній установці досліджено діапазон кутів нахилу крісла, який складає від 0 до 30 градусів навколо осей координат. Швидкість переміщень кареток задається в діапазоні 0.6 м/хв - 1.8 м/хв, яким відповідає кутова швидкість крісла 0.52 рад/хв - 1.6 рад/хв навколо осей (рис .3).

а) б) в) г)

Рис. 3. Наглядне зображення діапазону кутів нахилу дослідного зразка:
а) – початкове положення крісла; б) – підйом крісла відносно осі ординат на 15°;
в) – крен крісла відносно осі ординат на 15°; г) - крен крісла відносно осі ординат на-15°

Для крайніх положень крісла дослідного зразка тренажеру зафіксовано керовані координати, які відпрацьовують крокові двигуни просторової мехатронної системи.

Розр[illegible]чий дослідний зразок, на даний момент реалізує обертання навколо двох осей, що відп[illegible]уляції таких маневрів як крен і занос. Для [illegible]ирення можливостей пропо[illegible]ух нижнього шарніру крісла вздовж осі [illegible]а обертання даної наг[illegible]рис. 4, б) при цьому не потребує [illegible]зв’язку задач [illegible]алів до системи керування [10].



а) б)

Рис. 4. Конструктивна модернізація дослідного зразка:
а – поступальний рух крісла вперед-назад; б – імітація тангажу

Переміщення крісла тренажеру задається верхнім рівнем управління, який складається з персонального комп'ютера і керує кожним електродвигуном за допомогою окремого драйвера. Структурна схема системи управління каркасної установкою приведена на рис.5.

© Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.

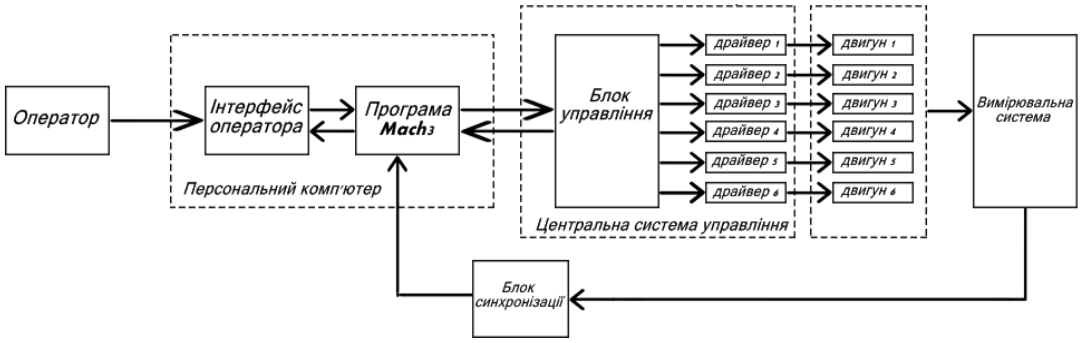


Рис. 5. Структурна схема системи управління

Датчики, розміщені на приводах та елементах конструкції установки, разом складають інформаційно-вимірювальну підсистему, яка відстежує параметри роботи каркасної установки і відправляє дані на верхній рівень управління [8, 11].

В якості вимірювальної підсистеми виступають датчики положення виконавчого органу та віброакустичний датчик, на підставі даних якого виконується функціональна діагностика роботи установки(рис.6).

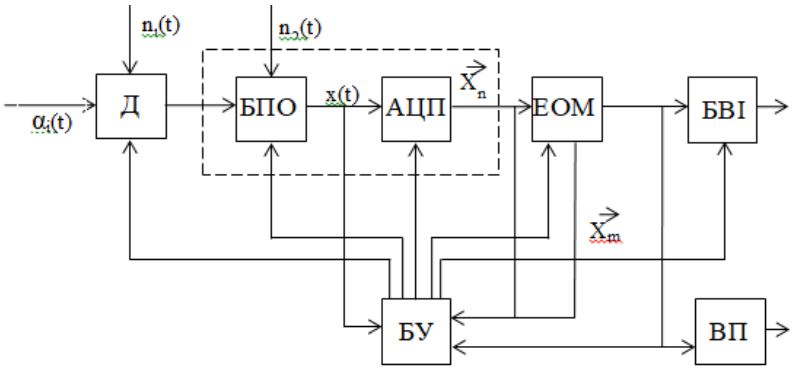


Рис. 6. Структурна схема системи технічної діагностики
Д – Датчик; БПО – блок попередньої обробки; АЦП – аналогово цифровий перетворювач; ЕОМ – електронно-обчислювальна машина; БУ - блок управління параметрами й алгоритмами; БВІ - блок регістрації, відображення інформації; ВП – виконавчий пристрій, X_n - робоча вибірка, X_m – навчальна вибірка (n,m – об’єми вибірок).

У процесі технічної діагностики інформація про поведінку об'єкта контролю αi реєструється датчиком (Д). Приймачі БПО і АЦП реалізують функції попередньої аналогової обробки суміші сигналів і перешкод, забезпечуючи посилення слабких сигналів на тлі власних шумів; смугову, низькочастотну та режекторну фільтрацію зовнішніх n1 (t) і внутрішніх n2 (t) перешкод; нормування вихідних процесів x (t) за інтенсивністю. Перетворені сигнали надходять на ЕОМ, де проходять статистичну, математичну обробку. Блок БУ реалізує функції управління процесом обробки сигналів в приймачах і процесорі, а також задає параметри для виконавчого пристрою (ВП) [12].

У подальшому планується проведення ряд комплексних досліджень впливу збурюючих факторів апаратної частини установки з метою розв’язання оптимізаційної задачі, що зменшила б вплив збурень на рух тренажеру.

2. До спеціалізованого програмного забезпечення тренажеру відносяться:

- програма TAngle;
- середа 3D моделювання 3D Studio Max.

На основі виразів і алгоритмів переміщення ВО, було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення TAngle (рис. 7), яке дозволяє здійснювати аналіз кінематичних параметрів тренажеру.

© Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.

Рис. 7. Зовнішній вигляд робочого вікна програми TAngle

Дана програма розв’язує пряму задачу кінематики, де задаються параметри векторів V_A і V_B, а також значення кутів δ_1 і δ_2. TAngle графічно відтворює план зв’язку швидкостей та кутів нахилу штанг установки з МПС, та показує, положення робочого органу при заданих параметрах.

Для комп’ютерного розв’язку задач кінематики та моделювання роботи просторових симуляторів руху створена ієрархічно зв’язана модель в середовищі 3D Studio max з використанням математичного зв’язку усіх ланок та їх складових, який програмується на мові maxscript.

Створено повнорозмірну геометричну модель механічної складової приводів просторового компонування тренажерної платформи для симуляції руху екіпажів мобільних машин (рис. 8) [10].

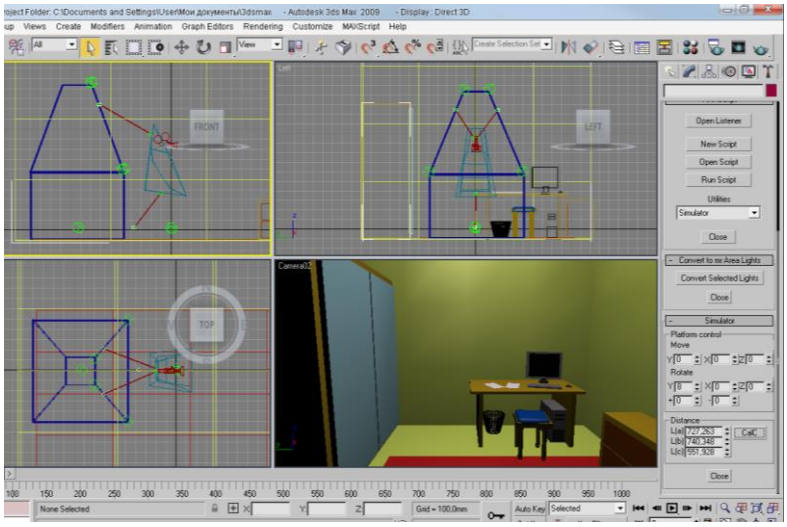


Рис. 8. Створена у середовищі 3D StudioMax ієрархічно-зв’язана комп’ютерна модель просторової системи приводів для керування тренажером

Взаємний зв’язок засобів апаратного і програмного забезпечення [10] можна представити у загальному виді графу поданого на рис. 9.

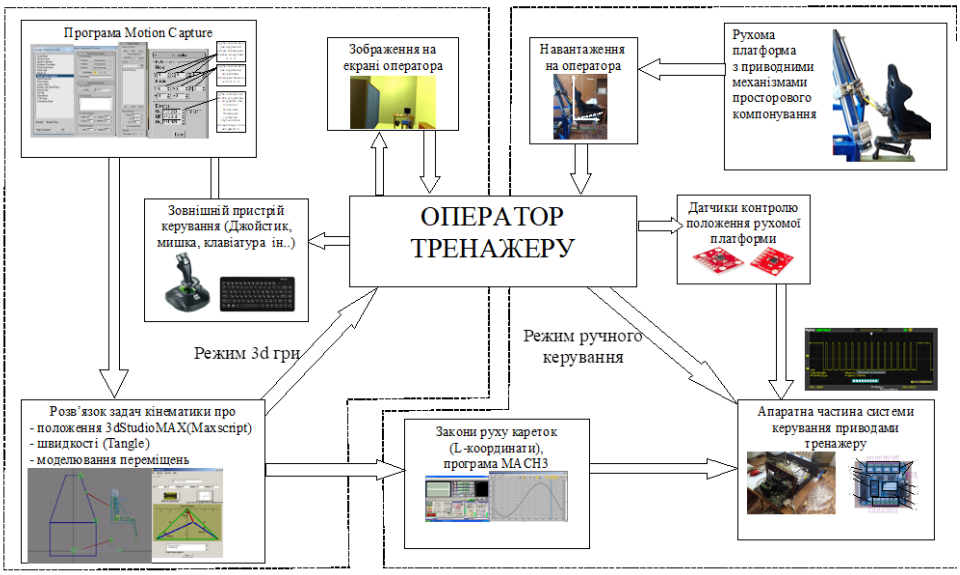


Рис. 9. Граф взаємозв'язку модулів мехатронної системи з приводами просторового компонування

Висновки. Виконано аналіз сучасних систем тренажерів і тренувальної техніки для екіпажів мобільних машин, який свідчить про стрімкий розвиток мехатронних систем з застосуванням конструкцій просторових приводів для відтворення або симуляції складних переміщень несучих платформ з оператором з безпосереднім зв'язком системи керування і відповідним інтегрованим впливом на хід переміщень платформи. Більшість автоматизованих тренажерів побудовано із застосуванням багатоланкових і багатоприводних шарнірно-стрижневих систем.

Розглянуто математичне ядро для зв'язку зворотної і прямої задач кінематики.

Виготовлено дослідний зразок просторової мехатронної системи з апаратним забезпеченням на основі механізму паралельної структури оснащеного кроковими двигунами, блоку управління та датчиків положення.

Експериментально встановлено робочі параметри виготовленого тренажерного стенду, які складають заміну кутів обертання (нахилу) у діапазоні 0.6 м/хв - 1.8 м/хв. та діагональних швидкостей ланок в межах від 0.52 рад/хв до 1.6 рад/хв навколо осей.

Надано пропозиції щодо удосконалення тренажерної техніки та розширення областей її застосування.

Інформаційні джерела

1. Кузнєцов Ю.М. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури: Монографія / Ю.М. Кузнєцов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич; під ред.. Ю.М. Кузнєцова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. - 456 с.
2. Merlet J. P. Parallel robots / J. P. Merlet – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 372 p.
3. Яглінський В.П. Визначення технічного рівня тренажера-гексапода / В.П. Яглінський, А.С. Обайді, М.М. Москвичов, Г.В. Козерацький // «Сучасні технології промислового комплексу», 2015, ХНТУ, Херсон, Україна. – 26 с.
4. Москвичев Н.Н. Спектр частот тренажера-гексапода при маневре / Н.Н. Москвичев, В.П. Яглинский, А.С. Обайди, Г.В. Козерацкий//«Сучасні технології промислового комплексу», 2015, ХНТУ, Херсон, Україна. – 58 с.
5. Ал-Обайди А.С. Имитационная модель механизмов гексапода/ А.С. Обайди, Н.Н. Москвичев, В.П. Яглинский, Г.В. Козерацкий//«Сучасні технології промислового комплексу», 2015, ХНТУ, Херсон, Україна.
6. Яглінський В.П., Гутиря С.С. Надійність авіаційного тренажера на основі гексапода при екстремальних навантаженнях // Вісник СевНТУ, Вип. 120, Серія Механіка, енергетика, екологія: Зб. Наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2011. – С. 196-205.
7. Дмитрієв Д.О. Застосування графоаналітичного методу для аналізу кінематики

© Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.

механізмів паралельної структури і викладання дисципліни теорія механізмів і машин / Д.О. Дмитрієв, С.А. Русанов, О.О. Сафьяник // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу», випуск 3. – Херсон: ХНТУ, 2017.- С.67-71.

8. Рудакова Г.В. Розробка спеціалізованого програмного забезпечення для проектування каркасних установок з механізмами паралельної структури / Г.В. Рудакова, С.А. Русанов, С.В. Ревенко // Вісник Херсонського національного технічного університету. Вип. 4(63). – Херсон: ХНТУ, 2017.

9. Глазунов В. А. Принципы классификации и методы анализа пространственных механизмов с параллельной структурой / В. А. Глазунов, А. Ш. Колискор, А. Ф. Крайнев, Б. И. Модель // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 1. – С. 41 – 49.

10. Омельчук А.А. Математичне і програмно-апаратне забезпечення тренажерної установки за просторовими приводами руху/ А.А. Омельчук, О.О. Сафьяник, І.С. Березкін, П.М. Павлов.//Журнал «Системные технологии». 2018 –С.64-71.

11. Лебеденко Ю.О. Інформаційно-вимірювальна підсистема багатоприводної каркасної установки з механізмами паралельної структури / Ю.О. Лебеденко, А.А. Омельчук, О.О. Сафьяник // Вісник Херсонського національного технічного університету. Вип. 3(62). Т.1. – Херсон: ХНТУ, 2017. - С. 317 – 322.

12. Кондратьева И.Ю. Проблемы функциональной диагностики электромеханических систем в реальном времени/ И.Ю. Кондратьева, А.В. Рудакова//Всеукраїнська науково-практична конференція з автоматичного управління. – Херсон:ХНТУ, 2018, -С. 11.

Ревенко С.В., Павлов П.Н., Кондратьева И.Ю.
Херсонский национальный технический університет

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИМУЛЯТОРА ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИВОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПОНОВКИ

Статья посвящена комплексному исследованию развития тренажерной техники в целом и средствам ее управления. Авторами дается сравнительное описание механизмов параллельной структуры с конструкциями последовательной структуры. Проанализированы существующие на эту тему работы ученых, которые исследуют тренажеры с параллельной кинематикой. Так же предложена структурная схема системы управления каркасной установкой. Разработан алгоритм системы технической диагностики мехатронной системы тренажерной платформы. Используя практический опыт, проведено исследование диапазона углов наклона оператора для более эффективной имитации. Внесены предложения для расширения возможностей работы тренажерной платформы.

Ключевые слова: *тренажерная платформа, механизм параллельной структуры, прямая задача кинематики, обратная задача кинематики, каркасная установка.*

Revenko S.V., Pavlov P.N., Kondratieva I.Y.
Kherson National Technical University

SOFTWARE AND HARDWARE OF THE MOVEMENT SIMULATORS ON THE BASIS OF SPACE APPLICATION DRIVERS

The article is devoted to a comprehensive study of the development of simulators in general and the means of its management. The authors give a comparative description of the mechanisms of a parallel structure with constructions of a sequential structure. An analysis of the work of scientists studying simulators with parallel kinematics is made. A structural diagram of the frame control system is introduced. An algorithm for the system of technical diagnostics of the mechatronic system of the training platform has been developed. Using practical experience, the research of the range of slope angles of the operator for more effective situation has been made. The proposals for expanding the capabilities of the simulator platform have been made.

Keywords: *simulator platform, mechanism of parallel structure, direct task of kinematics, inverse task of kinematics, frame installation.*

Стаття надійшла до редакції 21.05.2018.

© Ревенко С.В., Павлов П.М., Кондратьєва І.Ю.

УДК 621.317.421.3
Рудик В.Ю.,
Інститут фізики та біофізики НАН України, Київ, Україна
Терещенко М.Ф., Рудик Т.О.
Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
E-mail: ru58@ukr.net

РОЗПОДІЛ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ НА ІНДУКТОРАХ АПАРАТУ ФІЗІОТЕРАПІЇ «МИТ-11Т»

Анотація. Розроблений експериментальний зразок апарату фізіотерапії «МИТ-11Т» зі зворотним зв'язком, що полягає у вимірюванні та контролі датчиком значень температури в площині індуктор - біологічна тканина з індикацією та відключенням температурним реле магнітних індукторів апарату у відповідності з встановленим значенням граничної температури. Магнітна індукція – важлива технічна характеристика та діючий фактор лікування апаратів магнітотерапії. Для дослідження фактичного значення магнітної індукції та порівняння з режимами роботи експериментального зразка апарату «МИТ-11Т» зі зворотним зв'язком в даній роботі представлено результати вимірювання постійного і змінного магнітного поля лівого (червоного) та правого (інфрачервоного) індукторів за допомогою тесламетрів «НТ-20» та «Ф 4356» на частоті 50 Гц. Результати вимірювань надали підстави стверджувати, що з оснащенням зворотним зв'язком експериментального зразка апарату «МИТ-11Т» зниження величини магнітної індукції у порівнянні з апаратом «МИТ-11» не спостерігається. Сумарна величина магнітної індукції, яка складається з постійної та змінної складової, знаходиться на рівні, достатньому для досягнення лікувального ефекту.

Ключові слова: магнітотерапевтичний апарат, тесламетр, індуктор, магнітна індукція, температурний датчик.

Вступ. Реабілітація (лат. re — відновлювальна дія, habilis — зручний, пристосований) – комбіноване та координование застосування соціальних, медичних, професійних заходів, направлених на максимально можливе відновлення чи компенсацію порушених психологічних та фізіологічних функцій організму людини, його працездатності. На даний момент проходить реформа системи реабілітації в Україні. В роботі [1] розглянуто сучасний стан системи реабілітації в Україні та представлено основні напрямки її реформування. За останні двадцять років змінилися уявлення про відновлення та підтримку організму людини у світовій медичній практиці. Система реабілітації в Україні сьогодні неефективна, оскільки вона не відповідає міжнародному досвіду, і більшість лікарів, що займаються фізичною терапією, не володіють сучасними знаннями про принципи відновлення організму. Цей факт засвідчила місія з питань реабілітації ВООЗ, яка працювала в Україні 2015 року та дійшла висновку, що наші фахівці на відновному етапі застосовують велику кількість медикаментів, які не мають ефективного реабілітаційного впливу [1].

На даному етапі реформи системи реабілітації проводиться забезпечення реабілітаційних відділень та лікарень відновного лікування сучасною фізіотерапевтичною апаратурою та новими спеціалістами з медичної реабілітації (лікар фізичної та реабілітаційної медицини, фізичний терапевт, ерготерапевт). Щодо технічних засобів системи медичної реабілітації професор В. Стеблюк, голова Комітету реабілітації жертв АТО Української асоциації фізичної та реабілітаційної медицини, відмітив, що в Україні випускають унікальні прилади і комплекси для фізіотерапії і реабілітації, які не поступаються кращим світовим зразкам, особливо відзначив НМЦ «Медичні іноваційні технології» в області психофізичної реабілітації та методик зворотного біологічного зв'язку.

Фізіотерапія входить до складу системи медичної реабілітації людини. Останніми роками в Україні та за кордоном розвивається та використовується один із методів фізіотерапії - магнітотерапія, що базується на лікувальному та реабілітаційному використанні штучних магнітних полів в медицині. Багаточисельні клінічні дослідження вказують на високу терапевтичну ефективність магнітних полів при різних захворюваннях, хорошу їх сумісність з іншими лікувальними засобами. Як фізіологічна, так і лікувальна дія магнітних полів різноманітна, залежить від методів магнітотерапії, біотропних параметрів магнітних полів, їх стабільності на протязі процедури, фізіологічних показників пацієнтів, індивідуальної

© Рудик В.Ю., Терещенко М.Ф., Рудик Т.О.

магніточутливості організму людини та обумовлена регенеративною, протизапальною, знеболюючою, гіпотензивною, седативною, імунокорегуючою, трофічною, протипухлинною, спазмолітичною, судиннорозширювальною, десенсибілізуючою, загальнозміцюючою дією магнітних полів. Серед методів фізіотерапії магнітотерапія – ефективний та перспективний метод завдяки ряду факторів [2]:

- магнітне поле практично без ослаблення проникає через тканини організму;
- магнітне поле не обов'язково потребує контактних методик впливу;
- вплив магнітним полем - один з найбільш фізіологічних видів терапії, що зводить до мінімуму побічні процеси;
- магнітне поле добре узгоджується з іншими фізичними факторами.

Постановка завдання. Перспективним напрямом розвитку магнітотерапевтичної апаратури є удосконалення, розробка та розповсюдження в клінічну практику апаратів, заснованих на комбінованих методах впливу магнітних полів на біологічну тканину (магнітолазерна терапія, електромагнітотерапія, термомагнітотерапія). Комбіновані методи впливу розширили показання для лікувально – профілактичного використання магнітних полів.

В залежності від локалізації дії магнітного поля, яке створюється індуктором, на біологічний об'єкт, розрізняють апарати локальної (місцева фізіотерапія магнітним полем певної ділянки тіла), роподіленої (для фізіотерапії магнітним полем значної ділянки тіла або різних органів та ділянок тіла одночасно, наприклад кінцівки), загальної (для фізіотерапії магнітним полем всього організму людини) дії.

Сучасною тенденцією розвитку магнітотерапії є розробка та використання адаптивних магнітотерапевтичних апаратів з системою контролю фізіологічних показників людини при впливі на організм магнітним полем, що забезпечують надійність використання в необхідному динамічному та частотному діапазонах магнітних полів та оптимізацію біотропних параметрів впливу магнітними полями відповідно до аналізу змін фізіологічних показників людини під час сеансу магнітотерапії [3]. На даний момент біотехнічний зворотний зв'язок за фізіологічними показниками організму людини (артеріальний тиск, температура, пульс) та оптимізації біотропних параметрів магнітних полів відповідно до них здебільшого використовується в магнітотерапевтичних комплексах загальної дії: «Аврора МК», «Магнитор АМП», «Мультимаг МК-04».

Температура є важливим показником ефективності дії магнітного поля на біологічну тканину завдяки ряду факторів [4]:

- протікання патологічного процесу може призводити до виникнення відповідної температурної реакції;
- під час сеансу магнітотерапії важливим є отримання інформації про температуру біологічної тканини (так у випадку перевищення гранично допустимого значення температури порушується процес досягнення терапевтичного ефекту дії магнітного поля та, відповідно, виникають негативні процеси в організмі людини, що призводить до необхідності припинити процедуру магнітотерапії);
- зміна температури організму людини є пусковим механізмом для різноманітних реакцій, рівень яких залежить від терморегуляторних та метаболічних характеристик тканини;
- на органно – системному рівні важливим є тепловий ефект дії магнітних полів.

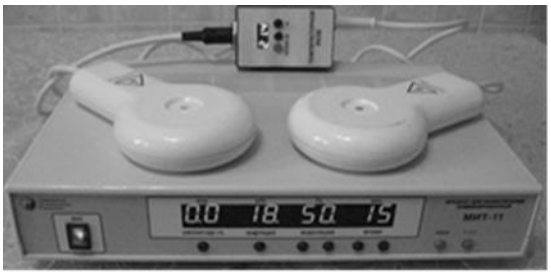
Серед промислово-серійних магнітотерапевтичних апаратів локальної дії відсутній біотехнічний зворотний зв'язок за температурою біологічної тканини.

Метою статті є представлення експериментального зразка апарату фізіотерапії локальної дії зі зворотним зв'язком за температурою «МИТ-11Т» та дослідження розподілу магнітної індукції на червоному та інфрачервоному індукторах даного апарату.

Матеріали та результати дослідження. На базі апарату для фізіотерапії комбінованого локальної дії «МИТ-11» на основі конструктивних рішень, запропонованих в [5,6], нами, спільно з НМЦ «Медичні Іноваційні Технології», розроблено експериментальний зразок апарату «МИТ-11Т» (рис. 1 (а)), в магнітному індукторі якого з червоним лазером встановлено температурний датчик. Температурне реле (рис. 1 (б)) включено послідовно в ланцюг апарат – індуктор. Температурним датчиком здійснюється контроль температури індуктору та біологічної тканини під час фізіотерапевтичної процедури. Вимірювання температури проводиться з точністю 0,1 ◦С. Робочий діапазон температури на реле 0 - 42◦С. Наявність зворотного зв'язку сприяє підвищенню лікувального ефекту. Реле забезпечує автоматичне

© Рудик В.Ю., Терещенко М.Ф., Рудик Т.О.

відключення магнітних індукторів апарату при досягненні гранично допустимого значення температури.



а) б)

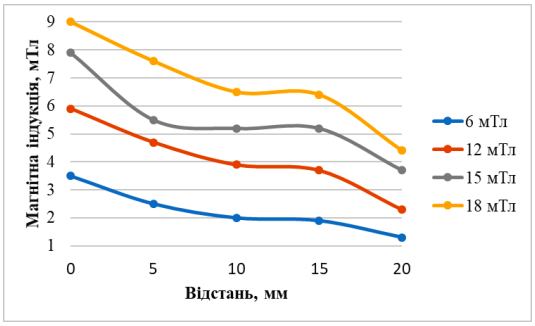
Рис. 1. Експериментальний зразок апарату «МИТ-11Т» (а) з температурним реле (б)

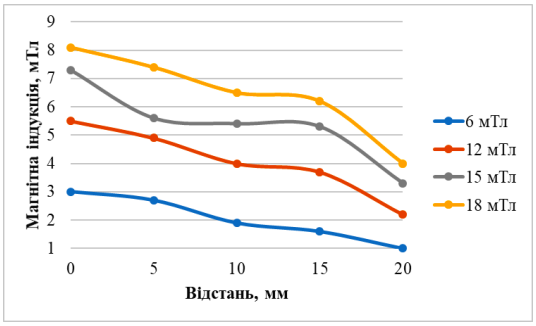
На сучасному етапі розвитку інформаційно - вимірювальної техніки актуального значення набуває контроль технічних характеристик фізіотерапевтичних апаратів. Магнітна індукція –важлива технічна характеристика та діючий фактор лікування в апаратах магнітотерапії. Для дослідження фактичного значення магнітної індукції та порівняння з режимами роботи експериментального зразка апарату «МИТ-11Т» зі зворотним зв'язком в даній роботі представлено результати вимірювання постійної і змінної складової магнітного поля лівого (червоного) та правого (інфрачервоного) індукторів за допомогою тесламетрів «НТ-20» (рис. 2 (а)) та «Ф4356» (рис. 2 (б)) на частоті 50 Гц.

а) б)

Рис. 2. Мілітесламетр «Ф 4356» (а) та тесламетр «НТ 20» (б)

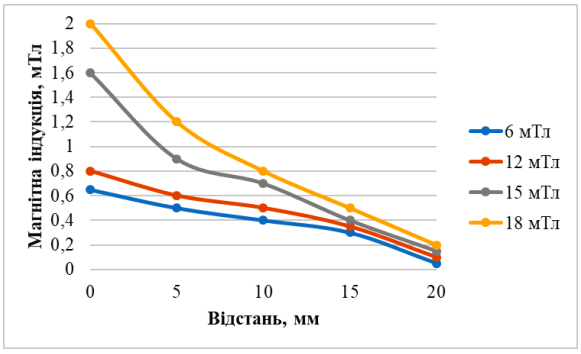
Значення постійної (змінної) складових магнітної індукції на червоному індукторі для режимів роботи апарату 6, 12, 15, 18 мТл в центрі становить 3,5 (0,65); 5,9 (0,8); 7,9 (1,6); 9 (2) мТл та зменшується на відстані 20 мм від центру індуктору до 1,3 (0,05); 2,3 (0,1); 3,7 (0,15); 4,4 (0,2) мТл (рис. 3 а), в)). Значення постійної (змінної) магнітної індукції на інфрачервоному індукторі для режимів роботи апарату 6, 12, 15, 18 мТл в центрі становить 3 (0,55); 5,5 (0,7); 7,3 (1,1); 8,1 (1,6) мТл та зменшується на відстані 20 мм від центру індуктору до 1 (0,05); 2,2 (0,15); 3,3 (0,2); 4 (0,3) мТл (рис. 3 б), г)).



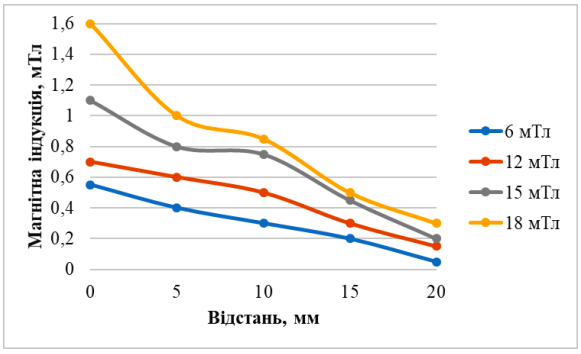


а) б)

© Рудик В.Ю., Терещенко М.Ф., Рудик Т.О.



в)



г)

Рис. 3. Дослідження значень магнітної індукції на червоному та інфрачервоному індукторах апарату «МИТ-11Т»: зміна постійної складової магнітного поля на червоному (а) та інфрачервоному (б) індукторах; зміна змінної складової магнітного поля на червоному (в) та інфрачервоному (г) індукторах

Висновки. Результати вимірювань надали підстави стверджувати, що з оснащенням зворотним зв'язком експериментального апарату «МИТ-11Т» зниження величини магнітної індукції у порівнянні з апаратом «МИТ-11» не спостерігається. Сумарна величина магнітної індукції, яка складається з постійної та змінної складової, знаходиться на рівні, достатньому для досягнення лікувального ефекту.

У майбутніх дослідженнях авторами планується розробка бистродіючої системи зворотного зв'язку за ефективною температурою біологічної тканини під час сеансу магнітотерапії та методика його використання з клінічною апробація апарата магнітотерапії «МИТ-11Т».

Література

1. Mysula I.The current state of rehabilitation of Ukrainian citizens / I. Mysula, Y. Mysula, N. Sydliaruk // Health Prob Civil, 2017. - vol. 11(4). – P. 275-279.

2. Золотухина Е.И. Основы импульсной магнитотерапии. / Е.И. Золотухина, Улащик В.С.- Витебск, 2008. – 144 с.

3. Делавар – Касмаи Мохаммад. Система адаптивной магнитотерапии с пульсометрической обратной связью: Автореф. дис. канд. техн. наук, К, 2017. – 28 с.

4. Тимчик Г.С. Система температурного контролю в магнітотерапії / Г.С. Тимчик, М.Ф. Терещенко, В.Ю. Рудик // Наукові вісті НТУУ «КПІ», №1, 2013.- С.111-116.

5. Рудик В.Ю. Спосіб адаптивної магнітотерапії / В.Ю. Рудик, М.Ф. Терещенко, Т.О. Рудик // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування, № 51(1), 2016. - С.139-144.

6. Патент України на корисну модель 97907, МПК A61N 2/04. Спосіб адаптивної імпульсної магнітотерапії / М.Ф. Терещенко, В.Ю. Рудик, Т.О. Рудик, заявник та патентовласник НТУУ "КПІ". – № u 201411483; заявл. 22.10.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. №7.

Рудик В.Ю.
Институт физики и биофизики НАН Украины, Киев, Украина
Терещенко Н.Ф., Рудик Т.А.
Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, Киев, Украина
E-mail: ru58@ukr.net

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ НА ИНДУКТОРАХ АППАРАТА ФИЗИОТЕРАПИИ «МИТ-11Т»

Аннотация. Разработан экспериментальный образец аппарата физиотерапии «МИТ-11Т» с обратной связью, которая состоит в измерении и контроле датчиком значений температуры в плоскости индуктор – биологическая ткань с индикацией и отключением температурным реле магнитных индукторов аппарата в соответствии с установленным значением граничной температуры. Магнитная индукция – важная техническая характеристика и действующий фактор лечения аппаратов магнитотерапии. Для исследования фактического значения магнитной индукции и сравненения с режимами работы экспериментального образца аппарата

© Рудик В.Ю., Терещенко М.Ф., Рудик Т.О.

«МИТ-11Т» с обратной связью в данной работе представлены результаты измерения постоянного и переменного магнитного поля левого (красного) и правого (инфракрасного) индукторов с помощью тесламетров «НТ-20» и «Ф 4356» на частоте 50 Гц. Результаты измерений дали основания утверждать, что с оснащением обратной связью экспериментального образца аппарата «МИТ-11Т» снижения величины магнитной индукции по сравнению с аппаратом «МИТ-11» не наблюдается. Суммарная величина магнитной индукции, которая состоит из постоянной и переменной составляющей, находится на уровне, достаточном для достижения лечебного эффекта.

Ключевые слова: магнитотерапевтический аппарат, тесламетр, индуктор, магнитная индукция, температурный датчик.

Rudyk V.
Institute of Applied Problems of Physics and Biophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Tereshchenko M., Rudyk T.
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute», Kyiv, Ukraine
E-mail: ru58@ukr.net

DISTRIBUTION OF MAGNETIC INDUCTION ON INDUCTORS OF THE PHYSIOTHERAPY APPARATUS «МИТ-11Т»

Abstract. The experimental sample of the physiotherapy apparatus «МИТ-11Т» with feedback, which consists in measuring and monitoring the temperature values by sensor in the plane of the inductor-biological tissue with indication and disconnection of the temperature relay of the magnetic inductors of the apparatus, in accordance with the established value of the boundary temperature has been developed. Magnetic induction is an important technical characteristic and treatment factor for magnetotherapy apparatus. To study the actual value of magnetic induction and comparison with the operation modes of the experimental sample of the apparatus «МИТ-11Т» with feedback, the results of measurements of the consist and variable magnetic fields of the left (red) and right (infrared) inductors using teslameters «НТ-20» and «Ф 4356» at a frequency of 50 Hz. The results of the measurements gave foundations to assert that with the equip feedback of the experimental sample of the apparatus «МИТ-11Т», the magnetic induction value was not reduced in comparison with the apparatus «МИТ-11». The total value of the magnetic induction, which consists of a constant and variable component, is at a level sufficient to achieve a therapeutic effect.

Key words: magnetotherapy apparatus, teslameter, inductor, magnetic induction, temperature sensor.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2018.

© Рудик В.Ю., Терещенко М.Ф., Рудик Т.О.

УДК 621.9.048

Симонюк В.П., к.т.н., Денисюк В.Ю., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Красовський В.В.
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ РЕЖИМІВ ВІБРУВАННЯ НА РУХ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ВІБРАЦІЙНІЙ ОБРОБЦІ

В статті розглянуто результати експериментальних досліджень залежностей режимів вібрування на рух робочого середовища при вібраційній обробці деталей, перевірено відтворюваність експерименту та достовірність отриманих результатів. Встановлено, що результати математичного моделювання в допустимих межах збігаються з результатами експерименту. Здійснено аналіз технологічних можливостей віброобробки в широкому діапазоні частоти та розмаху коливань. Наочно представлено причини проблематичності вибору оптимальних режимів віброобробки та можливі напрямки їх подолання. Змодельовано різні режими роботи вібраційного верстату. Аналіз результатів дав можливість виявити принципи оптимального підбору режимів віброобробки. Встановлено спосіб досягнення режиму роботи вібраційного верстату з максимально ефективним використанням механічної енергії коливань.

Ключові слова: *вібраційна абразивна обробка, вібробункер, циркуляційний рух, електромагніт, абразивний матеріал, експеримент.*

Постановка проблеми. Вібраційна обробка має широкі технологічні можливості, вирізняється простотою конструкції і обслуговування відповідного обладнання, а також можливістю створення дільниць з автоматизацією допоміжних операцій і міжопераційним транспортуванням деталей.

Сучасний стан питання дозволяє в багатьох випадках призначати режими та інші умови обробки, близькі до оптимальних, але експериментальна перевірка режимів технологічних процесів для віброобробки деталей оригінальної конструкції, виготовлених із різних матеріалів, є необхідною. Крім того, актуальним є створення нових та вдосконалення конструкцій існуючих вібраційних машин, а також розгляд пропозицій щодо мірної обробки деталей та аналіз параметрів технологічного процесу, з метою його інтенсифікації. Все це потребує проведення нових теоретичних та експериментальних досліджень які забезпечать якість механообробки деталей на викінчувальних операціях.

Тому дослідження залежностей режимів вібрування на рух робочого середовища при вібраційній обробці є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес вібраційної обробки полягає в послідовному нанесенні по поверхні оброблюваних деталей великої кількості мікроударів, а також нанесенні великої кількості мікроподряпин на поверхні частинками робочого середовища. Основою процесу є механічне або механохімічне знімання дрібних частинок металу і його окислів з оброблюваної поверхні, а також вигладжування мікронерівностей поверхні за рахунок пластичного деформування частинками робочого середовища, які відтворюють в процесі роботи складні рухи.

Формування поверхневого шару в процесі вібраційної обробки відбувається під дією багаторазових мікроударів частинок робочого середовища, які викликають утворення слідів обробки, зміну геометричних і фізико-механічних параметрів поверхневого шару (шорсткості, мікротвердості, залишкових напружень і структури). Форма і розміри слідів обробки визначаються параметрами робочого середовища, режимами обробки, властивостями оброблюваного матеріалу.

Поєднання таких елементів процесу як послідовне нанесення великої кількості мікроударів, інтенсивне перемішування робочого середовища і оброблюваних деталей при їх різній швидкості перемішування і взаємній орієнтації, супроводжується (в залежності від характеристики робочого середовища і режимів вібрування) зніманням металу і його окислів, поверхневим пластичним деформуванням, і створює умови для виконання очисних, викінчувальних, шліфувальних та інших операцій.

Постановка завдань. Формулювання методики експериментального встановлення залежності одної величини від іншої полягає в чіткому визначенні послідовності дій,

© Симонюк В.П., *к.т.н.*, Денисюк В.Ю., *к.т.н.*, Лапченко Ю.С., *к.т.н.,* Красовський В.В.

спрямованих на отримання вираженого в числовій формі значення вихідної величини при конкретному значенні вхідної величини.

Викладення основного матеріалу. Експеримент складається з багаторазового проробляння трьох вказаних етапів, кількість повторних замірів визначається математичним плануванням експерименту.

Перший етап – задання рівня завантаженості вібробункера робочою сумішшю. Здійснюється цей етап шляхом зважування певної заданої маси суміші та завантаження її в контейнер. При цьому контейнер дещо просідає на пружинах, тому необхідне повторне регулювання магнітного зазору. Після цього можна переходити до наступного етапу.

Судячи з результатів математичного моделювання та візуального спостереження за процесом віброобробки на дослідній установці, можна стверджувати, що встановлення робочого режиму відбувається менше, ніж за одну секунду, тобто практично миттєво, отже часу, що необхідний експериментатору для переходу від першого етапу безпосередньо до третього повинно вистачити для того, щоб вібраційна машина сама здійснила другий етап, тобто щоби розмах коливань контейнера стабілізувався після зміни напруги.

В ході третього етапу необхідним є кількісне визначення розмаху коливань контейнера. Зважаючи на відсутність спеціального обладнання для кількісного визначення цієї величини, розроблено власну методику. Сутність даної методики полягає в наступному. До платформи закріплений підпружинений п’єзоелемент, який сприймає коливання вібробункера при допомозі закріпленої штанги на вібробункері.

Опрацювання результатів експерименту здійснюється для перевірки достовірності даних за результатами математичного моделювання віброобробки та адекватності самої математичної моделі. Здійснення цього завдання тісно пов’язане з математичним плануванням експерименту.

Зважаючи на те, що експеримент однофакторний, необхідно кодувати рівні лише одного фактору. Приймаючи, що апроксимація залежності розмаху коливань контейнера від його завантаженості робочою сумішшю носить квадратичний характер, необхідно виділити три рівні фактору (маси завантаженої суміші): верхній (3 кг), нижній (0 кг) та нульовий (1,5 кг). Кодування відповідних рівнів фактору буде наступним: верхній +1, нижній –1, нульовий 0.

Необхідність складання плану-матриці для однофакторного експерименту відпадає, оскільки цей засіб слугує для визначення всіх необхідних для повноцінної оцінки комбінацій рівнів всіх факторів. В даному випадку фактор лише один, тобто його комбінації скласти в принципі неможливо; зазначимо лише, що експерименти необхідно здійснити по всіх трьох рівнях одного фактору: дослід №1 – на нижньому, дослід №2 – на верхньому, дослід №3 – на нульовому рівні.

Для рандомізації дослідів, тобто визначення послідовності їх виконання, найбільш зручно скористатись методом випадкових чисел. Проте досліди завжди проводяться в декількох повторностях, найчастіше в трьох. Приймемо кількість повторностей – три. Отже, генератор випадкових чисел видав наступні послідовності проведення дослідів: I повторність: 1, 3, 2; II повторність: 3, 1, 2; III повторність: 1, 2, 3.

В ході експериментів потрібно було дослідити, як впливають на інтенсивність та якість віброабразивної обробки параметри віброприводу, а саме: амплітуда коливань A робочого органа (вібробункера); частота коливань f вібробункера; тривалість обробки (віброабразивного шліфування) T.

Показником інтенсивності віброабразивної обробки прийнято величину зняття стружки металу Q, що визначалась як різниця між масою деталі до і після віброабразивного шліфування.

Якість віброабразивного шліфування визначається шорсткістю поверхні оброблених деталей згідно діючих стандартів. Тому параметром, що характеризує якість віброабразивної обробки є середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини Ra та клас шорсткості поверхні.

Також була поставлена задача з’ясувати основні закономірності віброабразивної обробки від дії ряду факторів, що залежать від типу та параметрів віброприводу або суттєво впливають на інтенсивність та якість обробки. До таких факторів слід віднести: вплив застійних зон; маса і габарити оброблюваних деталей; вплив електромагнітного поля на процес обробки деталей з магнітних матеріалів; співвідношення об’ємів; співвідношення робочого об’єму бункера та об’єму завантаженої суміші (деталі + абразив); зернистість абразиву.

Згідно рекомендацій, для побудови графіка закономірності достатньо 4 точки, оскільки вони дозволяють точно провести криву, коли немає перегинів. Тому було прийняте рішення

© Симонюк В.П., *к.т.н.*, Денисюк В.Ю., *к.т.н.*, Лапченко Ю.С., *к.т.н.,* Красовський В.В.

проводити дослідження при чотирьох рівнях значень факторів. Ці рівні встановлювались для значень амплітуди коливань *A* та частоти коливань *f* вібробункера. Дослідження впливу параметру *T* (часу обробки) має специфічний характер, оскільки не потребує попереднього встановлення певних значень, тому планування проводилось як для двофакторного експерименту.

При плануванні дослідження було вибрано класичний спосіб проведення експериментів, який полягає в тому, що встановлюється початкове значення (нижнє або верхнє) одного із факторів, яке потім послідовно (знизу вгору або навпаки) змінюється в межах інтервалу варіювання значень цього фактора при незмінності значень всіх інших факторів.

Інтервал варіювання для кожного із факторів вибирався з урахуванням напрацьованого досвіду подібних досліджень, що проводилися раніше. Були прийняті наступні верхні та нижні значення і кроки варіювання: нижнє значення амплітуди коливань вібробункера $A_н$=1 мм; верхнє значення амплітуди коливань вібробункера $A_В$=4 мм; крок варіювання амплітуди $I_А$=1 мм; нижнє значення частоти коливань вібробункера $f_н$=17 Гц; верхнє значення коливань вібробункера $f_В$=41 Гц; крок варіювання частоти I_f=8 Гц.

Експериментальні дослідження виконувались за наступними етапами.

Проводилась серія експериментів для з'ясування залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від амплітуди коливань вібробункера. Тривалість кожного експерименту становила 3 години. Марка абразиву 24 А (електрокорунд нормальний).

Було проведено один тривалий (6 годин) експеримент для визначення залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від тривалості обробки, а також дослідження інших закономірностей, про які йшлося вище.

Для встановлення залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від співвідношень об'ємів одночасно оброблюваних деталей та абразиву, робочого об'єму бункера та завантаженої суміші було проведено кілька додаткових експериментів із варіюванням вказаних параметрів. В якості дослідних зразків використовувались деталі типу тіл обертання, які мають зовнішню і внутрішню циліндричні, плоску і торцеву поверхні, що отримані різними способами (фрезеруванням, точінням) і мають різну початкову шорсткість. Це дало змогу з'ясувати ступінь оброблюваності кожного типу поверхні, оцінити ступінь заокруглення гострих кромок.

В експериментах для з'ясування залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від амплітуди та частоти коливань використовувались зразки із немагнітної сталі 12Х18Н10Т. В дослідженні впливу електромагнітного поля на процес віброабразивної обробки використовувалась в якості дослідних зразків деталі кільця карданних підшипників після штампування із сталі ШХ15.

Експерименти проводились в такій послідовності: промивка зразків теплим мильним розчином від бруду; просушування зразків; визначення початкової маси m_1, г та шорсткості Ra_1, мкм зразків до обробки; встановлення міток на зразки; проведення досліду; очистка та промивка зразків від залишків абразиву; просушування; вимірювання маси m_2, г та шорсткості Ra_2, мкм зразків після обробки; обчислення зняття стружки металу за формулою:

$$Q = m_1 - m_2. \quad (1)$$

На основі отриманих значень будувались графіки залежності зняття стружки металу *Q*, г та шорсткості *Ra*, мкм від амплітуди *A*, частоти *f*.

Залежність показників інтенсивності та якості віброобробки від тривалості обробки досліджувалась наступним чином. У вібробункер було завантажено 14 деталей із сталі 45, встановлено режими вібрування: амплітуду 1,5 мм, частоту 33 Гц, абразивний матеріал – подрібнені відходи абразивних кругів зернистістю 63. Під час обробки через певні проміжки часу із бункера вилучались 2 деталі і вимірювались їх параметри: зняття стружки металу *Q*, та шорсткість *Ra*, мкм по методиці, викладеній вище. Потім знаходилось середнє арифметичне кожного параметра. На основі отриманих значень будувались графіки залежності зняття стружки металу та шорсткості *Ra*, мкм від тривалості обробки (віброабразивного шліфування) *T*, хв.

В результаті експерименту були отримані наступні значення розмаху коливань контейнера в залежності від завантаженості його робочою сумішшю (таблиця 1).

З таблиці видно, що середнє арифметичне і середнє квадратичне значення розмаху коливань істотно не відрізняються, тобто можна зробити висновок про малість випадкової

© Симонюк В.П., *к.т.н.*, Денисюк В.Ю., *к.т.н.*, Лапченко Ю.С., *к.т.н.,* Красовський В.В.

похибки вимірювань. При теоретичному опрацюванні в подальших викладках всюди береться середнє арифметичне значення розмаху коливань.

Таблиця 1

Результати експериментальних вимірювань розмаху коливань контейнера, мм

Рівень завантаження		0 кг			1,5 кг			3 кг		
№ повторності		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Номер електро-магніту	1	2,0	1,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
	2	2,5	1,5	2,0	1,5	1,5	2,0	1,0	1,5	1,0
	3	2,5	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	4	2,5	2,5	2,5	2,0	1,5	2,0	2	1,5	1,5
Середнє арифметичне		2,4	2,0	2,1	1,6	1,4	1,6	1,2	1,2	1,1
Середнє квадратичне		2,4	2,0	2,1	1,6	1,4	1,7	1,3	1,3	1,1

На основі таблиці 1 складено таблицю для математичної обробки результатів експерименту (таблиця 2).

Таблиця 2

Результати експерименту

Рівень завантаження, кг	Розмах коливань по повторностях, мм			Середнє арифметичне, мм	Дисперсія, мм^2
	I	II	III		
0	2,4	2,0	2,1	2,17	0,04335
1,5	1,6	1,4	1,6	1,53	0,01335
3	1,2	1,2	1,1	1,17	0,00335

За цими даними обчислюється критерій Кохрена: G=0,722. Табличне значення критерію Кохрена $G_т$=0,977. Оскільки значення критерію Кохрена, пораховане за результатами експерименту, менше, ніж табличне, то експериментальні дані можна вважати достовірними, а сам експеримент – відтворюваним.

За експериментальними даними проекстрапольовано по трьох точках залежність розмаху коливань контейнера від його завантаженості робочою сумішшю:

$$R = b_0 + b_1 m + b_2 m^2 , \quad (2)$$

де R – розмах коливань контейнера,
m – маса завантаження контейнера,
b_0, b_1, b_2 – коефіцієнти екстраполяції.

Методом послідовної підстановки в рівняння (2) даних експерименту в кожній з трьох точок знайдено коефіцієнти екстраполяції (з точністю до двох значачих цифр). Після цього рівняння (2) прийняло вигляд:

$$R = 2{,}17 - 0{,}52m + 0{,}06m^2 . \quad (3)$$

Адекватність цього рівняння перевірена за критерієм Фішера. Порахована для рівняння (3) дисперсія адекватності складає S^2_{ao}=1,417*10^{-4}. Відповідно критерій Фішера F=7,077*10^{-3}. Табличне значення критерію Фішера для цього випадку – F=5,987. Оскільки значення критерію Фішера, пораховане для рівняння (3) менше, ніж табличне значення для даного випадку, опис залежності розмаху коливань контейнера від його завантаження рівнянням (3) можна вважати адекватним.

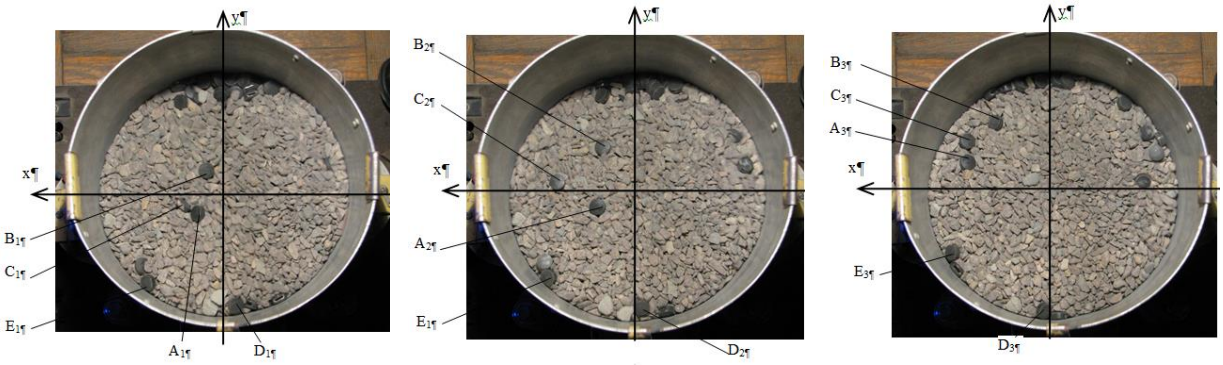
Циркуляційний вихровий рух робочого середовища значною мірою забезпечує ефективність віброабразивної обробки деталей. Згідно із напрямками і задачами досліджень проведені експериментальні виміри параметрів циркуляційного вихрового руху. Вимірювання здійснені при різних законах керування електромагнітними приводами. Експериментальні виміри здійснено безпосередньо у вібробункері. При вимірюванні застосований оптичний метод із покадровим реєструванням положення елементів робочого середовища. Здійснена покадрова зйомка поверхні робочого середовища у вібробункері. Частота кадрів становила 1 с. Спостереження послідовні по кадрам положення елементів робочого середовища. Для

© Симонюк В.П., *к.т.н.*, Денисюк В.Ю., *к.т.н.*, Лапченко Ю.С., *к.т.н.,* Красовський В.В.

спрощення вимірів у робоче середовище додана частина спеціальних елементів (маркерів), які по своїм параметрам мало відрізняються від елементів робочого середовища. Обробка фото сусідніх кадрів послужила основою для встановлення координат набору окремих індивідуальних елементів робочого середовища. Координати елемента робочого середовища та їх зміна по окремим кадрам визначаються в декартовій прямокутній, полярній в криволінійній або спеціальній системах координат. Приймемо декартову прямокутну систему координат *XOY* з центром в центральній частині вібробункера (рис. 1).

Для кількох сусідніх кадрів визначимо координати окремої гранули абразиву або маркера. Встановимо послідовні положення окремих гранул на поверхні робочого середовища. Формується масив векторів положення окремих індивідуальних елементів у вигляді набору векторів:

$$\begin{bmatrix} x_{A1} \\ y_{A1} \end{bmatrix}, .. \begin{bmatrix} x_{A2} \\ y_{A1} \end{bmatrix}, .. \begin{bmatrix} x_{An} \\ y_{An} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_{B1} \\ y_{B1} \end{bmatrix}, .. \begin{bmatrix} x_{B2} \\ y_{B1} \end{bmatrix}, .. \begin{bmatrix} x_{Br} \\ y_{Br} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_{C1} \\ y_{C1} \end{bmatrix}, .. \begin{bmatrix} x_{C2} \\ y_{C1} \end{bmatrix}, .. \begin{bmatrix} x_{Cq} \\ y_{Cq} \end{bmatrix}.$$



а) б) в)

Рис. 1. Схема визначення положення деталі по окремим кадрам зйомки при використанні декартової прямокутної системи координат

Вектори визначають положення елемента робочого середовища на поверхні у вигляді точок A1, A2, .. An; B1, B2, .. Br; C1, C2, .. Cq.

Число точок вибирається достатньо великим для того, щоб описати рух на всій поверхні робочого середовища. Число векторів залежить від того, як довго знаходиться елемент на поверхні робочого середовища. Масив вибраних точок описує траєкторію частинок на всій поверхні робочого середовища. Траєкторія має вигляд ламаних ліній (рис. 2).

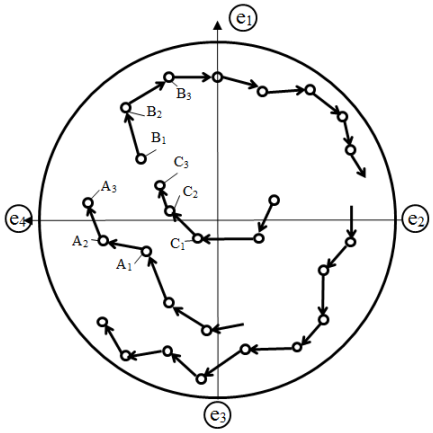


Рис. 2. Типові експериментально визначені траєкторії переміщення гранул на поверхні робочого середовища

Із збільшенням зернистості абразивного середовища, тобто розмірів гранул абразивної крихти, зняття металу зростає внаслідок збільшення маси зерен і збільшення глибини їх проникнення в метал, що викликає більш інтенсивну оброблюваність поверхні.

Висновки. В результаті досліджень встановлено, що ударно-імпульсні навантаження на вібробункер приводять до виникнення повільного циркуляційного руху робочого середовища. Даний рух інтенсифікується при несиметричному ударному навантаженні. Циркуляційний рух

має вигляд кільцевого або дугоподібного вихрового кільця, яке охоплює весь об'єм робочого середовища. Для визначення характеру вихрового руху допустимим є застосування закону зміни кількості руху в інтегральній формі для виділеного контрольного об'єму робочого середовища. Середня швидкість циркуляційного руху залежить від інтенсивності удару, швидкості вібробункера до удару та маси робочого середовища. Кутова швидкість вихрового руху пропорційна середній швидкості циркуляційного руху.

Інформаційні джерела

1. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для вузов / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 410 с.

2. Струтинський В.Б. Вдосконалення обладнання та процесу ударно-імпульсної обробки деталей у вібробункері: монографія / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк – Луцьк: СПД Гадяк Жанна Володимирівна друкарня "Волиньполіграф»™, 2016. – 139 с.

3. Струтинський В.Б. Дослідження закономірностей повільного циркуляційного вихрового руху робочого середовища у вібробункері / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк / "Перспективні технології та прилади". Збірник статей. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 176–185.

4. V. Symonyuk Experimental study of circulating vortex movement working environment in vibrobunker / V. Symonyuk, V. Denysiuk, Y. Lapchenko / Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Volume 12, September 2017, Pages 41-54, DOI 10.2412/mmse.58.82.178 provided by.

Симонюк В.П., Денисюк В.Ю., Лапченко Ю.С., Красовский В.В.
Луцкий национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЖИМОВ ВИБРОВАНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований зависимостей режимов вибрирования на движение рабочей среды при вибрационной обработке деталей, проверено воспроизводимость эксперимента и достоверность полученных результатов. Установлено, что результаты математического моделирования в допустимых пределах совпадают с результатами эксперимента. Осуществлен анализ технологических возможностей виброобработки в широком диапазоне частоты и размаха колебаний. Наглядно представлены причины проблематичности выбора оптимальных режимов виброобработки и возможные направления их преодоления. Смоделировано различные режимы работы вибрационного станка. Анализ результатов позволил выявить принципы оптимального подбора режимов виброобработки. Установлено способ достижения режима работы вибрационного станка с максимально эффективным использованием механической энергии колебаний.

Ключевые слова: *вибрационная абразивная обработка, вибробункер, циркуляционное движение, электромагнит, абразивный материал, эксперимент.*

V. Symonyuk, V. Denysiuk, Y. Lapchenko, V. Krasovskyi
Lutsk National Technical University

RESEARCH THE DEPENDENCES OF VIBRATION MODES ON THE MOVEMENT OF THE WORKING ENVIRONMENT AT VIBRATION PROCESSING

In the article the results of experimental studies the dependencies of vibration modes on the motion of the working environment during the vibration processing of details are considered, the reproducibility of the experiment and the reliability of the results have been checked. It is established that the results of mathematical modeling within the permissible limits coincide with the experimental results. The analysis the technological possibilities of vibration processing in a wide range of frequency and magnitude of oscillations are carried out. The reasons for the problem of selecting the optimal modes of vibration processing and possible ways of overcoming them are presented in detail. Different operating modes of the vibrating machine are simulated. The analysis of the results allowed

© Симонюк В.П., *к.т.н.*, Денисюк В.Ю., *к.т.н.*, Лапченко Ю.С., *к.т.н.,* Красовський В.В.

revealing the principles of optimal selection of vibration processing modes. The method of achieving the operating mode of a vibrating machine with the maximum effective use mechanical energy of oscillations is established.

Key words: *vibration abrasive processing, vibro-bunker, circulation movement, electromagnet, abrasive material, experiment.*

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018.

© Симонюк В.П., *к.т.н.*, Денисюк В.Ю., *к.т.н.*, Лапченко Ю.С., *к.т.н.,* Красовський В.В.

УДК 621.375.826; 656.052.1

Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.
Харківський національний університет радіоелектроніки

УДОСКОНАЛЕНА РАДІОЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА ДЛЯ ТРЕНУВАННЬ БІАТЛОНІСТІВ

Якість підготовки спортсмена залежить від багатьох показників. Для досягнення високих результатів необхідно використовувати сучасну технічно оснащену базу для тренувань. Біатлон є одним видів спорту, переможець в якому визначається сукупністю двох показників: швидкості проходження дистанції і результативністю стрільби. Для кожного спортсмена існує максимально допустима частота пульсу, при якій результативність найвища. Частота пульсу залежить також від психофізіологічного стану спортсмена, тому в процесі тренувань необхідні досить тривалі дослідження можливостей кожного спортсмена для розробки оптимальної стратегії поведінки в процесі змагань. Отримання об'єктивної картини можливо тільки із застосуванням сучасних технічних засобів.

Ключові слова: *лазер, передавач, приймач, тренажер, мішень, біофізичні параметри, фізіологічні параметри.*

Оскільки в Україні вкрай актуальні проблеми реалізації проектів із пріоритетних напрямів соціально-економічного та культурного розвитку, тобто спрямованих на оздоровлення, розвиток молоді, а також підтримку олімпійського руху. В Харківському національному університеті радіоелектроніки під керівництвом професора кафедри МІРЕС Сідорова Г.І. розробляється проект радіоелектронного комплексу для високоефективної підготовки спортсменів-біатлоністів.

У зв'язку з цим, за пропозицією Федерації біатлону України було розроблено комплекс який включає в себе лазерні стрілецькі тренажери, комплекти датчиків для вимірювання біофізичних показників спортсменів під час бігу і під час стрільби, радіосистеми передачі результатів стрільб та біофізичних показників на центральний пункт контролю і управління, системи моніторингу стану спортсменів під час тренувань та змагань, радіосистеми передачі коригувальних команд від тренерів спортсменам.

Розроблений лазерний стрілецький тренажер на відміну від зарубіжних аналогів забезпечує захист спортсменів і глядачів від лазерного випромінювання, оскільки лазерний випромінювач активується тільки в разі наведення гвинтівки на мішень, а його ціна, враховуючи виробництво в Україні, буде нижче.

Програмно можуть бути враховані специфічні відмінності стрільб з лазерного і бойової зброї: затримка між пострілом і попаданням в мішень, зміщення кулі по вертикалі за рахунок сили тяжіння, знесення кулі горизонтальним вітром.

Використання лазерних імітаторів замість вогнепальної зброї відповідає поглядам на цю проблему Міжнародного союзу біатлоністів, оскільки це забезпечує безпеку під час тренувань і змагань і значну економію коштів за рахунок скорочення витрат на боєприпаси в 3-4 рази. Вартість одного патрона калібру 5,45 для спеціальних спортивних гвинтівок для біатлону близько 5 - 6 грн., А початківець біатлоніст повинен робити від п'яти до десяти тисяч пострілів в рік.

Реалізація проекту дає також значний соціальний ефект, з огляду на можливість впровадження дешевих лазерних тренажерів в дитячо-юнацьких спортивних школах і в стрілецьких секціях загальноосвітніх шкіл, що буде сприяти військово-патріотичному вихованню молоді.

В даний час тренажери є доступним і ефективним засобом підготовки фахівців різного рівня кваліфікації в багатьох областях науки і техніки [1].

Широкі можливості комп'ютерних технологій в поєднанні з істотно меншими фінансовими витратами в порівнянні з вартістю фізичних стендів роблять цей напрям дуже перспективним.

Широке поширення в тренажерах останнім часом набули технології мультимедіа, що значно розширило їх функціональні можливості [2,3]. При цьому забезпечується:

© Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.

- Більш глибока індивідуалізація навчання;
- Самостійне опрацювання матеріалу, що вивчається і ефективна реалізація сучасних методичних і дидактичних підходів;
- Задана повнота представлення матеріалу;
- Інтерактивна взаємодія учня з досліджуваним об'єктом;
- Вільний вибір напрямку вивчення за рахунок гнучких систем гіпертексту;
- Звуковий супровід досліджуваного матеріалу;
- Можливість моделювання складних і екстремальних ситуацій;
- Широке застосування сучасних засобів комп'ютерного дизайну та мультимедійних технологій;
- Мінімальні витрати на підготовку, що дозволяє реалізувати часті і ефективні тренування;
- Можливість навчання великої кількості людей одночасно.

Дуже хороші результати показують мультимедійні тренажери в сфері навчання керування транспортними засобами: наземними, повітряними, морськими [1-4]. Тут є можливість імітації систем будь-якої складності, включаючи автомобілі, броньовану техніку і навіть космічні апарати [1-3].

Мультимедійні системи зайняли також гідне місце при навчанні персоналу для управління різними виробничими процесами, симуляція яких, істотно полегшує це завдання. Особливо важливо, що за допомогою мультимедійних тренажерів з'являється можливість навчити працівників діям під час екстремальних ситуацій. Набутий на тренажерах досвід може врятувати багато людських життя.

Останнім часом особливу увагу подібним системам приділяють також силові структури, застосовуючи їх для підготовки різних спеціалізованих загонів. Затребувані мультимедійні стрілецькі тренажери і в області спорту, при підготовці та тренуванні спортсменів різного профілю: біатлоністів, п'ятиборців, стрільців.

Практика дій в надзвичайних ситуаціях показує, що співробітники силових структур повинні точно оцінювати швидко змінюється обстановку, та приймати рішення на застосування зброї в умовах дефіциту часу. Засоби розвиненою механізації, що застосовуються в даний час в бойових тирах, вже не відповідають вимогам гнучкості та ефективності стрілецької підготовки. З метою придбання навичок стрільби в умовах, наближених до бойових, в ряді країн (США, Німеччина, Україна, Росія) були розроблені мультимедійні стрілецькі тренажери, в яких використані найсильніші сторони ігрового і комп'ютерного кіно, мультимедійних комп'ютерних ігор, враховані досвід і правила стрільби в тирах з вогнепальної зброї, побажання співробітників поліції, служб безпеки та охорони, спецпідрозділів по боротьбі з тероризмом [5,6].

Найбільш прийнятними за ціною є тренажери українського і російського виробництва: «Інгул» (ТОВ «Герц» м. Кіровоград), Айсберг С-300 (ICEBERG м.Москва), «Витязь» (ТОВ «Витязь» м. Москва).

Основними блоками цих мультимедійних тренажерів є персональний комп'ютер, відеопроектор та проекційний екран. У комп'ютері формуються зображення мішеней або ігрові відеофільми, в яких обігрується різні ситуації захоплення терористами будівель, споруд, автомобілів, літаків і т.д., ці відеозображення за допомогою відеопроектора відображаються на проекційному екрані, який представляє собою забарвлену в білий колір сталеву плиту необхідного розміру (до 4 ... 5 метрів) товщиною до 10 мм, по периметру якої закріплені високочутливі акустичні датчики, підключені проводами до спеціального пристрою обробки акустичних сигналів, вихід якого підключений до комп'ютера. В результаті удару кулі в металевий лист в ньому поширюються акустичні хвилі, що перетворюються датчиками в електричні сигнали. Останні відповідно до обраного алгоритму обробляються в вирішальному блоці пристрої обробки і координати точки попадання кулі передаються в комп'ютер, накладаються на видеокадр, в результаті чого відображається або поразка мішені, або терориста, або промах [5].

Недоліки таких тренажерів наступні:

1) наявність рикошету, що не дозволяє тренуватися поблизу екрану, коли стрілок може відчувати себе учасником подій, маючи в полі зору тільки зображення на екрані;

© Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.

2) неможливість виготовлення екрана з одного цільного листа, так як в цьому випадку транспортування його в приміщення тиру можлива тільки при будівництві через стелю;
3) при монтажі екрану великого розміру в приміщенні тиру шляхом зварювання не забезпечується однорідність матеріалу в межах всього екрану через наявність зварювальних швів, що призводить до зміни часу поширення акустичних хвиль в різних напрямках щодо розрахункових величин і, отже, до погрішностей вимірювання;
4) існування залишкових акустичних коливань в металевому екрані після удару кулі ускладнює забезпечення одночасної тренування кількох стрільців.

У сучасному спорті для досягнення високих результатів необхідно мати високоефективний, технічно оснащену базу для тренувань. Біатлон є одним з небагатьох видів спорту, переможець в якому визначається сукупністю двох показників: швидкості проходження дистанції і результативністю стрільби. Швидкість і інтенсивність бігу впливають на частоту пульсу, яка в свою чергу визначає влучність стрільби, з почастішанням пульсу кількість уражених мішеней за заданий правилами змагань час змінюється. Для кожного спортсмена існує максимально допустима частота пульсу, при якій результативність найвища. Частота пульсу залежить також від психофізіологічного стану спортсмена, тому в процесі тренувань необхідні досить тривалі дослідження можливостей кожного спортсмена для розробки оптимальної стратегії поведінки в процесі змагань.

Отримання об'єктивної картини можливо тільки із застосуванням технічних засобів. З цією метою на кафедрі медіаінжененеріі і радіоелектронних систем групою викладачів і студентів було розроблено та запатентовано радіоелектронний пристрій для тренування біатлоністів з урахуванням наявного десятирічного досвіду розробки стрілецьких тренажерів, в яких, однак, не було передбачено вимір фізіологічних показників під час тренувань. Ці тренажери успішно використовувалися в процесі підготовки олімпійських чоловічих і жіночих збірних з біатлону в 2011-2013 роках [7]. Ми пропонуємо удосконалену радіоелектронну систему для тренувань біатлоністів.

В ході роботи виготовлена діюча модель мішені. Її розміри зменшені в 5 разів, що дозволяє використовувати її для стрільби з відстані 10 м. Мішень призначена як для стрільби стоячи, так і для стрільби лежачи. Для стрільби лежачи ставиться спеціальна вставка - якийсь екран з фіксованими отворами. Цей малий тренажер забезпечує індикацію уражених мішеней і може використовуватися в поєднанні з даної гвинтівкою для навчання стрільбі самих юних спортсменів [8,9].

Розглянемо структурну схему радіоелектронної системи для тренування біатлоністів (рис. 1).

© Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.

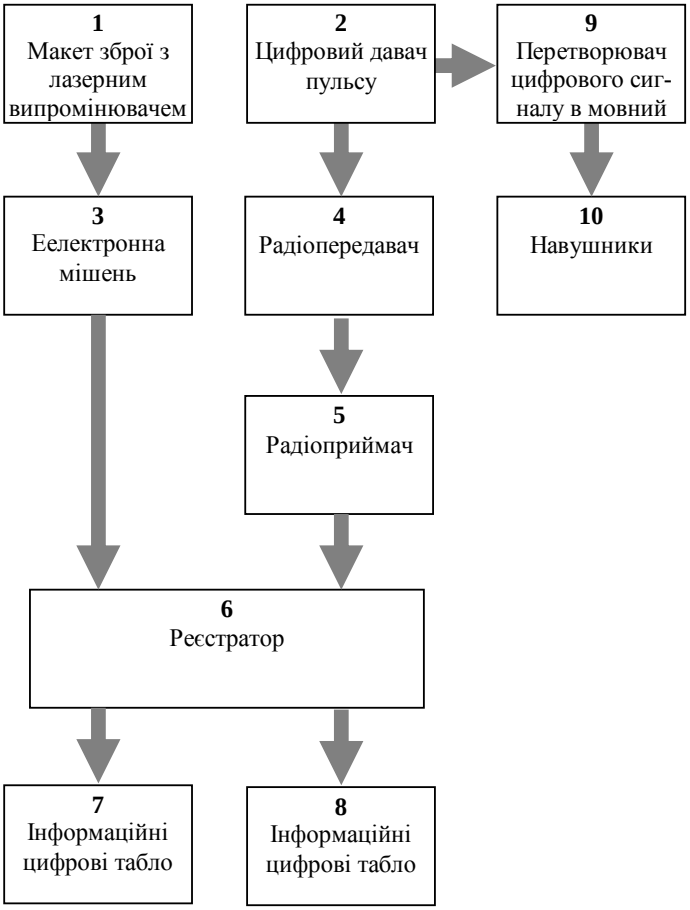


Рис. 1. Структурна схема радіоелектронної системи для тренувань біатлоністів

Ця система містить: макет зброї з лазерним випромінювачем – 1, цифровий давач пульсу-2, електронна мішень - 3, радіопередавач – 4, радіоприймач – 5, реєстратор – 6, інформаційні цифрові табло – 7,8, перетворювач цифрового сигналу в мовний - 9, навушники – 10

Мішень тренажера складається з п'яти модулів приймачів, підключених до мікроконтролеру STM32L053C8T6, який передає дані на Wi-fi модуль esp8266, батареї живлення, світлодіодів для індикації потрапляння, системи фіксації промаху, і системи захисту від попадання лазерного променя в очі.

Коли спортсмен зробив п'ять пострілів, мішень підключається до мережі Wi-fi і передає дані про швидкість стрільби, кількості влучень і промахів.

Світло лазера, пройшовши через світлофільтр, надходить на фотодіод BPW21R, а потім на мікросхему TDA3048, на основі якої виконано весь приймальний тракт. Логічний вихід даної мікросхеми підключений до мікроконтролеру STM32L053C8T6.

Одночасно з випромінюванням лазерного імпульсу з насадки гвинтівки випускається ненаправленої модульований інфрачервоний сигнал, що приймається окремим фотоприймачем в коліматорі мішені. Цей сигнал свідчить про те, що було зроблено постріл. Якщо разом з ним прийшов і сигнал з фотоприймача мішені то реєструється попадання. Якщо тільки сигнал пострілу, то реєструється промах.

Стрільба по мішені виконується в одному з двох режимів. Перший режим - тренування. Активується безперервний лазерний промінь, який падаючи на поле мішені, виявляється відеореєстратором. Другий режим - змагання. Активується імпульсний лазерний промінь, який при натисканні на спусковий гачок формує пляма попадання. При точному попаданні в темний круг, спрацьовує електромеханічна система прикриття мішені білим ковпаком. Результати учасників обох режимів змагання зберігаються в базі даних. Зовнішній вигляд отриманих даних тренером наведено на рис. 2

© Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.

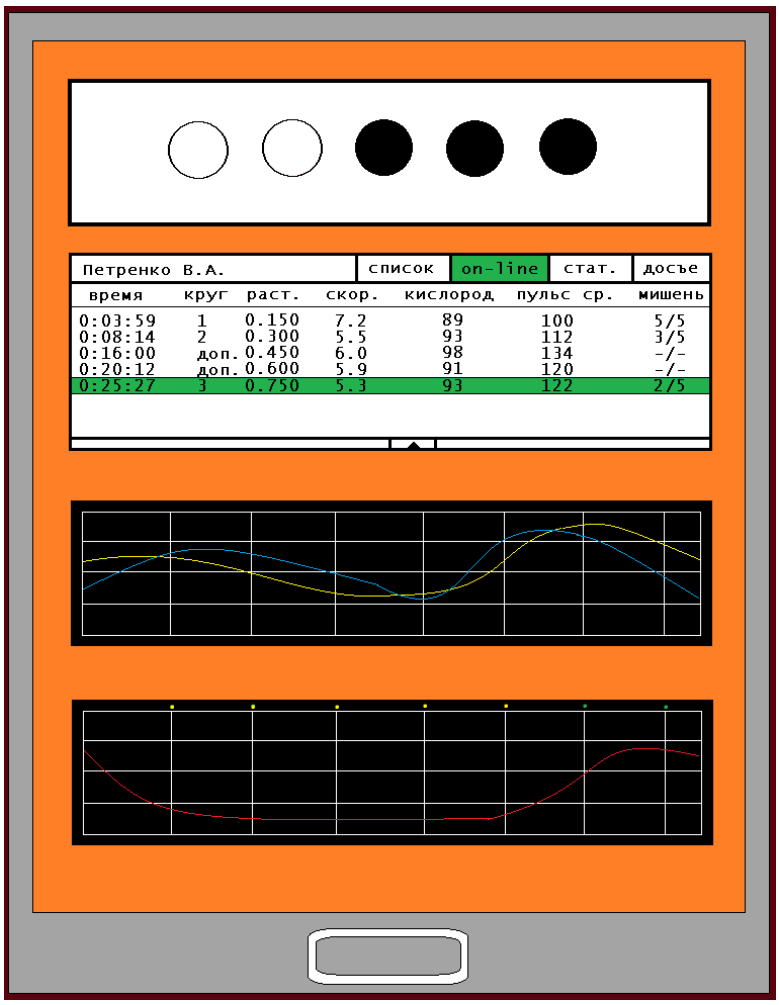


Рис. 2. Зовнішній вигляд даних отриманих тренером

Канал передачі даних являє собою сукупність бездротових точок доступу, що працюють за стандартом IEEE 802.11 - WiFi.

Структурна схема каналу передачі даних наведена на рис 3.

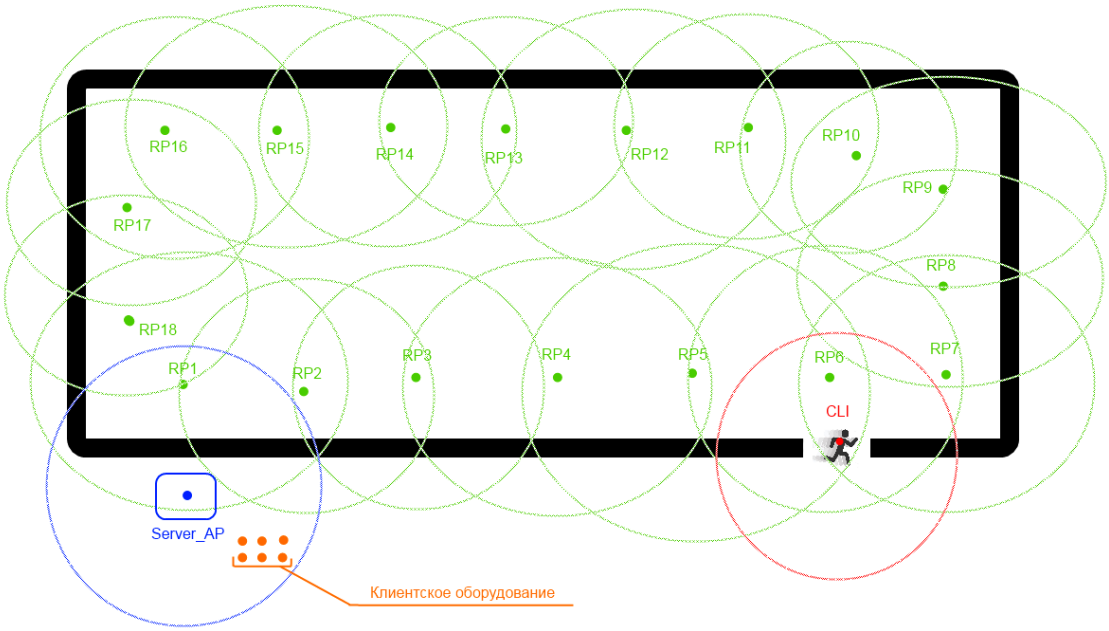


Рис. 3. Схема каналу передачі даних, уздовж траси бігу спортсмена

© Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.

Server_AP - бездротова точка доступу поєднана з серверним обладнанням. Виступає в якості білінгової системи, даючи доступ тільки певним клієнтам, для запису даних на сервер (обладнання спортсмена) або читання інформації з сервера (клієнтське обладнання). Являє собою роутер а також портативний комп'ютер з встановленими додатками RADIUS Server, і додатком - сервером для запису інформації отриманої з датчиків.

RP1 ... RP18 - бездротові точки доступу розташовані уздовж траси бігу спортсмена - репітери, що передають інформацію від спортсмена на Server_AP, які є сполучною ланкою для датчиків спортсмена, а також програмою - сервером записуючої показники датчиків. Кількість репитеров масштабоване, в залежності від довжини траси, яку пробігає спортсменом.

CLI – спортсмен.

Клієнтське обладнання - різні клієнти, що мають на своєму борту обладнання для зв'язку через бездротове підключення, і яким дозволений доступ для читання інформації датчиків спортсмена, з сервера.

В якості альтернативи, як передавач і приймач може бути використана пара мобільних телефонів GSM стандарту.

Таким чином, завдяки застосуванню цифрового датчика пульсу та каналу мобільного зв'язку завдання відпрацювання оптимальної швидкості бігу досягається максимальна результативність стрільби.

Попередні експерименти, які були проведені з використанням наявних на кафедрі "Фізвиховання та спорту" Харківського національного університету радіоелектроніки макета біатлонної рушниці з лазерним випромінювачем і п’ятиелементної мішені за участю групи студентів.

Частота пульсу і кількість уражених мішеней. Отримані результати дозволяють стверджувати про перспективність виготовлення представленого радіоелектронного пристрою і його використанні спочатку на кафедрі "Фізвиховання та спорту" ХНУРЕ, а потім, в разі отримання позитивних результатів, і в інших спортивних установах.

Інформаційні джерела

1. Тренажеры и мультимедийные тренажерные программы // URL: http://www.100rmsim.ru/product/138.html
2. Филатова Н.Н., Вавилова Н.И. Представление знаний в мультимедиа тренажерах // URL: http://ckto.narod.ru/stastr.htm
3. Мультимедийные обучающие системы // URL: http://tpl-it.wikispaces.com
4. Спосіб визначення координат точки влучення у відео мішень при навчанні стрільби та пристрій для його здійснення: Патент на винахід №95007, Україна, МПК F41G3/26/Зубков О.В., Коритцев І.ВА., Сідоров Г.І., Сідоров Я.Г., опубл. 25.06.2011, бюл. №12.
5. В.М. Карташов, И.В. Коритцев, Г.И. Сидоров, Э.К. Потримай Синтез алгоритмов обработки сигналов мультимедийного стрелкового комплекса // Радиотехника: всеукраинский межведомственный научно-технический сборник, выпуск 168., с.22-28.
6. В.М. Карташов, И.В. Коритцев, Г.И. Сидоров, А.П. Шамрай Моделирование динамической обстановки для мультимедийного стрелкового комплекса // Радиотехника: всеукраинский межведомственный научно-технический сборник, выпуск 168., с.73-77.
7. Радиоэлектронное устройство для тренировки биатлонистов, Сидоров Г.И., Колендовская М.М., Чобану П.В., Никулкин В.А., Левский Н.А., Селезнев И.С., Виноградова А.А., VI Міжнародний Радіоелектронний Форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку», Харків 2017, С.178-181
8. Патент на корисну модель №117009 від 19.04.2017 «Удосконалений лазерний стрілецький тренажер»
9. Патент України №120946, МПК А 61 В 5/02, F 41 J 5/00, публ. 27.11.2017, Бюл. № 22, 2017 «Радіоелектронний пристрій для тренування біатлоністів»

© Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.

Сидоров Г.И., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстых Е.Г., Коваленко О.К., Товстоплет О.С.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТРЕНИРОВКИ БИАТЛОНИСТОВ

Качество подготовки спортсмена зависит от многих показателей. Для достижения высоких результатов необходимо использовать современную технически оснащенную базу для тренировок. Биатлон является одним видам спорта, победитель в котором определяется совокупностью двух показателей: скорости прохождения дистанции и результативности стрельбы. Для каждого спортсмена существует максимально допустимая частота пульса, при которой результативность высока. Частота пульса зависит от психофизиологического состояния спортсмена, поэтому в процессе тренировок необходимы достаточно длительные исследования возможностей каждого спортсмена для разработки оптимальной стратегии поведения в процессе соревнований. Получение объективной картины возможно только с применением современных технических средств.

Ключевые слова: *лазер, передатчик, приемник, тренажер, мишень, биофизические параметры, физиологические параметры*.

Sidorov G., Ph.D.,. Prof., Kolendovskaya M., Ph.D., Tolstykh E., Kovalenko O., Tovstoplet O.
Kharkiv National University of Radioelectronics

EXPANDED RADIOELECTRONIC SYSTEM FOR BITALONIST TRAINING

The quality of the athlete's training depends on many indicators. To achieve high results, you need to use a modern, technically equipped training base. The biathlon is one type of sport, the winner of which is determined by a combination of two indicators: the speed of passing distance and the effectiveness of firing. For each athlete there is a maximum allowable pulse rate, in which the performance is highest. The pulse rate also depends on the psycho-physiological state of the athlete, so in the process of training, long enough research is needed on the capabilities of each athlete to develop an optimal behavior strategy in the process of the competition. Obtaining an objective picture is possible only with the use of modern technical means.

Keywords: *laser, transmitter, receiver, simulator, target, biophysical parameters, physiological parameters*.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018.

© Сідоров Г.І., к.т.н., доц., проф., Колендовська М.М., к.т.н., Толстих Є.Г., Коваленко О.К., Товстопльот О.С.

УДК 536.223

Тимчик Г. С., д.т.н., професор, Вислоух С. П., к.т.н., доцент, Матвієнко С. М., асистент
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

КОНТРОЛЬ СКЛАДУ РЕЧОВИН ЗА ДОПОМОГОЮ «МЕТОДУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ»

Досліджено визначення складу речовин шляхом контролю їх теплофізичних властивостей методом прямого підігріву термістора.

Для здійснення контролю складу наведених досліджуваних речовин обґрунтовано використання методу прямого підігріву термістора. Розглянуто причини виникнення похибки вимірювання запропонованим методом та визначені шляхи для її зменшення. Наведено результати експериментальних досліджень з контрольними матеріалами за допомогою розробленого приладу. Визначено напрямки підвищення точності та ефективності використання запропонованого методу при визначенні складу речовин. Встановлено, що в сумішах двох речовин зі зменшенням відношення значень теплопровідності цих речовин збільшується похибка вимірювання відсотка вмісту однієї речовини в іншій. Доведено можливість зменшення похибки вимірювання шляхом обробки накопичених даних при багаторазових спостереженнях. Розглянута можливість контролю вмісту неоднорідних речовин, а саме при випаданні осаду або розшаруванні досліджуваної суміші.

Вступ. Аналіз сучасних засобів неруйнівного контролю складу речовин експрес-методами в області приладобудування показує, що проблема підвищення оперативності і ефективності методів контролю їх складу є і залишається актуальною. Метод теплового неруйнівного контролю (зокрема «метод теплопровідності») застосовується для визначення складу газових сумішей (наприклад сумішей аргон — азот, водень — азот, гелій — азот, водень — аргон), в технологічних сумішах різного складу [1], метою розробки сучасних інноваційних охолоджуючих рідин (нанорідин) для систем охолодження високофорсованих теплоенергетичних пристроїв [2], експрес-діагностики поточного стану мастила двигуна внутрішнього згоряння [3], експрес-контролю летючих домішок в оліях енергетичного обладнання [4], при визначенні теплофізичних характеристик біотехнологічного сировини і сипучих матеріалів [5], при виборі раціональних технологічних параметрів переробки і концентрування крові великої рогатої худоби в харчовій промисловості [6], неруйнівного контролю вмісту зв'язуючої рідини в полімерно-композитних матеріалах на стадії їх виготовлення [7], при аналізі виробництва алкогольних продуктів [8], для виявлення дефектів в твердих матеріалах [9] тощо.

Одним експрес-методів визначення складу речовин є «метод теплопровідності», тобто визначення складу сумішей за значенням коефіцієнта теплопровідності досліджуваної суміші. При визначенні теплофізичних властивостей досліджуваних сумішей завдяки невеликим розмірам датчиків особливо ефективним в цьому випадку є застосування методу прямого підігріву термістора.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження можливості і оцінки ефективності застосування методу прямого підігріву термістора при вимірюванні коефіцієнта теплопровідності досліджуваних сумішей для здійснення контролю складу цих сумішей та оцінка точності вимірювання відсоткового вмісту речовин в суміші цим методом.

Визначення складу речовин «методом теплопровідності». Для визначення величини розподілу газових сумішей та розчинів часто використовують достатньо простий та найбільш розповсюджений метод аналізу складу суміші, заснований на залежності її коефіцієнта теплопровідності від концентрації компонентів суміші («метод теплопровідності») [1, 10].

В загальному випадку коефіцієнт теплопровідності суміші газів та рідин не є лінійною функцією її складу [10].

Точність, з якою може бути визначена зміна складу суміші, залежить від різниці коефіцієнтів теплопровідності компонентів, а тому, як правило, «метод теплопровідності» застосовується для аналізу складу сумішей, що складаються з компонентів, які значно відрізняються за теплопровідністю.

© Тимчик Г. С., д.т.н., професор, Вислоух С. П., к.т.н., доцент, Матвієнко С. М., асистент

Матеріал чутливого елемента повинен мати значний температурний коефіцієнт опору та бути хімічно стійким (мати антикорозійне покриття). Ці вимоги задовольняють такі чутливі елементи, як платиновий провід та термістор.

Для контролю складу речовин шляхом вимірювання коефіцієнта теплопровідності вибрано метод прямого підігріву термістора, який має ряд переваг перед іншими існуючими методами вимірювання теплофізичних властивостей (ТФВ) [11]. Перш за все – це форма та малі розміри термістора, що значно зменшує та спрощує конструкцію вимірювального зонду і дозволяє вимірювати ТФХ досліджуваних матеріалів в об`ємі до 125 мм^3. Сутність методу прямого підігріву термістора полягає в використанні явища його саморозігріву за рахунок протікання через нього електричного струму. Значення температури саморозігріву термістора буде залежати від навколишнього середовища, в якому він знаходиться, тобто від теплофізичних характеристик досліджуваного зразка, з яким він контактує.

Для вимірювання теплопровідності досліджуваних сумішей використовувався багатоканальний прилад для вимірювання теплопровідності рідин, що має шістдесят термісторних зондів. Детальний опис цього приладу та методика визначення коефіцієнта теплопровідності приведені в [12, 13]. Вимірювання теплопровідності досліджуваних сумішей здійснювалося при температурі +40±0,5^{o}С.

Теплопровідність досліджуваних сумішей визначалася шляхом вимірювання температури розігріву термістора, зануреного в суміш. Розрахунок коефіцієнта теплопровідності здійснювався за формулою [12]:

$$\lambda_{д.р.} = \frac{P_T}{4\pi r(\Delta T_в - \Delta T_0) * \frac{1}{K_o}}, \qquad (1)$$

де $\lambda_{д.р.}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної речовини, Вт/(м·К); P_T – потужність термістора, Вт; r – радіус термістора, м; $\Delta T_в$ – температура розігріву термістора, що виміряна дослідною установкою, ^{o}С; ΔT_0 – температура саморозігріву термістора, що викликана наявністю оболонки та визначена за результатами тестів з використанням еталонних речовин,^{o}С, K_o – коефіцієнт пропорційності, який визначається за результатами тестів з використанням еталонних речовин. Він характеризує чутливість термісторного зонду до значення теплопровідності досліджуваної речовин, яка його оточує. Детально, алгоритм розрахунку коефіцієнта теплопровідності досліджуваної речовин за температурою розігріву термістора та методика визначення поправок в розрахункові формули наведено в роботах авторів [12, 14].

Для визначення відносного складу компонентів в сумішах (розчинах), спочатку проводиться процедура калібрування приладу за допомогою сумішей, які мають відомий склад. В даному випадку в якості еталонних (сумішей з відомим складом компонентів) використовувалися: дистильована вода, 25% розчин етилового спирту в дистильованій воді, 60% розчин гліцерину в очищеній воді, 80% розчин гліцерину в очищеній воді, 85% розчин гліцерину в очищеній воді (розчин нашкірний 85%, медичний), 70% розчин етилового спирту в воді («Септол»), 75% розчин етилового спирту в воді, етиловий спирт медичний 96-Екстра (96% розчин етилового спирту в воді). Калібрування приладу при визначенні відносного складу компонентів в розчинах здійснювалося по довідниковим даним значень теплопровідності цих розчинів [15, 16].

В якості досліджуваних розчинів використовувалися розчини цукру, гліцерину та етилового спирту у дистильованій воді. Залежність теплопровідності розчинів від об’ємного вмісту гліцерину (1), етилового спирту (2) та цукру (3) в їх водяних розчинах (побудована за даним довідників [15, 16] – дрібні позначки, а даними тестових вимірювань – збільшені позначки) приведена на рис. 1. Виміряні значення на графіках зображено збільшеними ромбами (розчин гліцерину), трикутниками (розчин цукру) та колами (розчин етилового спирту).

© Тимчик Г. С., д.т.н., професор, Вислоух С. П., к.т.н., доцент, Матвієнко С. М., асистент

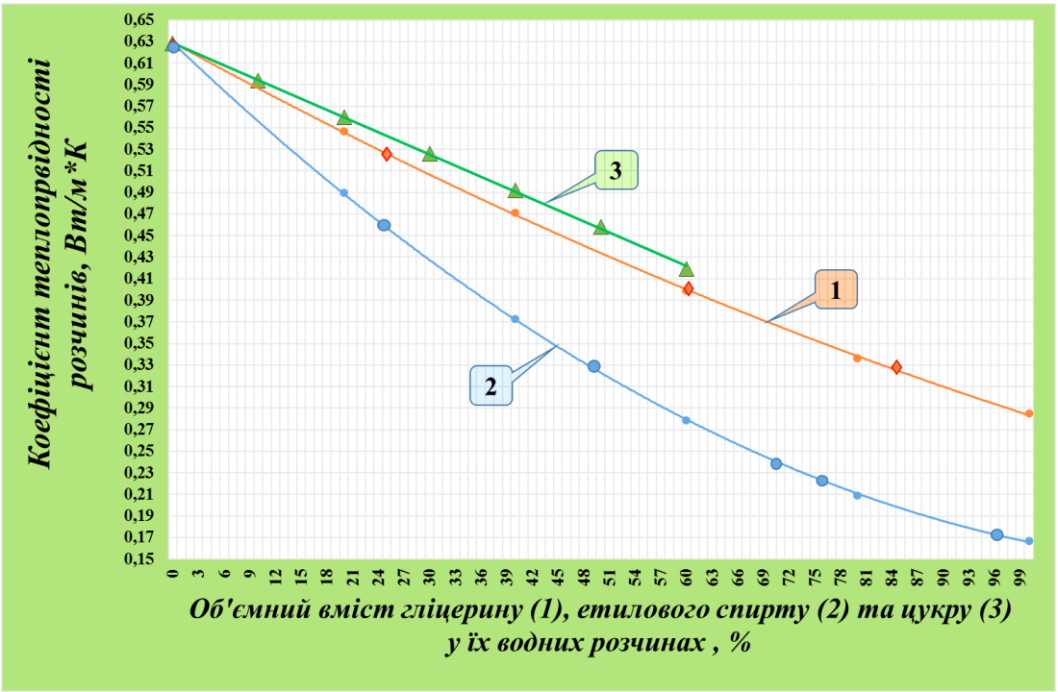


Рис. 1. Залежність теплопровідності розчинів від об'ємного вмісту гліцерину (1), етилового спирту (2) та цукру в їх водяних розчинах (побудована за даним довідників [15, 16] та даними тестових вимірювань)

Для обчислення похибки визначення об'ємного вмісту гліцерину (крива 1), етилового спирту (крива 2) та цукру(крива 2) в їх водяних розчинах необхідно по даним довідників побудувати залежність об'ємного вмісту гліцерину (рис. 2), етилового спирту (рис. 3) та цукру (рис. 4) від коефіцієнта теплопровідності розчину та визначити цю функцію залежності. Це необхідно для розрахунку абсолютної похибки, яка викликана похибкою аргументу Δλ, можна оцінити за величиною:

$$\Delta y = \left| f^{`}(\lambda) \right| \cdot \Delta\lambda , \qquad (2)$$

y = f(λ) – функція залежності об'ємного вмісту від теплопровідності розчину;

Δλ – похибка вимірювання приладом коефіцієнта теплопровідності;

Δy - похибка визначення об'ємного вмісту компонентів розчину.

Визначення об'ємного вмісту етилового спирту в його водяному розчині по теплопровідності розчину (побудована за даними довідників [15, 16]) і функція залежності наведені на рис. 2. Визначення об'ємного вмісту гліцерину в його водяному розчині по теплопровідності розчину (побудована за даними довідників [15, 16]) та функція залежності наведені на рис. 3. Визначення об'ємного вмісту цукру в його водяному розчині по теплопровідності розчину (побудована за даними довідників [15, 16]) та функція залежності наведені на рис. 4. Дані значень теплопровідності взяті при температурі +40°С, оскільки вимірювання проводилися при температурі +40±0,5 °С.

Визначені за довідковими даними функції залежності об'ємного вмісту гліцерину, етилового спирту та цукру в їх водяних розчинах та їх похідні наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Визначені за довідковими даними функції залежності об'ємного вмісту гліцерину, етилового спирту та цукру в їх водяних розчинах та їх похідні [15, 16].

Суміш	Функція	Похідна
Розчин етилового спирту у воді	$Y = -666{,}67\lambda^3 + 1028{,}6\lambda^2 - 676{,}19\lambda + 184{,}4$	$Y' = -2000{,}01\lambda^2 + 2057{,}2\lambda - 676{,}19$
Розчин гліцерину у воді	$Y = -500\lambda^3 + 900\lambda^2 - 785\lambda + 263$	$Y' = -1500\lambda^2 + 1800\lambda - 785$
Розчин цукру у воді	$Y = 924{,}74\lambda^3 - 1525{,}2\lambda^2 + 539{,}39\lambda + 33{,}821$	$Y' = 2774{,}22\lambda^2 - 3050{,}4\lambda^2 + 539{,}39$

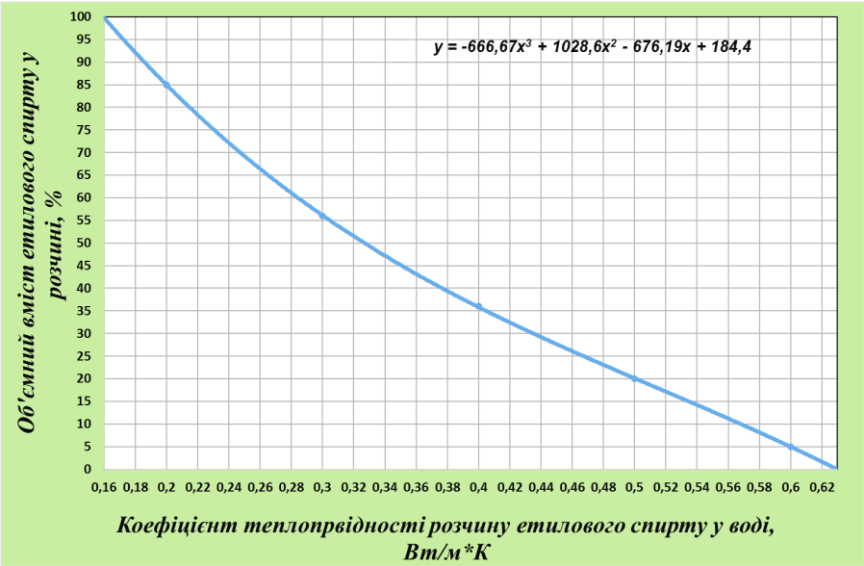


Рис. 2. Визначення об'ємного вмісту етилового спирту в його водному розчині за величиною теплопровідності розчину (побудована за даними довідників [15, 16])

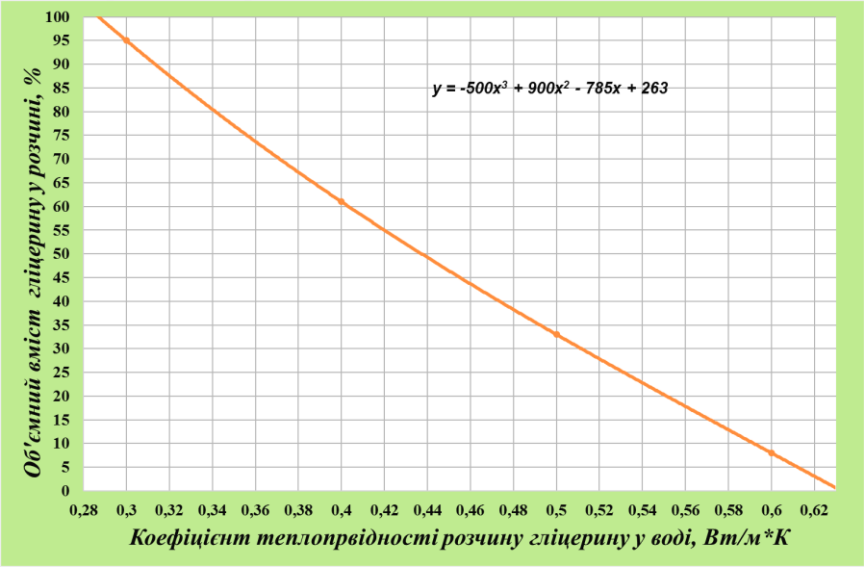


Рис. 3. Визначення об'ємного вмісту гліцерину в його водному розчині за величиною теплопровідності розчину (побудована за даними довідників [15, 16])

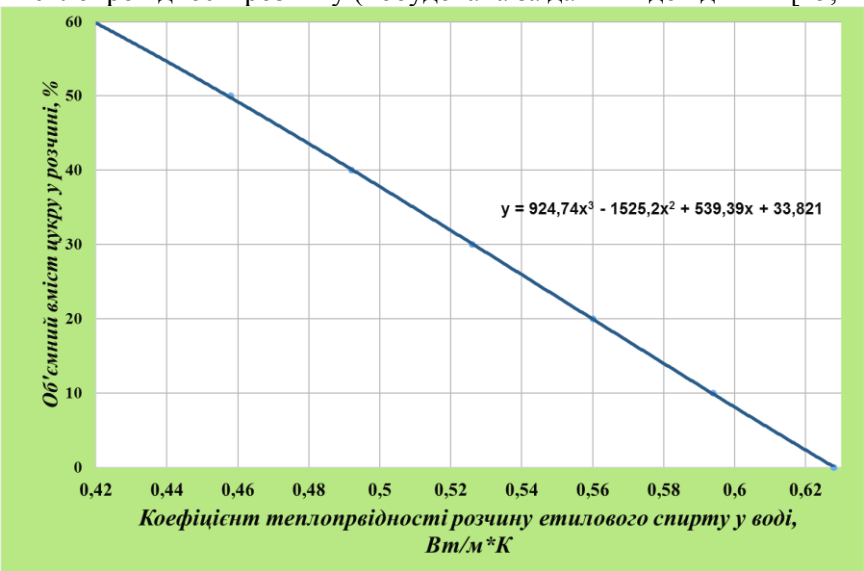


Рис. 4. Визначення об'ємного вмісту цукру в його водному розчині за величиною теплопровідності розчину (побудована за даними довідників [15, 16])

Абсолютна похибка визначення об'ємного вмісту гліцерину (крива 1), етилового спирту (крива 2) та цукру (крива 3) в їх водяних розчинах, розрахована за даними довідників при вимірюванні теплопровідності, наведена на рис. 5.

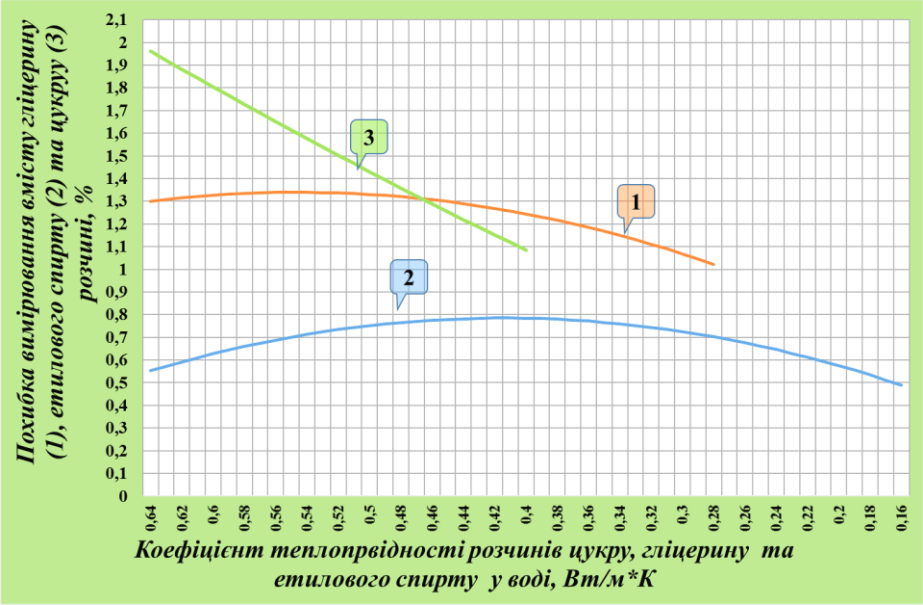


Рис. 5. Графіки величини похибок визначення гліцерину (1), об'ємного вмісту етилового спирту (2) та цукру (3) в їх водяних розчинах в залежності від теплопровідності розчину при вимірюванні теплопровідності

Аналіз похибки вимірювання при різних режимах роботи приладу (при збільшенні терміну сеансу вимірювання, або при одночасному вимірюванні багаточисельних зразків однієї і тієї ж досліджуваної рідини) детально приведено в роботі авторів [17].

При дослідженні теплопровідності молока з різним ступенем жирності виявлено, що з ростом вмісту жирів теплопровідність молока зменшується і таким чином можна контролювати вміст жирів за значенням теплопровідності молока [13]. Графік залежності теплопровідності молока від його жирності наведені на рис. 6. Розміщення вимірювального зонда в пробірці з зразком молока показано на рис. 8

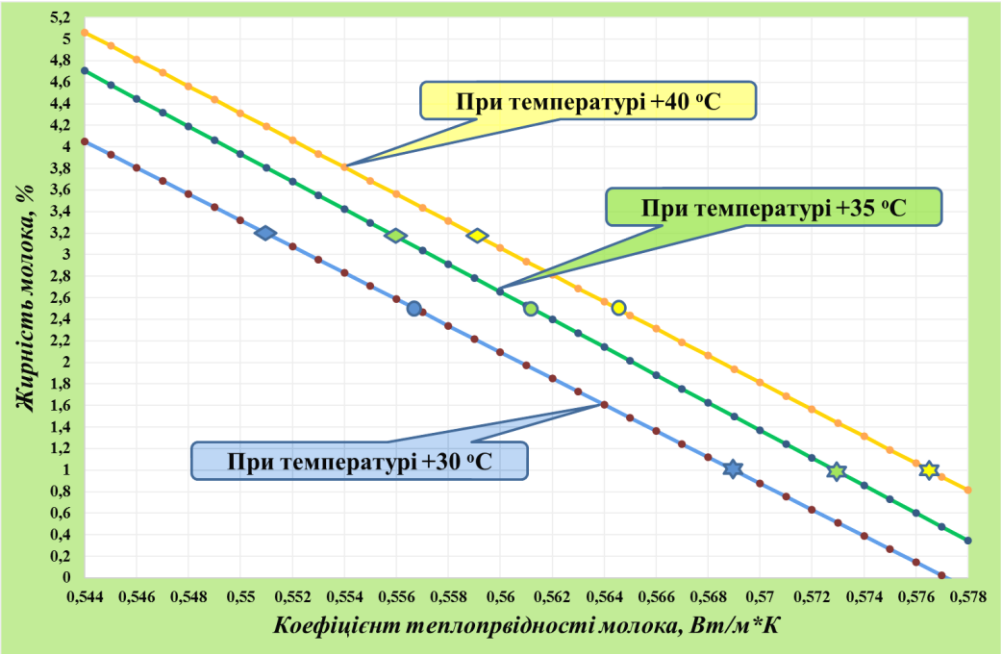


Рис. 6. Залежність теплопровідності молоко від вмісту жирів

Часто при контролі складу речовин з різною метою необхідно контролювати склад сумішей, вміст яких є неоднорідним, тобто вони можуть мати декілька шарів з різними теплофізичними характеристиками. Такими речовинами є біологічні матеріали, наприклад, кров. Як відомо, біологічні матеріали змінюють свої властивості в часі та при зміні їх температури, тому дослідження їх характеристик треба проводити з врахуванням цих обставин з використанням відповідних методик. Кров, по-перше має властивість згортатися, а, по-друге, при змішуванні її з речовинами, які запобігають згортанню крові, з певним часом розділяється на плазму та важкі фракції (рис. 7).

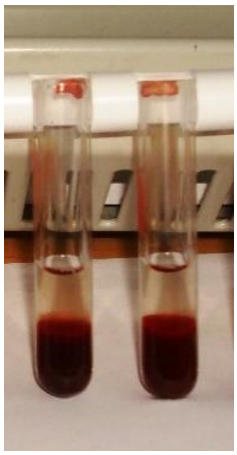


Рис. 7. Вигляд розшарування крові людини

Рис. 8. Вигляд пробірок з молоком при дослідженні його теплопровідності

При дослідженнях крові [13] виявлено, що з часом в ній відбувається осідання більш важких ферментів (еритроцитів, лейкоцитів, та ін.), що приводить до розшарування суміші і як наслідок до спотворення результатів вимірювання. На дно пробірки осідають найважчі клітини крові – еритроцити. Над шаром еритроцитів видно тоненьку смужку білого кольору (рис. 7). Це лейкоцити і кров'яні пластинки. Зверху відстоюється рідина жовтого кольору – плазма крові.

Проведені вимірювання показали, що дослідження неоднорідності крові та її сумішей шляхом контролю теплопровідності таких речовин можливе при умові контролю положення зонда відносно поверхні. Висновки про склад досліджуваних сумішей, які необхідні при дослідженнях, можна зробити на основі порівняльного аналізу ТФХ досліджуваної суміші на різній глибині занурення зонда, в даному випадку верхнього та нижнього шарів (розчину плазми і розчину еритроцитів).

Висновки

1. З одержаних в результаті досліджень даних можна зробити висновок, що точність, з якою може бути визначено об’ємний вміст сумішей, залежить від різниці коефіцієнтів теплопровідності компонентів. Так, в даному випадку, похибка визначення об’ємного вмісту гліцерину та цукру в їх водних розчинах більша, ніж похибка визначення об’ємного вмісту етилового спирту. Для дотримання необхідної точності при вимірюваннях необхідно в залежності від значень різниці коефіцієнтів теплопровідності компонентів вибрати алгоритм і режим досліджень.

2. При контролі складу біологічних матеріалів необхідно враховувати їх властивість змінювати свій стан фракцій з часом. Так, кров та її розчини з часом розділяється на більш легкі фракції (плазма) розчину, які залишається в верхній частині посудини та більш важкі фракції розчину (форменні) – в нижній частині. Метод прямого підігріву термістора дозволяє проводити контроль складу таких речовин в малих об’ємах на різних глибинах і фіксувати момент розділу речовини на компоненти. Метод дозволяє визначити рівень межі розподілу та теплофізичні на різних рівнях розподілу. Це дуже важливо не тільки при визначенні ТФХ біологічних матеріалів, а також, наприклад, для контролю технологічного процесу створення нанорідин з заданими характеристиками.

© Тимчик Г. С., д.т.н., професор, Вислоух С. П., к.т.н., доцент, Матвієнко С. М., асистент

Література

1. Дивин А. Г. Методы и средства измерения состава и свойств веществ: учебное пособие для студентов высших учебных заведений /А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 104 с.

2. Жаров А.В. Экспериментальный метод измерения теплопроводности наножидкости / А.В. Жаров, Н. Г. Савинский, А. А. Павлов, А. Н. Евдокимов // Фундаментальные исследования, – № 8, 2014

3. Шмельков Д. А. Устройство для определения относительной вязкости нефтепродуктов и показателя динамики их нагрева / Д. А. Шмельков, Р. Г . Нигматуллин, Л. Ш. Шустер // Вестник УГАТУТ: МАШИНОСТРОЕНИЕ, – № 8 (53), – 2012, – С. 126–128

4. Шангин, В. В. Метод и устройство экспресс-контроля летучих примесей в маслах энергетического оборудования / В. В. Шангин, В. Г. Бухман, П. В. Скрипов, А. А. Старостин // Известия вузов. Проблемы енергетики, – 2010, – № 7-8. – С. 152–158

5. Шокина Ю.В. Метод определения теплофизических характеристик слоя сыпучих сред с элементами импульсного теплового контроля / Ю.В. Шокина, А.Б. Власов, Г.О. Шокин // Вестник ВГУИТ, №1, – 2015, – С. 63-69

6. Антипов С. Т. Исследование реологических и теплофизических характеристик крови крупного рогатого скота / С. Т.Антипов, В. Ю. Овсянников, А. А. Корчинский, А. А. Смирных // Вестник ВГУИТ, – 2017, – Т. 79. № 3, – С. 26–30

7. Постнов В. И. Неразрушающие методы контроля содержания связующих в препрегах и ПКМ (обзор) / В. И. Постнов, О. Л. Бурхан, А. Э. Рахматуллин, С. М. Качура // Труды ВИАМ. 2013, – №12, – 6 с.

8.Гаврилова Е. Л. Физико-химические методы анализа производства алкогольсодержащей продукции / Н. И. Шаталова, М. Н. Сайфутдинова, П. А. Гуревич // Учебное пособие: Казань. Издательство КНИТУ, – 2013

9. Нестерук Д. А. Тепловой контроль и диагностика / Д. А.Нестерук, В. П.Вавилов // Учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня. – Томск, 2007, – 104 с.

10. Шашков А. Г. Фактор термодиффузии газовых смесей: методы определения / А. Г. Шашков, В. Б. Василенко, А. Ф. Золотухина. – Минск: Белорусская наука, 2007.

11. M. F. van Gelder A thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures: Dissertation of Doctor of Philosophy in Biological Systems Engineering / Maarten F. van Gelder. – Blacksburg, Virginia, 1998. – 160 p.

12. Matvienko, S. Increasing accuracy of measuring thermal conductivity of liquids by using the direct heating thermistor method / Sergey Matvienko, Sergey Vysloukh, Oleksandr Martynchyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 4, N 5(82). - P. 20-30. – Way of Access : DOI : 10.15587/1729-4061.2016.75459.

13. Tymchik G. Investigation Thermal Conductivity of Biological Materials by Direct Heating Thermistor Method / G. Tymchik, S. Vysloukh, N. Tereshchenko, S. Matvienko. – 2018 IEEE 38th International Conference on ELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY (ELNANO), April 24-26, 2018, – Kyiv, Ukraine. – pp. 429-434

14. Matvienko S. Determination thermal and physical characteristics of liquids using pulse heating thermistor method / S. Matvienko, S. Vysloukh, O. Martynchyk // International Journal of Engineering Research and Science. – 2016. – Vol.2, Iss. 5. – P.250-258; ISSN №2395-6992.

15. Справочник по теплопроводности газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий. – М.: Энергоатомиздат, – 1990. – 352 с.

16. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. М.: Пищевая промышленность, 1980. – 288 с.

17. Матвієнко С. М. Підвищення точності вимірювання теплопровідності рідин методом прямого підігріву термістора / Матвієнко С. М., Вислоух С. П. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2016. – № 6. – С. 85–93.

© Тимчик Г. С., д.т.н., професор, Вислоух С. П., к.т.н., доцент, Матвієнко С. М., асистент

Тымчик Г. С., **Выслоух С. П.**, **Матвиенко С. Н.**
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

КОНТРОЛЬ СОСТАВА ВЕЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ «МЕТОДА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ»

Исследовано определение состава веществ путем контроля их теплофизических свойств методом прямого подогрева термистора.

Для осуществления контроля состава приведенных исследуемых веществ обоснованно использовать метод прямого подогрева термистора. Рассмотрены причины возникновения погрешности измерения предложенным методом и определены пути для ее уменьшения. Представлены результаты экспериментальных исследований с контрольными материалами с помощью разработанного прибора. Определено направление по повышению точности и эффективности использования предложенного метода при определении состава веществ. Доказано, что в смесях двух веществ с уменьшением отношения значений теплопроводности этих веществ увеличивается погрешность измерения процента содержания одного вещества в другом. Доказана возможность уменьшения погрешности измерения путем обработки накопленных данных при многократных наблюдениях. Рассмотрена возможность контроля содержания неоднородных веществ, а именно, при выпадении осадка или расслоении исследуемой смеси.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, состав веществ, теплопроводность, метод прямого подогрева термистора.*

Tymchik G., Vysloukh S., Matvienko S.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute˝

CONTROL OF SUBSTANCES COMPOSITION BY METHOD OF HEAT CONDUCTIVITY

Considered questions for investigation of the possibility to determining the composition of substances by controlling their thermophysical properties by direct heating thermistor method.

It is reasonable to use the direct heating method of the thermistor to control the composition of the test substances. The reasons for the error in the measurement by the proposed method are considered and the ways to reduce it are determined. The resulted results of experimental researches with control materials by means of the device on the basis of direct heating thermistor method. Directions have been determined to increase the accuracy and effectiveness of the proposed method in determining the composition of substances. It is proved that in the mixtures of two substances with a decrease in the ratio of the values of the thermal conductivity of these substances, the error in measuring the percentage for content of one substance in another increases. Shown the possibility of reducing the measurement error by processing the accumulated data during multiple observations. is Considered the possibility of controlling the content of inhomogeneous substances, namely, in the case of precipitation or separation of the test mixture.

Key words: *non-destructive testing, composition of substances, thermal conductivity, direct heating thermistor method.*

Стаття надійшла до редакції 16.05.2018.

© Тимчик Г. С., д.т.н., професор, Вислоух С. П., к.т.н., доцент, Матвієнко С. М., асистент

УДК 621.787.4

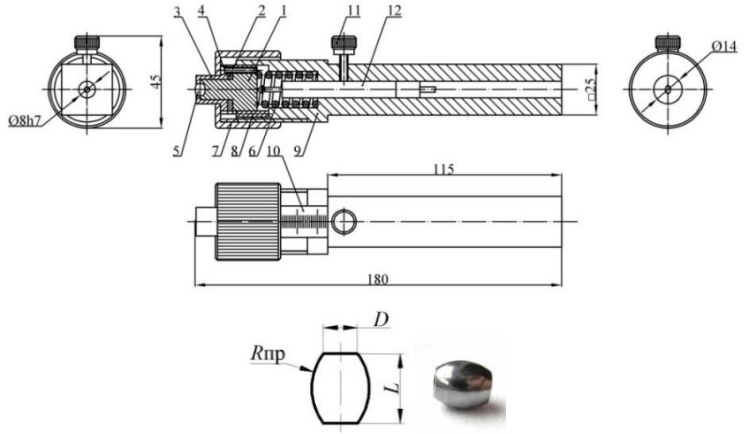
Ткачук А.А. (ORCID 0000-0001-9085-7777), **к.т.н., Терлецький Т.В., к.т.н., доцент, Кононенко А.С.**
Луцький національний технічний університет

РОЗРОБЛЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ З МОЖЛИВІСТЮ ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКТИВНИХ ДАВАЧІВ ДЛЯ АКТИВНОГО КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ ОБРОБЛЕННЯ

Надійність та довговічність роботи механізмів залежить від якості поверхневих шарів їх деталей. У зв'язку з інтенсифікацією експлуатаційних процесів, а саме збільшенням швидкостей переміщення робочих органів, підвищенням температур і тиску, роль якості поверхневого шару значно зростає. З метою забезпечення цих параметрів в регламентованих межах пропонується оригінальна технологія зміцнювального оброблення, яка дозволяє підвищувати точність, форсувати процес припрацювання спряжених поверхонь обертання та проводити активний контроль процесу з можливістю оперативного усування збурюючих чинників, які можуть виникати під час оброблення поверхневим пластичним деформуванням. За допомогою контрольних карт Шухарта проведено дослідження зношування індентора та впливу нерівномірної твердості заготовки на кінцеві параметри мікротвердості деталі. Після виявлення та усунення причин негативних динамічних явищ, тобто приведення процесу в статистично керований стан застосовано контрольні карти для виявлення причин стохастичних динамічних явищ та проведено заходи для створення запасу стійкості інструменту, що забезпечуватиме гарантоване отримання деталей без браку навіть у випадках непередбачених збурень в технологічному процесі.

Ключові слова: *зносостійкість, інструмент, напруження, градієнт, вигладжування*

Експлуатаційні характеристики деталей, в тому числі зносостійкість, визначаються станом їх поверхневого шару. Зв'язок характеристик якості поверхневого шару з експлуатаційними властивостями деталей свідчить про те, що оптимальна, з точки зору підвищення експлуатаційних властивостей деталей, поверхня має бути досить твердою, повинна мати стискуючі залишкові напруження, дрібнодисперсну структуру, згладжену форму мікронерівностей з великою площею опорної поверхні (згідно кривої Аббота-Фаєрстоуна). Забезпечення якісних параметрів поверхневого шару деталей в процесі поверхневого пластичного деформування (ППД) здійснюється за двома основними напрямками: підбір оптимальних технологічних режимів оброблення та створення нових прогресивних методів ППД. В свою чергу нові методи вимагають інструментального забезпечення та вдосконалення технологічних процесів, шляхом застосування засобів активного контролю, що дозволяють контролювати припуск та радіальну силу вигладжування. Отже, розробка сучасних засобів для зміцнюючого оброблення є актуальною науково-технічною проблемою. Під час вигладжування зміцнюючими технологіями [1, 2] висотні параметри шорсткості обробленої поверхні залежать від кінематики руху інструменту, що накладає певні обмеження на продуктивність процесу ППД.



а)

б)

Рис. 1. Інструмент для КВ а), геометричні параметри індентора б)

© Ткачук А.А., к.т.н., Терлецький Т.В., к.т.н., доцент, Кононенко А.С.

Для зменшення висотних параметрів шорсткості поверхні та можливості роботи з більш високими швидкостями та зусиллями, як прогресивний метод зміцнювальної технології запропоновано вигладжування поверхонь обертання інструментом, який дозволяє одночасно комбінувати вигладжування та обкатування з можливістю активного контролю процесу [3]. Суть цього методу полягає у вигладжуванні поверхневого шару деталі в напрямку вектора обертання *v* заготовки та обкатуванні в напрямку вектора подачі *S*, що забезпечується спеціальною формою деформуючого елемента (рис. 1 б).

Для реалізації запропонованого методу оброблення створено оригінальну конструкцію інструменту: державку, (рис. 1 а) яка розроблена відповідно до запатентованого способу зміцнюючого оброблення деталей машин, в якій деформуючий елемент виконано як комбінаторику, складену з тіла обертання та пружної системи регулювання притискання останнього [3]. Індентор бочкоподібного типу, виготовлений з твердого сплаву ВК8-В (рис. 1 б). Для закріплення індентора розроблено вузол повзункового типу, що складається з: корпусу 1, шайби регулювальної 2, кришки 3, трьох гвинтів 4 та індентора 5. В даному вузлу вирізано паз з метою забезпечення точного базування індентора відносно оброблюваної деталі з можливістю поступального руху відносно осі інструменту (рис. 2).

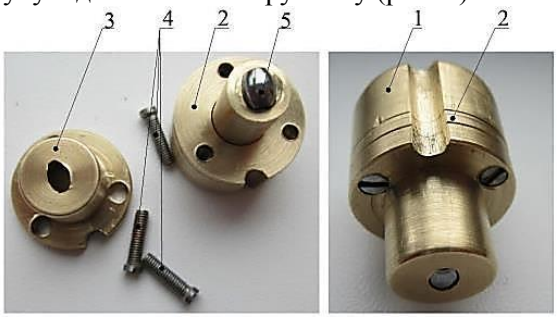


Рис. 2. Закріплення деформуючого елемента в державці

У корпусі 1 виконано еліптичне заглиблення, в якому має змогу виконувати обертальні рухи індентор 5. За допомогою шайби регулювальної 2 можна контролювати точність положення індентора, оскільки через певний час в корпусі 1 виникають зношування, які можна усунути, замінивши шайбу 2. Кришка 3 забезпечує фіксацію індентора у вузлі. Корпус, шайбу регулювальну та кришку виготовлено з жаростійкого матеріалу ЛЦ40С. Вибір саме цього матеріалу зумовлений його високою температурою плавлення, низьким коефіцієнтом тертя при наявності ЗОР у вигляді оливи И-20А та високим значенням теплопровідності, що сприяє відведенню тепла від деформуючого елемента. Попереднє зусилля створюється стисканням пружини 6 гайкою 7. Для визначення точної позиції гайки на державці 9 нанесено та відтаровано шкалу 10 (рис. 3, 4).

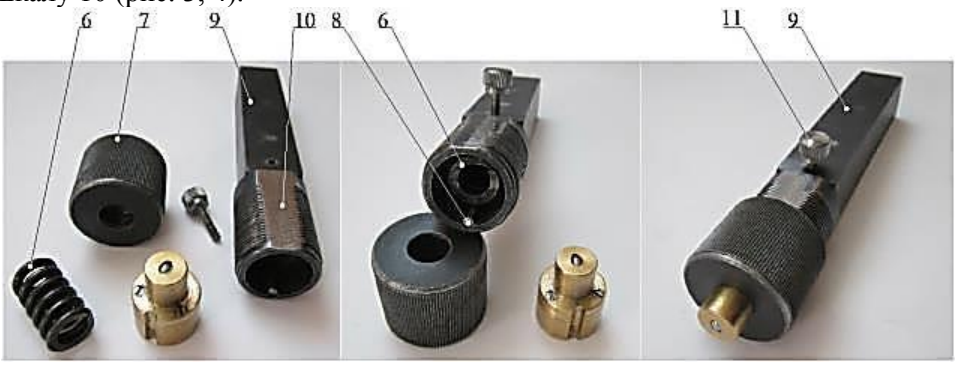


Рис. 3. Зовнішній вигляд інструменту та його основних вузлів

Повзунок в державці 9 розміщується за напрямною 8. В державці 9 виконано отвір Ø8, куди встановлюється індуктивний перетворювач Millimar P2004M, який закріплюється гвинтом 11, для контролю процесу оброблення у цифровому вигляді. Державку таровано за стандартною схемою, фрагменти процесу тарування представлено на рис. 4. Послідовність тарування полягає в наступному: на токарно-гвинторізному верстаті державку закріпили в різцетримачі. Між державкою (вигладжуючим наконечником) та задньою бабкою розмістили зразковий динамометр. Задня бабка використовувалася в якості пристосування для

навантаження динамометра, через який передавалося зусилля на державку. Таким чином, спостерігаючи за відліком приладу Millimar C1245 на динамометрі було встановлено, які покази відповідають силі навантаження 25 Н, 50 Н, 75 Н, 100 Н,125 Н, 150 Н, 175 Н, 200 Н.

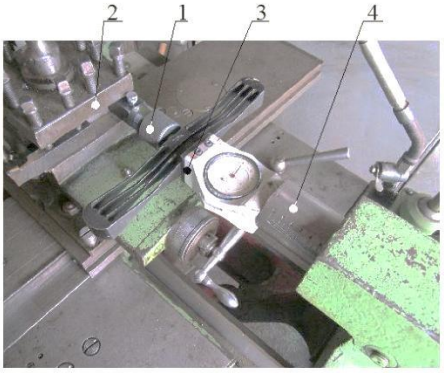


Рис. 4. Тарування державки: 1 – державка; 2 – різцетримач токарного верстата; 3 – динамометр зразковий механічний ДОСМ-3-0,05; 4 – задня бабка токарно-гвинторізного верстата

Величина радіусу індентора $R_{пр}$ вибирається в залежності від твердості оброблюваного матеріалу. Для загартованих сталей твердістю 50...65 HRC рекомендовано використовувати з $R_{пр} = 8...13$ мм; для термічно оброблених сталей середньої твердості 45...50 HRC - $R_{пр} = 15...25$ мм; для м'яких сталей та кольорових сплавів $R_{пр} = 2{,}5...3{,}5$ мм. Оптимальне зусилля для КВ знаходиться в межах 50...150 Н, швидкість обертання заготовки $v = 180...200$ м/хв, оптимальна величина подачі $S = 0{,}02...0{,}06$ мм/об.

В ході проведення досліджень [4, 5, 6] встановлено, що незважаючи на інтенсивне пластичне деформування, поверхня що оброблюється не зазнає високотемпературних впливів через те що матеріал ВК-8В має низький коефіцієнт тертя та високий коефіцієнт теплопровідності. Під час оброблення не спостерігається утворення зон вторинного гартування та вторинного відпуску, що характерно для абразивного оброблення загартованих сталей. Тим не менше, в ході оброблення загартованих сталей відбуваються фазові перетворення, які супроводжуються майже повним розпадом залишкового аустеніту з переходом його в мартенсит. Це явище відбувається одночасно з пластичним деформуванням, що зумовлює появу в поверхневому шарі залишкових стискаючих напружень. Так після оброблення сталі ШХ15 із прикладеним зусиллям 50 і 60 Н стискаючі напруження досягнули 75 і 94 кг/мм^2 відповідно, а глибина їх залягання склала 260 та 320 мкм. Також виявлено, що величина і глибина залягання напружень залежать від режимів оброблення та від напружень поверхневого шару утвореного на попередніх технологічних операціях, що свідчить про вплив явища технологічної спадковості. Окрім абсолютного значення величини залишкових напружень, значний вплив на експлуатаційні характеристики деталей чинить градієнт цих напружень. Відомо, що в тонкому поверхневому шарі після шліфування, а особливо полірування утворюється високий перепад напружень. В сталі ШХ15 градієнт після шліфування складає 5...40 кг/мм^2·мкм, після полірування – 80...110 кг/мм^2·мкм. Градієнт після різних режимів комбінованого вигладжування складає лише 0,8...12 кг/мм^2·мм. Низький градієнт напружень свідчить про плавність їх розповсюдження по глибині, що позитивно впливає на експлуатаційні властивості деталей. Особливий ефект комбінованого вигладжування відзначається на першому проході, подальше збільшення числа проходів на зміну шорсткості майже не впливає. Найбільший вплив на величину шорсткості надає зусилля вигладжування, із збільшенням якого шорсткість зменшується. Однак для кожного матеріалу існує своя оптимальна величина зусилля вигладжування. Другим за значенням параметром режиму вигладжування, що впливає на величину шорсткості, є подача. Із зменшенням подачі шорсткість зменшується. Вплив швидкості вигладжування на шорсткість незначний. При вихідній шорсткості загартованих сталей не нижче 7-го класу вигладжування забезпечує її зменшення на два- три класи, а при початковій шорсткості незагартованих сталей і кольорових сплавів не нижче 5-го класу покращення досягає від двох до п'яти класів. Шорсткість при такому обробленні знаходиться в межах 10, 13-го класів. Дуже важливою перевагою цього способу вигладжування є більш сприятлива форма мікрорельєфу. Виявляється, що опорна поверхня при тій же шорсткості

збільшується в 2-4 рази в порівнянні з опорною поверхнею, отриманою на операціях шліфування і суперфінішу. Ступінь зміцнення поверхні становить 20-30% для загартованих сталей і 40-60% для м'яких матеріалів. Глибина зміцненої зони залежно від матеріалу і режимів вигладжування становить 0,2...0,4 мм [2]. Встановлено, що максимально зміцнений шар знаходиться на глибині 0,01-0,05 мм від поверхні, тобто в зоні дії максимальних дотичних напружень.

Одним з ефективних методів оброблення ППД являється вигладжування, при якому виникає можливість керування якістю поверхонь оброблюваних деталей для забезпечення комплексу заданих параметрів поверхневого шару їх функціональних поверхонь, й відповідно, підвищення експлуатаційних властивостей виробу шляхом застосування активного контролю, для цього використовується давач Millimar P2004M та вторинний прилад Millimar C1245. Сучасні технології дозволяють призначити поєднання технологічних режимів та умов вигладжування для забезпечення комплексу заданих параметрів поверхневого шару обробленої поверхні із одночасним дотриманням динамічної стійкості процесу. Метою сучасного виробництва являється забезпечення стабільності процесу оброблення в часі. Динамічне управління процесом вигладжування ґрунтується в оцінці стабільності процесу на основі результатів періодичного контролю вибірок малого об'єму та подальшому налагодженні процесу. Ефективним засобом вивчення динаміки процесу являються контрольні карти Шухарта, за допомогою яких можливо вирішити такі завдання, як визначення рівня зношування індентора, та нерівномірність твердості вихідної поверхні, й на основі отриманих даних виконувати відповідні дії для управління процесом.

Дослідження зношування індентора. Під час проведення досліджень при пружному способі вигладжування зовнішніх поверхонь обертання виконаних з матеріалу сталь ШХ15 ставилось за мету забезпечити мікротвердість поверхневого шару $H\mu$=4800±300 МПа. Для 100 оброблених деталей виконувалось послідовно 20 серій вимірювання поверхневої мікротвердості $H\mu$, по п'ять вимірювань ($X_1 \ldots X_5$) у вибірці (табл. 1), та визначалось їх середньоарифметичне значення X_i (див. рис. 5).

Таблиця 1

Результати періодичного контролю мікротвердості $H\mu$, МПа, у вибірках

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_i	№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_i
1	5060	5080	5010	4620	4860	4926	11	4550	4680	4430	4710	4790	4632
2	4980	5060	4870	4580	4580	4814	12	4920	4670	4600	4460	4440	4615
3	4980	4860	4700	4790	4660	4798	13	4380	4550	4510	4310	4790	4508
4	4580	4820	4970	4800	4950	4825	14	4790	4490	4750	4380	4360	4554
5	4840	4580	4690	4810	4970	4775	15	4710	4580	4530	4380	4580	4555
6	4660	4860	4710	4495	4790	4702	16	4710	4390	4440	4440	4360	4468
7	4830	4630	4670	4650	4885	4735	17	4480	4490	4380	4370	4790	4574
8	4480	4560	4520	4840	4530	4586	18	4360	4710	4420	4350	4440	4456
9	4710	4532	4740	4750	4680	4685	19	4470	4370	4360	4310	4390	4380
10	4360	4440	4800	4580	4440	4524	20	4430	4340	4280	4580	4410	4408

В результаті було виявлено стійку тенденцію до зниження поверхневої мікротвердості поверхневого шару, внаслідок зношування індентора, тобто процес перебував в статистично некерованому стані. В серії вимірювань №10 середньоарифметичне значення $H\mu$ наближалось до нижнього допустимого значення 4500 МПа. Також було помічено, що окремі значення поверхневої мікротвердості в даній серії вимірювань (табл. 1) значно вийшли за поле допуску. Тому необхідно виконувати заміну індентора після оброблення 45 деталей, або використовувати індентори з підвищеною зносостійкістю. Таким чином, застосування X-карти (рис. 6) дозволяє визначити раціональний час регламенту деформуючого елементу в залежності від конкретних умов та режимів вигладжування.

Вплив нерівномірної твердості початкової поверхні на отримані параметри мікротвердості. Під час проведення досліджень при пружному способі вигладжування зовнішніх поверхонь обертання виконаних з матеріалу сталь ШХ15 було поставлено за мету забезпечити мікротвердість поверхневого шару $H\mu$=5200±250 МПа. Для 100 оброблених деталей послідовно виконувалось 20 серій вимірювання поверхневої мікротвердості $H\mu$, по п'ять вимірювань ($X_1 \ldots X_5$) у вибірці (табл. 2) з розмахом R. Для виключення впливу

зношування індентора вимірювання виконувались після зміни деформуючого елементу (для кожної вибірки). Згідно з даними табл. 2 було заповнено *X*-карту (рис. 2).

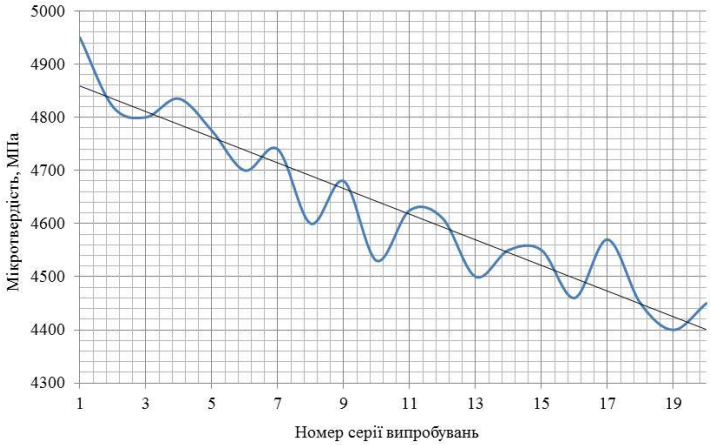


Рис. 5. Зміна поверхневої мікротвердості обробленої поверхні при частковому зношуванні індентора, типу «еліпсоїд»

Для визначення меж регулювання контрольної карти було розраховано математичне очікування μ=5202 МПа та середньоквадратичне відхилення σ=200 МПа. Верхня та нижня межа регулювання склали відповідно 5491 та 4919 МПа.

В серіях вимірювань №6, 13, 14 спостерігалось відхилення отриманих значень за допустимі межі, тобто процес перебував в статистично некерованому стані. Аналіз заготовок показав, що зміна значень мікротвердості у вибірках зумовлена дисперсією мікротвердості вихідної поверхні, внаслідок чого окремі значення поверхневої мікротвердості (див. табл. 2) значно вийшли за поле допуску. Відповідно виникла потреба забезпечувати рівномірну твердість вихідної поверхні.

Таблиця 2

Результати періодичного контролю мікротвердості $H\mu$, МПа, у вибірках

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_i	R	№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_i	R
1	5020	5160	5370	5440	5470	5292	450	11	5280	5190	5050	4860	4740	5024	540
2	4880	4970	5020	5150	5350	5074	470	12	5370	5220	5200	5140	4950	5176	420
3	4760	4820	5010	5190	5240	5004	480	13	5170	4990	4830	4700	4540	4846	630
4	5180	5270	5460	5590	5660	5432	480	14	5810	5610	5440	5360	5250	5494	560
5	4920	4980	5170	5270	5330	5134	410	15	5390	5340	5170	5080	4950	5186	440
6	5370	5530	5560	5770	5950	5636	580	16	5490	5470	5360	5230	5060	5322	430
7	5090	5300	5380	5460	5530	5352	440	17	5330	5180	5110	5090	4920	5126	410
8	5090	5220	5310	5460	5510	5318	420	18	5230	5140	5040	4880	4780	5014	450
9	5040	5360	5100	5180	5190	5174	320	19	5330	5260	5180	5130	5050	5190	280
10	5420	5220	5190	5080	4960	5174	460	20	5510	5290	5090	4910	4860	5132	650

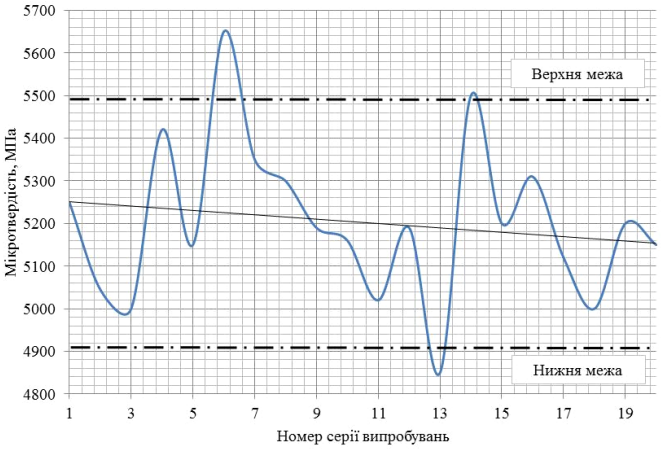


Рис. 6. Зміна поверхневої мікротвердості обробленої поверхні при нерівномірній твердості заготовки

Таким чином застосування *X*-карти (рис. 6) дозволяє виявити наявність нерівномірної твердості вихідної поверхні та прийняти відповідні заходи. Також за допомогою *X*-карти можна виявити неточності налаштування інструменту, коли середина поля допуску не співпадає з математичним очікуванням μ на *X*-карті. В цьому випадку варто рекомендувати застосування сучасних високоточних приладів налаштування інструменту під час вигладжування. Після виявлення та усунення причин негативних динамічних явищ (зношування індентора, нерівномірної твердості вихідної заготовки, неточності налаштування інструменту), тобто для приведення процесу в статистично керований стан необхідне застосування контрольних карт для виявлення випадкових причин змінності та наступних дій для створення запасу стійкості що забезпечуватиме гарантоване отримання деталей без браку навіть у випадках непередбачених збурень в технологічному процесі оброблення спряжених деталей.

Запропонований інструмент дозволяє вирішити важливу проблему, через яку вигладжування не знаходить широкого застосування в промисловості. Суть проблеми полягає в тому, що навіть незначний знос індентора призводить до погіршення одержуваних при вигладжуванні параметрів якості поверхневого шару деталей. Крім цього знос індентора вимагає або його заміни, або доводки, що в обох випадках підвищує технологічну собівартість виготовлених деталей. В даному випадку зношування відбувається не в одній точці дотику між індентором та заготовкою, а по колу оскільки деформуючий елемент має змогу обертатися навколо своєї осі. Вигладжування сприятливо впливає на підвищення зносостійкості поверхонь при терті ковзанні. Порівняльні випробування на зношування шліфованих, полірованих і вигладжених зразків 10-го класу шорсткості показали, що зношування вигладженої поверхні в порівнянні з полірованою менше на 20...25%, а порівняно зі шліфованою – в 1,5...3 рази.

Таким чином, розроблена конструкція інструменту забезпечує наступні переваги:

- в 2,5 рази зменшуються висотні параметри шорсткості поверхні;
- можливе отримання оптимального поєднання (виходячи з необхідних експлуатаційних властивостей деталі) значень мікротвердості поверхневого шару, залишкових напружень і висотних параметрів шорсткості обробленої поверхні;
- можлива інтенсифікація процесу вигладжування (підвищення продуктивності оброблення)
- застосування активного контролю на основі індуктивних давачів та вторинного приладу типу Millimar C1245.

Розроблена конструкція інструменту для вигладжування є простою у практичній реалізації, мало відрізняється за собівартістю виготовлення від базової конструкції, отже, її застосування доцільне на промислових підприємствах під час виготовлення деталей машин, до яких висуваються підвищені вимоги точності та міцності поверхневого шару.

© Ткачук А.А., к.т.н., Терлецький Т.В., к.т.н., доцент, Кононенко А.С.

Інформаційні джерела

1. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972, 104 с.
2. Ткачук А.А. Технологічні основи зміцнювально-вигладжувального оброблення поверхонь обертання. Монографія – Луцьк: СПД Гадяк Жанна Володимирівна друкарня «Волиньполіграф»™, 2014. - 196 с.
3. Пат. 76846 Україна, МПК B24B 39/00 (2013.01). Спосіб зміцнюючої обробки деталей машин за допомогою тіла обертання / А.А. Ткачук, С.А. Мороз, С.О. Приступа; Заявник і патентовласник: Луцький національний технічний університет, Луцьк; заявл. 09.12.2011; опубл. 25.01.2013; Бюл. №2. – С.4.
4. Ткачук А.А. Пат. 87877 Україна, МПК B24B 39/00 (2014.01). Пристрій для вигладжування поверхонь обертання / А.А. Ткачук, Заявник і патентовласник: Луцький національний технічний університет, Луцьк; заявл. 09.08.2013; опубл. 25.02.2014; Бюл. №4. – 4 с.
5. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978, 152 с.
6. V. Zablotskyi, O. Dahnyuk, S. Prystupa, A. Tkachuk Formation of physical and mechanical properties of surface layer of machine parts. Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Volume 8, March 2017, Pages 87-98, DOI: 10.2412/mmse.99.57.43

Ткачук А.А., к.т.н., **Терлецкий Т.В.**, к.т.н., доцент, **Кононенко А.С.**
Луцкий национальный технический университет

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ

Надежность и долговечность работы механизмов зависит от качества поверхностных слоев их деталей. В связи с интенсификацией эксплуатационных процессов, а именно увеличением скоростей перемещения рабочих органов, повышением температур и давления, роль качества поверхностного слоя значительно возрастает. С целью обеспечения этих параметров в регламентированных пределах предлагается оригинальная технология упрочняющей обработки, которая позволяет повышать точность, форсировать процесс приработки сопряженных поверхностей вращения и проводить активный контроль процесса с возможностью оперативного устранения возмущающих факторов, которые могут возникать при обработке поверхностным пластическим деформированием. С помощью контрольных карт Шухарта проведено исследование износа индентора и влияния неравномерной твердости заготовки на конечные параметры микротвердости детали. После выявления и устранения причин негативных динамических явлений, тоесть приведение процесса в статистически управляемое состояние применены контрольные карты для выявления причин стохастических динамических явлений и проведены мероприятия для создания запаса стойкости инструмента, обеспечивающего гарантированное получение деталей без брака даже в случаях непредвиденных возмущений в технологическом процессе.

Ключевые слова: *износостойкость, инструмент, напряжения, градиент, выглаживание*

© Ткачук А.А., к.т.н., Терлецький Т.В., к.т.н., доцент, Кононенко А.С.

A. Tkachuk, T. Terlets'kyy, A. Kononenko
Lutsk National Technical University

DEVELOPMENT OF THE TOOL FOR SURFACE PLASTIC DEFORMATION WITH THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF INDUCTIVE SENSORS FOR ACTIVE CONTROL OF THE PROCESSING PROCESS

Reliability and longevity of the operation of mechanisms depends on the quality of the surface layers of their parts. In connection with the intensification of operational processes, namely the increase in the rates of movement of working organs, the increase in temperature and pressure, the role of quality of the surface layer increases significantly. In order to provide these parameters within the regulated limits, the original technology of strengthening processing is proposed, which makes it possible to increase the accuracy, force the process of running in the conjugated surfaces of rotation, and to actively monitor the process, with the possibility of promptly eliminating disturbing factors that may arise during surface plastic deformation processing. With the help of Shewhart's control charts, an investigation of the wear of the indenter and the effect of the uneven hardness of the workpiece on the final parameters of the microhardness of the part were carried out. After identifying and eliminating the causes of negative dynamic phenomena, bringing the process to a statistically controllable state, control charts were used to identify the causes of stochastic dynamic phenomena and measures were taken to create a tool life reserve guaranteeing the obtaining of parts without rejection even in cases of unforeseen disturbances in the technological process.

Keywords: *wear resistance, tool, stress, gradient, smoothing treatment*

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018.

© Ткачук А.А., к.т.н., Терлецький Т.В., к.т.н., доцент, Кононенко А.С.

УДК 621.318.4

Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ПРИТЯЖЕНИЕ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Практический интерес к магнитно-импульсной обработке металлов обусловлен потребностью в создании устройств, позволяющих восстанавливать детали из листового металла, устранять вмятины на поверхности с внешней стороны, без разборки конструкции. Проведенный анализ описанных ранее приспособлений показал, что все они имеют определенные недостатки и ограничения. В предлагаемой работе обоснована возможность создания электротехнических систем для притяжения металлов немагнитной природы с помощью низкочастотного электромагнитного поля и однонаправленных токов, индуцированных в заготовке и притягивающем экране. Рассмотрена зависимость разности фаз в индукторе и заготовке от частоты сигнала. Обосновано введение в классическую схему инструмента магнитно-импульсной обработки металлов дополнительного притягивающего экрана. Это дает возможность создать в обрабатываемом объекте и дополнительном экране токи, совпадающие по фазе, что позволяет притягивать как ферромагнитные, так и не магнитные металлы. Показано, что с целью более эффективного притяжения экран и заготовка должны быть изготовлены из одинаковых металлов для индуцирования в них максимально близких как по фазе, так и по амплитуде токов.

Ключевые слова: *магнитно-импульсная обработка, индуктор, притягивающий экран, индуцированный ток.*

Физический принцип магнитно-импульсного притяжения широко известен в научной литературе. Исследование магнитно-импульсного притяжения заготовок из листового металла первоначально было обусловлено реставрационными потребностями внешних панелей самолетов и наземных средств транспорта. Анализ примеров реальной жизни показывает, что большое количество повреждений – это вмятины в областях, где доступ изнутри панели очень проблематичен, если вообще невозможен. К этим случаям относятся крылья самолетов и части фюзеляжа, а также двери, капоты, крыши, крылья легковых автомобилей и грузовиков. Кроме того, существует потребность в обработке не только феромагнитных металлов, но и металлов немагнитной природы, таких как алюминий, медь, нержавеющая сталь.

Практическое применение устройств, позволяющих восстанавливать детали из листового металла, устраняя вмятины на поверхности, с внешней стороны, без разборки компонентов и избегая повреждения существующего лакокрасочного и защитного покрытия, описан0 в работе [1]. Системы включают в себя прерывание медленно растущих полей и возбуждающих токов, а также эффекты изменения направления усилия, применяемого к тонкому ферромагнитному листу. В патенте, полученном Фюртом, предложено производить магнитно-импульсную обработку многовитковой катушкой с разомкнутым дополнительным витком [2]. Физическая основа предложенного им процесса состоит в генерации двухчастотного разряда: медленного и быстрого. Быстрый разряд устраняет медленное поле со стороны заготовки, обращенной к катушке, в то время как медленное поле, рассеянное по толщине листового металла, деформирует заготовку. Практической реализации данный патент не получил. Физический принцип, описанный ранее, был включен в ряд конструкций соленоидов разной конфигурации Хансена и Хендриксона [3-5]. Они предложили метод и устройство для магнитно-импульсного удаления вмятин из магнитных металлов путем введения медленного разряда через многовитковую катушку и быстрого импульса противотока. Также ими была разработана система катушек с введением концентратора потока, который также известен в литературе как полевой индуктор. Кроме того, была представлена система из двух катушек и переносного генератора импульсов, генерирующих как отталкивающие, так и силы притяжения для деформации как вогнутых, так и выпуклых областей. Шнеерсоном было предложено получать притяжение листового металла катушкой на основе резкого прерывания одночастотного разряда [6]. В этом случае электромагнитное поле создает силы притяжения. В

© Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.

общем, этот подход подобен двухчастотному методу Фюрта, развитого Хансеном и Хендриксоном, Предложенный метод выглядит проще, однако его эффективность зависит от того, насколько быстро разряд может быть прерван. Прерывание разряда аналогично введению вторичного высокочастотного разряда, что устраняет магнитно-импульсное поле со стороны заготовки, обращенной к катушке. О'Делл [7] предложил использовать магнитно-импульсное устройство, включающее электромагнит, расположенный с внешней стороны панели и инструмент, расположенный с внутренней стороны панели. Магнит притягивает инструмент, который выравнивает внутреннюю поверхность вмятины. Этот метод аналогичен процедурам механического выравнивания вмятин. Одночастотное притяжение листового металла было разработано Батыгиным и др. [8, 9] для ферромагнитных металлов. Эффект был обнаружен во время экспериментов по магнитно-импульсному притяжению листовых металлов электрическими разрядами разной частоты. Данная концепция быстро нашла свое практическое применение в устройствах для удаления вмятин при ремонте автомобилей, где большинство наружных панелей изготовлено из низкоуглеродистой стали. Специфические конструкции катушек, а также практические аспекты удаления вмятин в автомобильных панелях описаны в патенте [10]. Эксперименты показали, что направление магнитно-импульсного давления для заготовок из листового металла из ферромагнитной стали зависит от частоты разряда. При некотором пределе силы меняют направление: при высоких частотах имеет место отталкивание, а при низких частотах наблюдается притяжение. Все упомянутые концепции [2-11] имеют определенные недостатки и ограничения, которые усложняют их практическое использование, например, использование дорогостоящих коммутационных компонентов, позволяющих прерывать высокоинтенсивные токи или требования, по материалу обработки он обязательно должен быть ферромагнитным.

Целью настоящей работы было обоснование возможности создания электротехнических систем для притяжения металлов немагнитной природы с помощью низкочастотного электромагнитного поля и однонаправленных токов, индуцированных в заготовке и притягивающем экране.

Рассмотрим новую концепцию в сравнении с концепцией традиционных процессов магнитно-импульсного притяжения (МИОМ). Традиционная схема магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ), схематически показанная на рис.1. Такая реализация требует довольно высокой частоты разряда конденсаторов через катушку-инструмент, чтобы вызвать электрический ток в поверхностном слое заготовки [12].

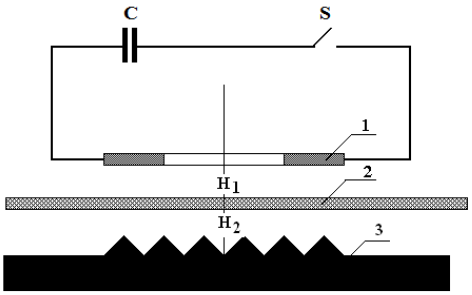


Рис.1. Схема традиционной магнитно-импульсной обработки
1 – одновитковый индуктор, 2 – заготовка листового металла, 3 – односторонняя матрица
C – блок конденсаторов для накопления электрической энергии, *S* – переключатель разрядной цепи

Известные методики проектирования оборудования МИОМ обычно направлены на то, чтобы избежать проникновения магнитно-импульсного поля через толщину заготовки, как это было рекомендовано, например, [13]. При этом давление, прикладываемое к заготовке, может быть рассчитано как:

$$P = \frac{\mu_0}{2}\left(H_1^2 - H_1^2\right), \quad (1)$$

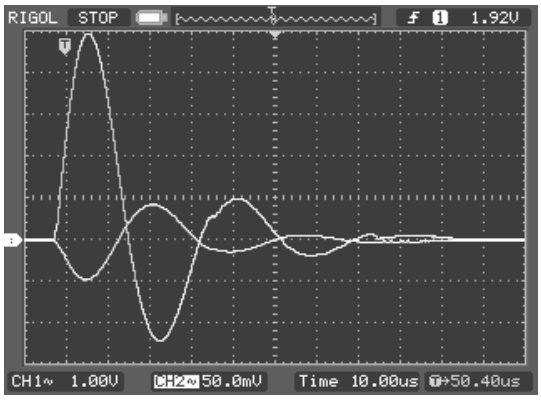
где H_1 – напряженность магнитного поля в зазоре между катушкой и заготовкой,

© Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.

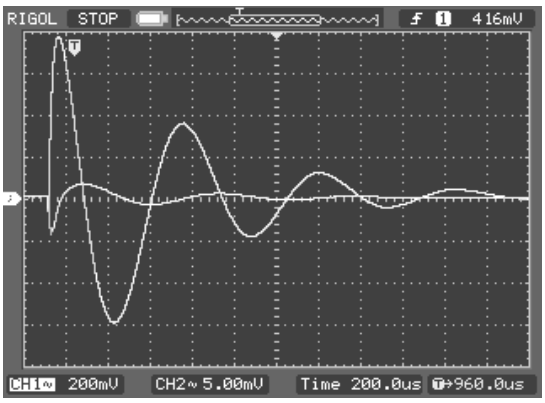
H_2 – напряженность магнитного поля, проникающего через заготовку.

Количество витков катушки и емкость накопителя энергии оборудования обычно выбирается с учетом итогового минимального уровня индуктивности. В такой конфигурации ток, индуцированный в заготовке, имеет почти такую же временную форму, как и ток разряда в катушке (но с разностью фаз ~ π). Небольшой сдвиг во временных фазах токов в катушке и в заготовке, вызванный процессами проникновения, можно наблюдать и в других экспериментах, но данный эффект, как правило, не учитывается при практических расчетах процессов МИОМ. В традиционной МИОМ наблюдается сильное отталкивающее действие между катушкой и заготовкой с хорошей электропроводностью при довольно высокой частоте разряда.

Примеры экспериментальных кривых возбуждающего тока, протекающего в катушке, синхронизированного с наведенным током в заготовке для частот разряда 33 кГц и 1,33 кГц, показаны на рис. 2, а и б соответственно.



а)



б)

Рис. 2. Тока в катушке (кривая с более высокой амплитудой) синхронизированный с индуцированным в заготовке (кривая с низкой амплитудой)
а – 33 кГц; б – 1,33 кГц

Сравнение этих двух случаев показывает, что для 33 кГц токи в катушке и в заготовке имеют сдвиг фазы ~ π, что означает, что токи работают в противоположных направлениях, что приводит к устойчивой силе отталкивания. Для 1,33 кГц токи в катушке и в заготовке имеем сдвиг фаз ~ π/2, что приводит к очень слабому взаимодействию между токами, которые периодически меняют направления. Этот эффект обсуждался в аналитической модели для двух предельных случаев, когда электропроводность $\gamma \to 0$ и $\gamma \to \infty$ [1].

Процесс магнитно-импульсного притяжения – это процесс, при котором создаются силы, направленные от заготовки к инструменту. Согласно наблюдаемому результату, процесс имеет некоторое отдаленное сходство с притяжением вакуумом. Также его можно сравнить с динамическим процессом, описанным только для магнитных материалов [1]. Идея состоит в том, чтобы создать электромагнитное поле с обеих сторон заготовки, а затем устранить его с одной стороны противоположным электромагнитным полем, генерируемым экраном. Этот процесс включает в себя и дополнительную часть инструмента – экран, который играет определяющую роль в создании поля противоположного знака и силового взаимодействия проводников с однонаправленными токами для притяжения немагнитных листовых металлов.

Чтобы устранить силу отталкивания между катушкой и заготовкой, частота разряда должна быть довольно низкой для достижения значительного проникновения магнитно-импульсного поля через заготовку, а также для увеличения временного сдвига фаз тока в катушке и в заготовке. Индуцированный ток в заготовке будет пропорционален производной по времени индуцирующего тока. Для гармонических процессов этот сдвиг между фаз равен ~ π/2. Это важное обстоятельство, потому что оно делает динамическое взаимодействие между катушкой и заготовкой почти несущественным, в то время как экран начинает играть главную роль, поскольку фазы тока, индуцированные в заготовке и в экране, идентичны. В этом случае катушка не подвергается каким-либо значительным электродинамическим силам.

На рисунке 3 показана схема предлагаемого процесса притяжения листового металла, которая получила название «Индукторная система с притягивающим экраном» (ИСПЭ).

© Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.

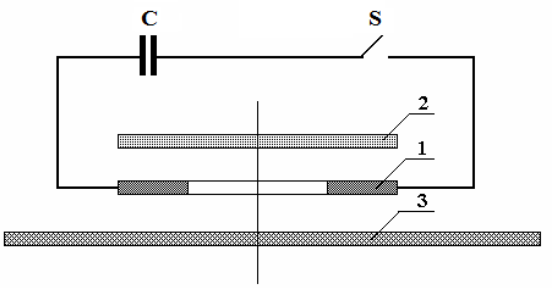


Рис. 3. Схема индукторной системы с притягивающим экраном
1 – одновитковый индуктор, 2 – вспомогательный притягивающий экран, 3 – заготовка листового металла
C – блок конденсаторов для накопления электрической энергии, *S* – и является переключателем разрядной цепи

ИСПЭ работает следующим образом: предварительно заряженный емкостной накопитель *C* разряжается через цепь с одновитковой катушкой индуктивности *L*, когда переключатель *S* находится в закрытом состоянии. Ток разряда индуцирует однонаправленные вихревые токи в притягивающем экране 2 и заготовке из листового металла 3. Экран 2 жестко установлен на изолированной пластине инструмента. В соответствии с законом Ампера ток, индуцированный в заготовке 3 из листового металла, будет притягиваться к току, индуцированному на рабочей поверхности экрана 2. Необходимо подчеркнуть обязательное условие для работы индукторных систем с притягивающим экраном. Согласно закону Ампера, сила притяжения между металлической листовой заготовкой и экраном с однонаправленными токами возможна только в режиме интенсивного проникновения полей через заготовку и экран. Эффективность процесса притяжения определяется интенсивностью поля, проникающего через листовую заготовку. Схема сил показана на рис.4.

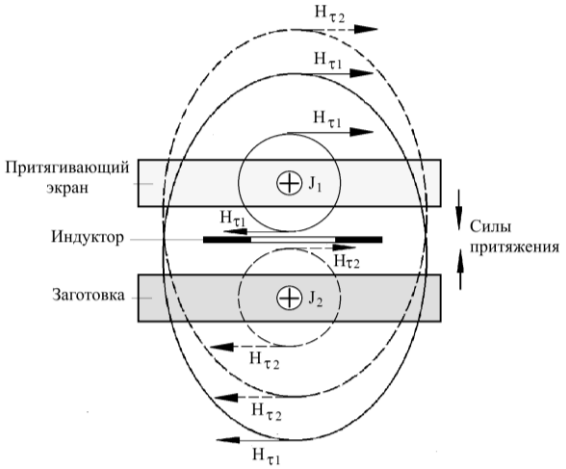


Рис.4. Схема физических процессов в индукторной системе с притягивающим экраном
$J_{1,2}$ – однонаправленные токи, индуцированные в экране и заготовке, $H_{\tau 1,2}$ – касательные компоненты напряженности магнитного поля, возбуждаемые токами $J_{1,2}$.

Чтобы добиться эффективной работы индукторной системы с притягивающим экраном, токи, индуцированные в заготовке листового металла и в притягивающем экране, должны быть идентичны по частоте и амплитуде. Это может быть достигнуто путем изготовления экрана примерно из того же материала и такой же толщины, что и листовая заготовка. Подробное математическое описание обсуждаемого процесса магнитно-импульсного притяжения можно найти в работах авторов статьи.

Выводы. Раскрыты особенности традиционных методов магнитно-импульсной обработки металлов, классическая схема которых заключается в создание электродинамических усилий с целью давления обрабатываемого металлического объекта на формовочную матрицу. Рассмотрен принцип действия основного оборудования и обозначена

© Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.

область его применения. При достаточно высокой частоте сигнала, позволяющей индуцировать ток на поверхности заготовки (глубина проникновения поля не превышает поверхностного слоя), ток в индукторе отличается от тока в заготовке на ~ π, что обуславливает эффект отталкивания. В случае относительно низкой частоты (глубина проникновения поля превышает толщину заготовки), ток в индукторе отличается от тока в заготовке на ~ π/2, что позволяет перейти от отталкивания к притяжению. Введение дополнительного притягивающего экрана в классическую схему инструмента магнитно-импульсной обработки металлов позволяет создать в обрабатываемом объекте и дополнительном экране токи, совпадающие по фазе, что позволяет притягивать как ферромагнитные, так и не магнитные металлы (закон Ампера). Для более эффективного притяжения, как ферромагнитных, так и не магнитных металлов, экран и заготовка должны быть изготовлены из одинаковых металлов для индуцирования в них максимально близких как по фазе, так и по амплитуде токов.

Информационные источники

1. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. //Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2013. # 213 (3), pp. 444–452.

2. Furth, H.P. 1965. Devices for Metal Forming by Magnetic Tension. US Patent 3,196,649.

3. Hansen, K.A., Hendrickson, I.G., 1976. Electromagnetic Dent Pooler. US Patent 3,998,081.

4. Hansen, K.A., Hendrickson, I.G., 1979. Electromagnetic Force Machine with Universal Portable Power Supply. US Patent 4,148,091.

5. Hansen, K.A., Hendrickson, I.G., 1991. Electromagnetic Dent Remover with Tapped Work Coil. US Patent 4,986,102.

6. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхвысокого импульсного тока. – Л.: Энергоиздат, 1997, 199 с.

7. O'Dell, D.W., 1988. Electromagnetic Dent Removing Tool. US Patent 4,754,637.

8. Batygin, Y. V., Lavinskiy, V.I., Khimenko, L.T., 2004. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting Magnetic Field. In: Proceedings of the 1st International Conference on High Speed Forming, Dortmund, pp. 157-160.

9. Батигін Ю. В., Лавінський В.І., Хавін В.Л., 2006. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготівок. Патент України 74909.

10. Meichtry, R., 2006. Dent Removing Method and Device. International Patent Application WO2006/119661 A1.

11. Batygin Y.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. – Fundamentals and perspective applications // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier. – 2014. #214 (2), pp. 390–401.

12. Psyk V. Electromagnetic Forming / V. Psyk, D. Rich, B. I. Kinsley, A. E. Tekkaya, M. Kleiner // Journal of Material Processing Technology. 211(2011), pp. 787-829.

13. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник магнитно-импульсной обработки металлов. – Харьков: Высш. шк. 1977. - 189 с.

Чаплигін Є.О., к.т.н., Шиндерук С.J, к.т.н., Єрьоміна О.Ф, к.т.н., Коряк О. О., к.т.н.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ПРИТЯГАННЯ НЕМАГНІТНИХ МЕТАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЯХ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

Практичний інтерес до магнітно-імпульсної обробки металів обумовлений потребою в створенні обладнань, що дозволяють відновлювати деталі з листового металу, усувати вм'ятини на поверхні з зовнішнього боку, без розбирання конструкції. Проведений аналіз описаних раніше пристосувань показав, що всі вони мають певні недоліки і обмеження. У пропонованій роботі обґрунтована можливість створення електротехнічних систем для притягання металів немагнітної природи за допомогою низькочастотного електромагнітного поля і односпрямованих струмів, індукованих у заготовці та екрані, що притягує. Розглянуто залежність різниці фаз в індукторі і заготовці від частоти сигналу. Обґрунтовано введення в класичну схему інструменту магнітно-імпульсної обробки металів додаткового екрану, що притягує. Це дає можливість створити в оброблюваному об'єкті і додатковому екрані струми, які збігаються за фазою, що дозволяє притягувати як феромагнітні, так і немагнітні

© Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.

метали. Показано, що з метою більш ефективного притягання екран і заготовка повинні бути виготовлені з однакових металів для індукування в них максимально близьких як за фазою, так і за амплітудою струмів.

Ключові слова*: магнітно-імпульсна обробка, індуктор, екран, що притягує, індукований струм.*

E. Chaplygin, Ph.D., S. Shynderuk, Ph.D., E. Yeryomina, Ph.D., A. Koryak, Ph.D.
Kharkov national automobile-highway university

ATTRACTION OF NONMAGNETIC METALS IN TECHNOLOGIES OF MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF METAL

Practical interest in magnetic-pulse processing of metals is caused by the need to create devices that allow the restoration of sheet metal parts, to remove dents on the surface from the outside, without disassembling the structure. An analysis of the previously described devices showed that they all have certain drawbacks and limitations. In the proposed work, the possibility of creating electrotechnical systems for the attraction of metals of a nonmagnetic nature with the help of a low-frequency electromagnetic field and unidirectional currents induced in a blank and an attracting screen is substantiated. The dependence of the phase difference in the inductor and the workpiece on the frequency of the signal is considered. The introduction of an additional attractive screen into the classical scheme of the tool for magnetic-pulse processing of metals is substantiated. This makes it possible to create in the object being processed and in the additional screen the currents that coincide in phase, which makes it possible to attract both ferromagnetic and non-magnetic metals. It is shown that for the purpose of more effective attraction, the screen and the blank have to be manufactured of identical metals to induce in them as the closest as it possible both in phase and in amplitude currents.

Key words: *magnetic-pulse processing, inductor, attracting screen, induced current.*

Стаття надійшла до редакції 12.05.2018.

© Чаплыгин Е.А., к.т.н., Шиндерук С.А, к.т.н., Еремина Е.Ф, к.т.н., Коряк А.А., к.т.н.

УДК 621.787
Швець С. В., к.т.н., Криворучко Д. В., д.т.н.
Сумський державний університет

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУЮВАННЯ ПРОТЯЖОК З ВИКОРИСТАННЯМ CAD/CAM–СИСТЕМ

Різноманітність конструктивних особливостей деталей і технологічних процесів потребує при проектуванні протяжок інтелектуальних підходів, що стримує розробку єдиних алгоритмів для беззастережного використання CAD/CAM – систем. Мета роботи полягає у створені математичних моделей для розрахунку окремих конструктивних елементів протяжок та визначення можливостей творчих підходів при їх проектуванні. При автоматизації процесу проектування виникає необхідність заміни деякої функції, заданої дискретною множиною точок, іншою, безперервною функцією. Такий вид апроксимації використаний при встановлені математичної залежності сили різання від підйому на зуб та параметрів стружкової канавки від кроку зубів. Запропоновані формули для визначення кількості чистових зубів та припуску для чистової секції. При проектуванні протяжки виникає необхідність порівняння альтернатив, що вимагає втручання людини і тому не може бути повністю автоматизованим. Інтерполяція залежності питомої сили різання від підйому на зуб, апроксимація дискретних значень параметрів стружкової канавки залежно від кроку, формули, які дозволяють, залежно від якості обробленої поверхні, визначити кількість зубів і припуск для чистової секції, підвищують ступінь автоматизації проектування протяжки.

Ключові слова: *апроксимація, подача, питома сила різання, альтернатива, алгоритм, крок, припуск.*

Вступ. Протяжки – це багатозубий металорізальний інструмент, що здійснює процес зрізування шарів металу за відсутності руху подачі за рахунок перевищення ширини або висоти наступного зуба відносно ширини або висоти попереднього [1 – 8]. Протяжки отримали значне поширення головним чином у масовому і багатосерійному виробництвах внаслідок того, що вони: дозволяють одержувати високу точність і якість обробки при низькій кваліфікації робітників; мають високу стійкість; дуже економічний інструмент (складова інструменту, яка входить до собівартості деталі, відносно невелика) і один із найпродуктивніших різальних інструментів.

Проектування протяжки є ітераційним процесом, тому що не усі його складові можна автоматизувати [6, 7]. Різноманітність конструктивних особливостей деталей і технологічних процесів потребує інтелектуальних підходів, що також стримує розробку єдиних алгоритмів для беззастережного використання CAD/CAM–систем при проектуванні протяжок. Проте, незважаючи на складнощі при спробі повної автоматизації цього процесу, є можливість автоматизувати деякі його частини, чому і присвячується ця стаття.

Мета роботи полягає у створені математичних моделей визначення окремих конструктивних елементів протяжок та визначення можливостей творчих підходів при їх проектуванні.

1. Використання інтерполяції. При автоматизації процесу проектування виникає необхідність заміни деякої функції $f(x)$ іншою функцією $\varphi(x)$, яка називається апроксимуючою. Якщо функція $f(x)$ задана дискретною множиною точок, то така апроксимація називається точковою.

Такий вид апроксимації необхідний при встановлені математичної залежності сили різання від підйому на зуб, конструктивних параметрів стружкової канавки від кроку протяжки, кількості чистових зубів і припуску на чистову секцію від підйому на зуб чорнової секції і вимог до якості обробленої поверхні. Заміна дискретних значень безперервною функцією, яка з заданою точність проходить через усі дискретні точки складає основний вид точкової апроксимації – інтерполяцію.

Сила різання при протягуванні залежить від властивостей оброблюваного матеріалу, товщини і ширини шару, що зрізується, геометрії та затуплення зубів, властивостей змащувально-охолоджувальної рідини і т. ін.

© Швець С. В., к.т.н., Криворучко Д. В., д.т.н.

Сумарна сила різання, яка виникає при протягуванні, може бути розкладена на складові, з яких головною є сила *Pz*, направлена уздовж осі протяжки (уздовж руху різання).

Значення головної складової сили різання використовують при перевірці протяжки на міцність та визначені моделі верстата. Складову *Pz* визначають за формулою [1, 3, 4]

$$P_z = pFz_{\max}, \quad (1)$$

де p – питома сила різання, кг/мм^2;

$F = b \cdot a$ – площа шару, що зрізується одним зубом протяжки, причому $b = \sum_{i>1}^{n} b_i$ – ширина шару, яка дорівнює ефективній довжині різальної кромки одного зуба, a – підйом на зуб;

$z_{\max} = \frac{l_\partial}{t} + 1$ – максимальне число зубів протяжки, що може одночасно перебувати у контакті з оброблюваною деталлю (l_∂ – довжина обробленої поверхні; t - крок зубів протяжки). Тут береться до уваги тільки ціла частина виразу $z_{\max}$, а дріб відкидається.

Таким чином, головна складова сили різання при протягуванні визначається як

$$Pz = paz_{\max} \sum_{i=1}^{n} b_i . \quad (2)$$

Питома сила різання p при протягуванні із зменшенням товщини шару металу, що зрізується, зростає (рис. 1). За літературними даними [3] складені апроксимуючі залежності $p = f(a)$ для різних матеріалів (табл. 1). Це дозволяє підвищити ступінь автоматизації розрахунків робочої частини протяжки. Значення питомих сил різання визначені при звичайно рекомендованих передніх і задніх кутах зубів протяжки, складі змащувально-охолоджувальної рідини і при зношенні зубів по задній поверхні у протяжок для обробки отворів до 0,3 мм, у протяжок для зовнішнього протягування до 0,5 мм.

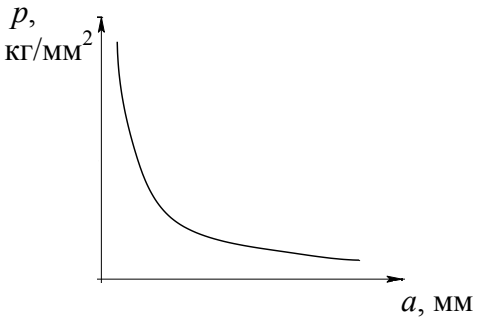


Рис. 1. Залежність питомої сили різання від підйому на зуб

Із діаграми (див. рис. 1) випливає дуже істотний висновок щодо конструювання протяжок: з точки зору зменшення сили протягування вигідніше розробляти протяжки, які зрізують більш товсті шари металу. Але підйом на зуб це основний вихідний параметр проектування, який впливає на забезпечення міцності протяжки.

Таблиця 1

Формули для визначення питомої сили різання p, кг/мм^2, за значенням підйому на зуб a, мм

Матеріал	Твердість	Формула
Вуглецева сталь	$HB < 197$	$p = 104,98a^{-0,413}$
	HB =198-229	$p = 122,31a^{-0,386}$
	$HB > 229$	$p = 157,94a^{-0,345}$
Легована сталь	HB <197	$p = 167,04a^{-0,329}$
	HB =198-229	$p = 176,72a^{-0,337}$
	$HB > 229$	$p = 201,18a^{-0,327}$
Сірий чавун	$HB < 180$	$p = 82,852a^{-0,461}$
	$HB > 180$	$p = 95,99a^{-0,43}$
Ковкий чавун	–	$p = 74,197a^{-0,455}$

Тому змінюючи значення a досягають необхідних конструктивних рішень, і саме формули залежності p від a (табл. 1) сприяють автоматизації цієї частини проекту.

Стружкова канавка протяжки (рис. 2) визначається такими конструктивними параметрами:

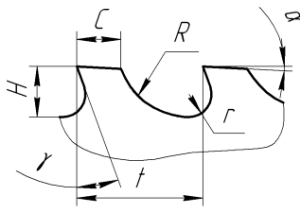


Рис. 2. Форма стружкової канавки

H – глибина стружкової канавки;
C – ширина задньої поверхні;
γ – передній кут;
α – задній кут;
R – радіус спинки зуба;
r – радіус перехідної дуги між передньою поверхнею і спинкою зуба (радіус дна канавки).

Ці параметри, залежно від кроку *t*, визначаються з таблиць довідників [2 – 5]. Це створює незручності з точки зору автоматизації. Але, з іншого боку, значення цих параметрів не є остаточними. Необхідно ще перевірити розміри стружкової канавки через коефіцієнт заповнення *K*. За формулою

$$h_p = 1{,}13\sqrt{Kal_д}\,, \tag{3}$$

де *K* і $l_д$ задані, може бути визначена глибина канавки, достатня для розміщення стружки при вибраному підйомі *a*. Для вільного розміщення стружки необхідно щоб $h_p \le H$. Якщо така нерівність порушується, тоді необхідно змінювати раніше встановлені за таблицями конструктивні параметри стружкової канавки, досягаючи її забезпечення. Зважаючи на цю обставину, немає потреби точно дотримуватись табличних дискретних значень параметрів стружкової канавки. Достатньо мати їх інтерполяцію:

$$H \approx 0{,}42t; \quad R \approx 07t; \quad C \approx 0{,}33t; \quad r = 0{,}5h\,. \tag{4}$$

Для обробки пластичних матеріалів найкращою є стружкова канавка із спинкою зуба, обкресленою дугою кола радіуса *R*. Така форма дає плавне сполучення дна канави із спинкою, забезпечує добре формування стружки у щільний вал і збільшує об'єм канавки, не зменшуючи ширину спинки зуба і кількості переточувань протяжки.

При протягуванні крихких матеріалів може застосовуватися форма стружкової канавки з прямолінійною спинкою.

При роботі чорнових зубів на обробленій поверхні утворюються риски, задирки та інші дефекти. Глибина їх приблизно дорівнює підйому на зуб. Товщини того шару металу, який зрізують калібрувальні зуби, не достатньо для усунення перелічених недоліків. Тому, для зменшення глибини дефектів, що створюють чорнові зуби, між калібрувальними та чорновими зубами розміщують чистові зуби. Підйом чистових зубів змінюється. Він поступово зменшується від зуба до зуба (або від групи до групи) у $n = (1{,}5 – 2)$ рази.

Визначити кількість чистових зубів та припуск для чистової секції можна наступним чином. Підйом на *i*-тому чистовому зубі дорівнює

$$a_i = \frac{a}{n^i}\,,$$

де *a* – підйом на чорновій секції.

При цьому підйом на останньому чистовому зубі $a_{\min}$ при шорсткості обробленої поверхні з $Ra = (2{,}5 – 12{,}5)$ повинен бути не більшим 0,02 мм, а при $Ra = (0{,}63 – 2{,}5)$ – не більшим 0,01 мм [3]. За цією умовою можна визначити кількість чистових зубів, $z_{чис}$. Якщо $\frac{a}{n^i} = a_{\min}$, то $n^i = \frac{a}{a_{\min}}$, і тоді, коли $z_{чис} = i$,

$$z_{чис} = \log_n\left(\frac{a}{a_{\min}}\right) = \frac{\ln\left(\frac{a}{a_{\min}}\right)}{\ln n}\,. \tag{5}$$

Припуск на чистову секцію визначається як

$$A_{чис} = a\sum_{i=1}^{z_{чис}} n^{-i}\,. \tag{6}$$

2. Евристична складова проектування. За останнє сторіччя продуктивність праці у промисловості виросла в десятки раз. При цьому в інженерній роботі вона збільшилась приблизно в два рази. Пояснення полягає в тому, що цей вид діяльності належать до «евристичного», а усі інтелектуальні види діяльності не сприймають алгоритмізацію. Це видно на прикладі конструювання задньої напрямної.

Сталою є думка, що задня напрямна запобігає перекошуванню протяжки під час виходу з деталі останніх її зубів і тим самим усуває небезпеку пошкодження обробленої поверхні і поломки зубів [1 – 3].

Поперечний перетин задньої напрямної повинен бути ідентичний поперечному перетину протягнутого отвору [1, 2]. При обробці симетричних отворів може бути також круглим, вписаним у протягнутий отвір (наприклад, як у шліцьових протяжок) [3, 4].

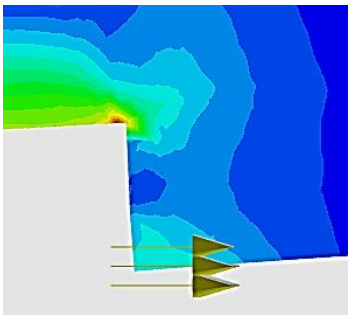


Рис. 3. Концентрація напружень при вигині

Поперечні розміри задньої напрямної не повинні перевищувати найменші допустимі значення відповідних розмірів готового отвору. Тоді задня напрямна може вільно проходити крізь отвір, виготовлений повністю зношеною протяжкою. Якщо цього не дотримуватися, то в деякий момент часу деталь ущільнюється на задній напрямній, система «протяжка – деталь» сприймається як одне ціле і, при наявності значних відхилень від перпендикулярності торця деталі до обробленої поверхні, протяжка згинається і у її тілі виникає значна концентрація руйнуючих напружень (рис.3). Недотримання таких вимог призвело до руйнування протяжки внаслідок вигину (рис. 4).

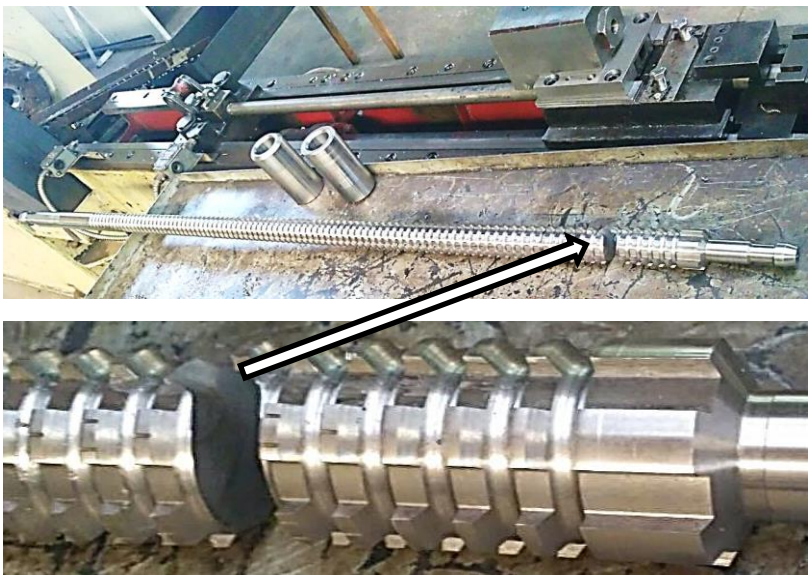


Рис. 4. Руйнування протяжки під час вигину через неперпендикулярність

З метою запобігання непередбачених ускладнень інколи протяжки виготовляють без задньої напрямної (рис. 5). Немає задньої напрямної у шпонкових протяжок, оскільки оброблювана деталь базується на напрямній втулці, що виключає перекошування деталі. Зовнішні протяжки закріплюються на супорті верстата для зовнішнього протягування і також не мають задньої напрямної.

Отже, при проектуванні протяжки виникає необхідність порівняння альтернатив, що вимагає втручання людини в роботу CAD/CAM-систем. Спершу необхідно визначити яка схема різання і який метод утворення поверхні будуть задіяні. Якщо практичний досвід не дає однозначної відповіді, то слід створити декілька конструкцій інструменту і вибрати із них кращу.

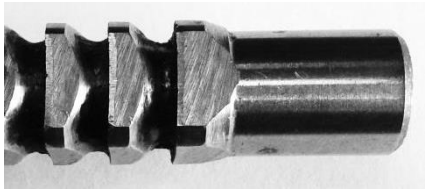


Рис. 5. Протяжка без задньої напрямної

Далі, встановивши величину підйому на зуб, геометрію лез протяжки, використовуючи відомі формули [1 – 5] та формули із табл.1, (4), (5) та (6) знаходять крок зубів, кількість зубів на чорновій, чистовій і калібрувальній секціях, параметри стружкової канавки, довжину протяжки, перевіряють протяжку на міцність. Ця частина проектування може бути автоматизована.

На підставі розрахунків на міцність та технічних характеристик наявного верстата остаточно визначають конструктивні параметри протяжки змінюючи вихідні дані для розрахункової програми. Тобто проектування протяжки альтернативне і ітераційне.

Висновки. Інтерполяція залежності питомої сили різання від підйому на зуб дозволяє підвищити ступінь автоматизації розрахунку протяжки на міцність. Апроксимація дискретних значень параметрів стружкової канавки залежно від кроку протяжки дозволяє задіяти САМ – систему при оптимізації конструкції інструменту. Запропоновані формули дозволяють, залежно від якості обробленої поверхні, визначити кількість зубів і припуск для чистової секції. Процес проектування протяжок не може бути повністю автоматизованим через те, що вимагає інтелектуальної роботи у зв'язку з наявністю операцій вибору.

Інформаційні джерела

1. Кукляк М.Л. Металорізальні інструменти. Проектування / М.Л. Кукляк, І.С. Афтаназів, І.І. Юрчишин – Львів: Львівська політехніка, 2003. – 556 с.
2. Кожевников Д.В. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов, В.И. Кокарев, А.Г. Схиртладзе – Москва: Машиностроение, 2007. – 528 с.
3. Семенченко И. И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко, В М Матюшин, Г. Н. Сахаров. – Москва: Машгиз, 1963. – 949 с.
4. Щеголев А. В. Конструирование протяжек / А. В. Щеголев – Ленинград: Машгиз, 1960. – 352 с.
5. Маргулис Д. К. Протяжки для обработки отверстий /Д. К. Маргулис, М.М. Тверской, В. Н. Ашихмин и др. – Москва: Машиностроение, 1986. – 232 с.
6. Malyadri Akula. Design and analysis of broach tool for splines / Malyadri Akula, K.Chandra Sekhar, Akula Nagendra. – International Journal of Advanced Engineering Technology, vol. IV, 2013. – Pp. 06 – 08.
7. Vogtel P. Automatic Broaching Tool Design by Technological and Geometrical Optimization / P. Vogtel, F. Klocke, D. Lung, S. Terzi. – Procedia CIRP 33, 2015. – Pp. 496 – 501.
8. Vogtel P. Modelling of process forces in broaching Inconel 718 / P. Vogtel, F. Klocke, H. Puls, S. Buchkremer, D. Lung. – Procedia CIRP 8, 2013. – Pp. 409 – 414.

Швец С. В., к.т.н., Криворучко Д. В., д.т.н.
Сумский государственный університет

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕК З ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAD/CAM-СИСТЕМ

Разнообразие конструктивных особенностей деталей и технологических процессов требует при проектировании протяжок интеллектуальных подходов, что сдерживает разработку единственных алгоритмов для безоговорочного использования CAD/CAM – систем. Цель работы заключается в созданные математических моделей для расчета отдельных конструктивных элементов протяжок и определения возможностей творческих подходов при их проектировании. При автоматизации процесса проектирование возникает необходимость замены некоторой функции, заданной дискретным множеством точек, другой, непрерывной функцией. Такой вид аппроксимации использован при создании математической зависимости силы резания от подъема на зуб и параметров стружечной канавки от шага зубьев. Предложены формулы для определения количества чистовых зубьев и припуска для чистовой секции. При проектировании протяжки возникает необходимость сравнения альтернатив, которое требует вмешательства человека, и потому не может быть полностью автоматизированным. Выполнена интерполяция зависимости удельной

© Швець С. В., к.т.н., Криворучко Д. В., д.т.н.

силы резания от подъема на зуб, аппроксимация дискретных значений параметров стружечной канавки в зависимости от шага. Предложены формулы, которые позволяют определить количество зубьев и припуск для чистовой секции.

Ключевые слова: *аппроксимация, подача, удельная сила резания, альтернатива, алгоритм, шаг, припуск*

Shvets S. V., PhD, Kryvoruchko D. V., Dr. Sci
Sumy state university

FEATURES OF DESIGNING BROACH TOOL WITH USE CAD/CAM – SYSTEMS

Broach tool – the special tool, is projected and produced for processing of details of one form in mass and multiseries manufactures. The work purpose consists in created mathematical models for calculation of separate constructive elements broach tool and definitions of possibilities of creative approaches at their designing. At creation of mathematical dependence of force of cutting from lifting on tooth and parametres of a flute for a shaving from a step of teeth replacement of the functions set by discrete sets of points, is executed by continuous functions. Formulas for definition of quantity of fair teeth and an allowance for fair section are offered. On an example designing of the rear pilot is shown value of an intellectual kind of activity. At designing протяжки there is a necessity of comparison of alternatives which demands intervention of the person and consequently cannot be completely automated. Interpolation of dependence of specific force of cutting from lifting on tooth, approximation of discrete values of parametres of a flute for a shaving depending on a step is executed. Formulas which allow to define quantity of teeth and an allowance for fair section are offered.

Keywords: *approximation, feed, specific force of cutting, alternative, algorithm, step, rough tolerance*

Стаття надійшла до редакції 12.04.2018.

© Швець С. В., к.т.н., Криворучко Д. В., д.т.н.

УДК 681.142

Яремчук[1] Н. А. к.т.н. проф., Года[2] О. Ю. к.т.н. старший викладач
[1,2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОЦІНЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ СКЛАДНИХ ОБЄКТІВ ЗА ЇХ ОРДИНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Запропоновано спосіб підвищення точності визначення комплексного показника якості за умови, що одиничні показники якості є ординальними величинами, з використанням оператора агрегування – медіани Уолша. Розроблено процедуру оцінювання невизначеності отриманого комплексного показника. Показано, що використання медіани Уолша дозволяє зменшити невизначеність оцінки комплексного показника якості.

***Ключові слова**: комплексний показник якості, невизначеність, медіана Уолша*

Розроблення, вибір і використання високоякісних продуктів супроводжується оцінкою їх якості. Точність оцінювання характеристик якості є в певній мірі запорукою отримання відповідної оцінки якості. Модель оцінювання якості складного об’єкта є ієрархічною. Верхній рядок цієї структури складають декілька головних характеристик. При агрегуванні підхарактеристик, що входять до складу характеристик, враховуються вагові коефіцієнти, які характеризують їх важливість. Підхарактеристики можна вимірювати або оцінювати за внутрішніми або зовнішніми метриками [1-5]. Метрики в свою чергу можуть безпосередньо вимірюватись і оцінюватись або складатись з оцінюваних елементів. Якщо за приклад складного об’єкта взяти програмний продукт, то характеристиками зовнішньої та внутрішньої якості є функціональність, надійність, зручність використання, ефективність, супроводжуваність, мобільність. В свою чергу кожна з цих характеристик складається з підхарактеристик. Наприклад, характеристика «Зручність використання» складається з підхарактеристик : зрозумілість, опановність, керовність, привабливість, відповідність нормам зручності використання. За відношеннями між проявами властивостей, які відображають наведені вище характеристики і підхарактеристики, видно, що їх значна частина відповідає ординальним властивостям. Тому в роботі [6] для їх агрегування запропоновано використати медіану. Якщо для оцінювання характеристики якості комплексного показника якості прийняти чотирьохрівневу систему [7]: оцінювані елементи, метрики, підхарактеристики якості, характеристики якості, тоді оцінювання якості розпочинається з об’єднання оцінюваних елементів в метрику [6]:

$$M_{ji} = \mathrm{Med}(z_{jiL}), \tag{1}$$

де M_{ji} - і-та метрика j-ї підхарактеристики, визначена за L одиничними показниками (оцінюваними елементами) якості z_{jiL}.

Далі визначається підхарактеристика K_j, що знаходиться як медіана зважених метрик M_{ji} з врахуванням їх кількості:

$$K_j = \mathrm{med}\left\{nV_{ji}\, M_{ji}\right\}, \tag{2}$$

де n – кількість метрик M_{ji} ($i = 1..n$), що входять до складу j-того комплексного показника K_j з ваговими коефіцієнтами V_{ji}, $\sum_{i=1}^{n} V_{ji} = 1$.

Агрегування критеріїв при оцінюванні характеристики якості Ф:

$$\Phi = \mathrm{med}\left\{q\rho_j\, K_j\right\}, \tag{3}$$

де q – кількість підхарактеристик K_j ($j = 1..q$), що входять до складу комплексного показника Ф з ваговим коефіцієнтом ρ_j, $\sum_{j=1}^{q} \rho_j = 1$.

© Яремчук[1] Н. А. к.т.н. проф., Года[2] О. Ю. к.т.н. старший викладач

В роботі [6] було запропоновано спосіб визначення загальної невизначеності комплексного показника якості, що складається з невизначеності агрегування за медіаною і невизначеності окремих оцінюваних елементів, що були використані при обчисленні медіани.

Але, як показав аналіз застосування медіани, невизначеність оцінювання характеристик якості була значною, що в ряді випадків викликало труднощі в порівнянні і виборі належних програмних продуктів за якістю.

Постановка задачі. Підвищити точність визначення характеристик якості за умови, що оцінювані елементи або метрики відповідають ординальним властивостям. Для підвищення точності оцінювання комплексного показника якості запропоновано використати медіану Уолша.

Виклад основного матеріалу. 1. Використання медіани Уолша для визначення комплексного показника якості. Для підвищення точності визначення комплексного показника якості як оператор агрегування використано медіану Уолша.

Для визначення комплексного показника якості спершу встановлюється ієрархічна структура показників якості. А саме, визначаються характеристики, підхарактеристики, метрики та оцінювані елементи, що їм відповідають, а також вагові коефіцієнти всіх рівнів. Оцінювання починається з нижніх рівнів - оцінюваних елементів, що характеризують ординальні властивості складного об'єкту. Найчастіше їх значення отримують за допомогою експертного оцінювання.

Для отримання метрик, що складаються з вибірки оцінюваних елементів $z_{ji1},...,z_{jiL}$ будують $N=\frac{L\cdot(L+1)}{2}$ нових випадкових величин $Y_k=\frac{1}{2}(z_{jim}+z_{jil}), m\le l$ (їх називають середніми Уолша). Сама ж метрика знаходиться як медіана отриманих середніх Уолша:

$$M_{ji}=medW(Y_1,...,Y_N) \tag{4}$$

Підхарактеристики отримують за агрегуванням метрик, а саме визначення медіани з середніх Уолша, що знаходяться за зваженими метриками M_{ji} з врахуванням їх кількості:

$Y_j=\frac{1}{2}(nV_{ji}M_{ji}+nV_{jk}M_{jk})$, $i\le k$, де n – кількість метрик M_{ji} $(i=1..k..n)$, що входять до складу j-того комплексного показника K_j з ваговими коефіцієнтами V_{ji}, $\sum_{i=1}^{n}V_{ji}=1$. Підхарактеристики отримують:

$$K_j=medW\{Y_1,...,Y_j\}, \tag{5}$$

Аналогічно проводиться агрегування підхарактеристик при оцінюванні характеристик Ф:

$$\Phi=medW\{Y_1,...,Y_x\}, \tag{6}$$

де $Y_x=\frac{1}{2}(q\rho_jK_j+q\rho_hK_h)$ - середні Уолша, що знаходяться за зваженими підхарактеристиками K_j $(j=1..h..q)$ з врахуванням їх кількості q, що входять до складу комплексного показника Φ з ваговими коефіцієнтами ρ_j, $\sum_{j=1}^{q}\rho_j=1$.

2. Оцінювання невизначеності комплексного показника якості, отриманого за медіаною Уолша. Сумарна невизначеність метрики складається з невизначеності агрегування оцінюваних елементів в метрику за медіаною Уолша і розповсюдження невизначеності окремих оцінюваних елементів, що були використані в обчисленні медіан Уолша. Комбінована (сумарна) невизначеність оцінювання метрики, становить:

$$u_c(M_{ji})=\sqrt{\sigma_a^2(M_{ji})+\sigma_c^2(M_{ji})} \tag{7}$$

де $\sigma_a(M_{ji})$ - СКВ агрегування оцінюваних елементів в метрику за медіаною Уолша, $\sigma_c^2(z_{jil})$ - сумарна дисперсія оцінюваних елементів, що враховувались при визначенні медіани Уолша. Якщо:

N– парне, то

$$\sigma_c^2(\mathrm{M_{ji}}) = (u^2(\mathrm{Y}_{N/2}) + u^2(\mathrm{Y}_{N/2+1}))/4,$$

N- не парне, то

$$\sigma_c^2(\mathrm{M_{ji}}) = u^2(\mathrm{Y}_{(N+1)/2}). \quad (8)$$

де $u(\mathrm{Y}_{N/2})$ - невизначеність середнього Уолша, що знаходиться як півсума невизначеностей відповідних оцінюваних елементів:

$$u^2(\mathrm{Y_N}) = (u_i^2(\mathrm{z_{jil}}) + u^2_{i+1}(\mathrm{z_{jil}}))/4 \quad (9)$$

СКВ агрегування $\sigma_a(\mathrm{M_{ji}})$ оцінюваних елементів за медіаною Уолша по аналогії з медіаною знаходиться за довірчим інтервалом медіани. Медіана Уолша також є непараметричною оцінкою і характеристикою її точності є границі довірчого інтервалу за номерами порядкових статистик середніх Уолша, в яких знаходиться медіана Уолша за певної ймовірності.

При кількості середніх Уолша $\mathrm{n} > 10$ застосовуються порядкові статистики $\mathrm{Y_B}$ та $\mathrm{Y_H}$, що знаходяться з заздалегідь проранжованого ряду середніх Уолша за номерами В та Н:

Для нижньої границі $\mathrm{H} = \mathrm{E}[(\mathrm{L} + 1 - \mathrm{z_p} \cdot \sqrt{\mathrm{L}})/2]$,

для верхньої границі $\mathrm{B} = \mathrm{E}[(\mathrm{L} + 2 + \mathrm{z_p} \cdot \sqrt{\mathrm{L}})/2]$,

(10)

де $\mathrm{E}[.]$ - ціла частина чисел в дужках.

Границі довірчого інтервалу медіани Уолша Δ_p (що відповідає ймовірності P) знаходять за порядковими статистиками ранжованої вибірки середніх Уолша:

- нижня границя $\Delta_\mathrm{H} = \mathrm{medW} - \mathrm{Y_H}$,
- верхня границя $\Delta_\mathrm{B} = \mathrm{Y_B} - \mathrm{medW}$.

Якщо розглядати довірчий інтервал медіани як вкладений інтервал [11], що відповідає ймовірності P, тоді СКВ розраховується:

$$\sigma_a(\mathrm{M_{ji}}) = \frac{\Delta_\mathrm{p}}{\sqrt{-2\ln(1-\mathrm{P})}}, \quad (11)$$

де $\Delta_\mathrm{p} = \max\{\Delta_\mathrm{B}; \Delta_\mathrm{H}\}$ - максимальна границя, що відповідає ймовірності знаходження медіани Уолша P в межах $\{\Delta_\mathrm{B}; \Delta_\mathrm{H}\}$.

При невеликій кількості середніх Уолша $\mathrm{n} < 10$ доцільно використовувати формулу для обчислення ймовірності знаходження медіани в інтервалі двох порядкових статистик [10], яка наведена нижче:

$$\mathrm{P}(\mathrm{z(k)} < \mathrm{z}_{0,5} < \mathrm{z(N-k+1)}) = 2 \cdot \sum_{\mathrm{i=k}}^{\mathrm{N}} \mathrm{C_N^i} \cdot \mathrm{p^i} \cdot (1-\mathrm{p})^{\mathrm{N-i}} - 1, \quad (12)$$

або використати таблицю 1 значень ймовірності [10].

Таблиця 1

Значення ймовірностей знаходження медіани в довірчому інтервалі Н- нижня границя, В- верхня границя

n / **Границі за номерами поряд. статистик**	**2**	**3**	**4**
Н=1 та $\mathrm{B = N}$ Для медіани Уолша	0,75	0,969	0,998
Н=2, $\mathrm{B = N-1}$ Для медіани Уолша	-	-	0,869

Комбіновану стандартну невизначеність отримання підхарактеристики знаходимо:

$$u_c(K_j) = \sqrt{\sigma_a^2(K_j) + \sigma_c^{\,2}(K_j)}\ , \qquad (13)$$

де $\sigma_a(K_j)$ - СКВ агрегування метрик в підхарактеристику за медіаною Уолша (2), $\sigma_c^{\,2}(K_j)$ - сумарна дисперсія метрик, що враховувались при визначенні медіани Уолша, $\sigma_c(K_j)$ - сумарна дисперсія метрик (з ваговими коефіцієнтами), що враховувались при визначенні медіани Уолша: $\sigma_c^2(K_j) = \sum_{i=1}^{n} V_{ji}^2 u_c^2(M_{ji})$ з урахуванням парної і не парної кількості середніх Уолша.

Аналогічним чином розраховується сумарна стандартна невизначеність характеристики:

$$u_c(\Phi) = \sqrt{\sigma_a^2(\Phi) + \sigma_c^{\,2}(\Phi)} \qquad (14)$$

де $\sigma_a(\Phi)$ - СКВ агрегування підхарактеристик в характеристику за медіаною Уолша (3), $\sigma_c^{\,2}(\Phi)$ - сумарна дисперсія підхарактеристик, що враховувались при визначенні медіани Уолша: $\sigma_c^2(\Phi) = \sum_{i=1}^{q} \rho_j^2 u_c^2(K_j)$ з урахуванням парної і не парної кількості середніх Уолша.

3. Приклад визначення комплексного показника якості за медіаною Уолша з невизначеністю. Для демонстрації запропонованого способу визначення комплексного показника якості за медіаною Уолша з характеристикою невизначеності використана ієрархічна структура комплексного показника якості «Супроводжуваність», наведена в [7] і на рис. 1, де значення оцінюваних елементів та вагові коефіцієнти метрик та підхарактеристик отримані за допомогою експертного оцінювання.

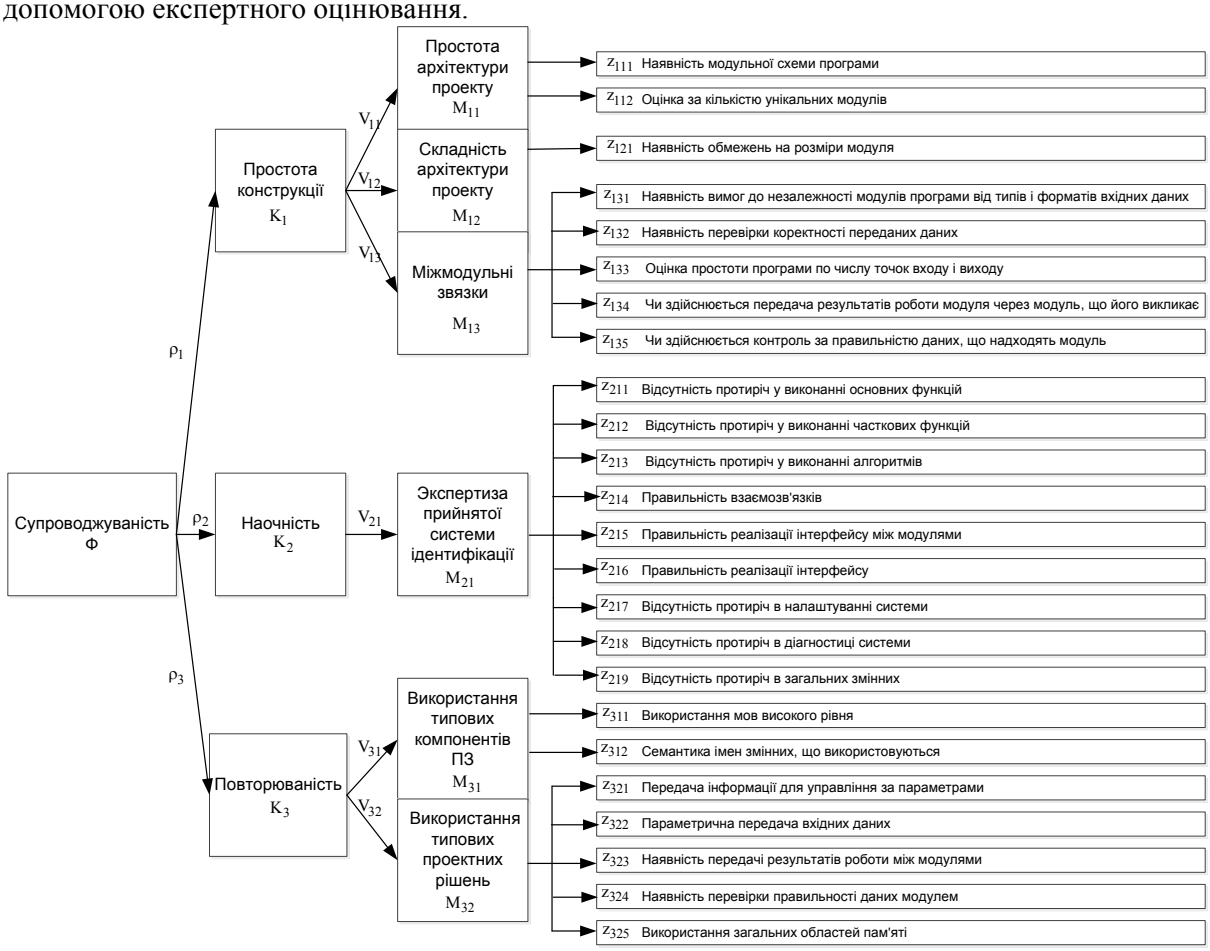


Рис. 1. Ієрархічна структура комплексного показника якості – фактора «Супроводжуваність».

У випадку, коли одинюваний ПЯ визначають за експертним оцінюванням, тоді стандартна невизначеність складається зі невизначеності від обмеженої розрізняльної здатності шкали експертного оцінювання і невизначеності від розбіжності оцінок експертів, якщо їх декілька. В [12] показано, що розрізняльна здатність при шкалі експертного оцінювання 0-1

становить приблизно ± 0.1. Якщо результати отримано від одного експерта, тоді для рівномірного розподілу стандартна невизначеність становить:

$$u(z_{jil}) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.06 \qquad (15)$$

Дані для розрахунку комплексного показника якості рис. 1 отримані за експертним оцінюванням і наведені в таб. 3.

Для порівняння результатів оцінювання за медіаною та медіаною Уолша вихідні дані значень оцінюваних елементів і вагових коефіцієнтів прийняті однаковими таб. 2 та 3.

Для отримання першої метрики M_{11} за табл. 3 необхідно об'єднати 2 оціночних елемента з експертними оцінками $(z_{111}, z_{112}) = (0{,}7;\ 0{,}8)$. Середні Уолша будуть дорівнювати $(Y_{111},..., Y_{113}) = (0{,}7;\ 0.75; 0{,}8)$ Значення метрики за медіаною Уолша складає: $M_{11} = \mathrm{medW}(0{,}8; 0{,}75; 0{,}7) = 0{,}75$.

Сумарну (комбіновану) стандартну невизначеність $u_c(M_{11})$ метрики M_{11} знаходимо за формулою (7), де СКВ агрегування обчислюється за формулою (11), $\Delta_p = Y_{113} - \mathrm{medW} = \mathrm{medW} - Y_{111} = 0{,}05$, $P(Y_{111} \le \mathrm{medW} \le Y_{113}) = 0.75$ (за табл.1), $\sigma_a(M_{11}) = 0.05/\sqrt{-2\ln(1-0.75)} = 0.03$. Сумарна дисперсія середніх Уолша за умови, що стандартна невизначеність всіх оцінюваних елементів становить $u(z_{jil}) = 0.06$, дорівнює (формули 8 та 9) $u_c^2(z_{jil}) = 0.0018$. Тоді $u_c(M_{11})$ дорівнює 0,052. Отриманий результат оцінювання метрики і її стандартної невизначеності вносимо до відповідної комірки бюджету невизначеності (таб.3) і поступово порівнюємо з відповідними даними у комірках таб.2 при використанні оператора агрегування медіани.

Метрика M_{12} складається з одного оціночного елемента, тому $M_{12} = 0{,}9$, а стандартна невизначеність метрики за формулою (15) дорівнює $u_c(M_{12}) = 0.06$.

Для обчислення метрики M_{13} використовується ряд з 15-ти середніх Уолша $M_{13} = \mathrm{med}\{0.7; 0.7; 0.7; 0.75; 0.75; 0.8; 0.8; 0.8, 0.8, 0.8, 0.85; 0.85; 0.9; 0.9; 0.9\} = 0.8$. Для ймовірності $P(Y_H \le \mathrm{medW} \le Y_B) = 0.95$ отримуємо номери порядкових статистик $B = 4$ та $H = 12$ (формула 10), за якими визначаємо границі $Y_H = 0{,}75$, $Y_B = 0{,}85$. Тоді довірчий інтервал медіани Уолша, що відповідає ймовірності P=0,95 становить 0,05 і СКВ агрегування $\sigma_a(M_{13}) = 0.02$. Дисперсія оцінюваних елементів становить $\sigma_c^2(M_{13}) = 0.0018$, а сумарна стандартна невизначеність метрики M_{13} складає $u_c(M_{13}) = 0.047$. Отримані дані вносяться до відповідних комірок бюджету невизначеності (таб.3) аналогічні розрахунки проведено для метрик M_{21}, M_{31}, M_{32}. Результати наведені в табл.3.

Перехід від метрик до підхарактеристик виконується як об'єднання метрик з відповідними ваговими коефіцієнтами (формула 5):

$$K_1 = \mathrm{medW}(3\cdot 0.5\cdot 0.75;\ 3\cdot 0.2\cdot 0.9; 3\cdot 0.3\cdot 0.8) =$$
$$\mathrm{med}\{0.54; 0.63; 0.72; 0.83; 0.92; 1.1\} = 0.78$$

Для розрахунку невизначеності формулу для підхарактеристики K_1 можна представити як: $K_1 = \frac{n}{2}(V_{13}M_{13} + 0.5V_{12}M_{12} + 0.5V_{11}M_{11})$, тоді СКВ складової невизначеності розповсюдження невизначеності метрик можна подати як:

$$\sigma_c(K_1) = \frac{n}{2}\sqrt{V_{13}^2 u_c^2(M_{13}) + 0.25V_{12}^2 u_c^2(M_{12}) + 0.25V_{11}^2 u_c^2(M_{11})} = 0.030.$$

Середнє квадратичне відхилення похибки від агрегування доцільно використовувати за інтервалом медіани $0{,}63 \le \mathrm{medW} \le 0{,}92$ з довірчою ймовірністю P=0,75. Тоді $\Delta_p = 0{,}15$, а

$\sigma_a[K_1] = 0.090$. Тоді сумарна стандартна невизначеність підхарактеристики K_1 становить $u_c(K_1) = 0,095$.

Підхарактеристика K_3 визначається за метриками M_{31} та M_{32} як $K_3 = \text{medW}(2 \cdot 0.2 \cdot 0.85;\ 2 \cdot 0.8 \cdot 0.80) = \text{med}\{0.34; 0.81; 1.28\} = 0.81$. СКВ складової невизначеності підхарактеристики від розповсюдження невизначеності метрик M_{31} та M_{32} становить:

$$\sigma_c(K_3) = \frac{1}{2}\sqrt{V_{31}^2 u_c^2(M_{31}) + V_{32}^2 u_c^2(M_{32})} = 0.0195.$$

СКВ агрегування метрик в критерій дорівнює $\sigma_a[K_3] = 0.28$. Велике значення СКВ агрегування пояснюється великою розбіжністю значень зважених метрик при їх невеликій кількості. Сумарна стандартна невизначеність підхарактеристики K_3 становить $u_c(K_3) = 0,283$.

Агрегування підхарактеристик K_1, K_2, K_3 в характеристику відбувається наступним чином

$$\Phi = \text{medW}(3 \cdot 0.3 \cdot 0.78; 3 \cdot 0.4 \cdot 0.5; 3 \cdot 0.3 \cdot 0.81) =$$
$$= \text{med}\{0.60; 0.65; 0,66; 0.70; 0.72; 0.73\} = 0.68$$

Для обчислення невизначеності формулу визначення характеристики можна представити як $\Phi = \frac{q}{2}(0.5\rho_3 K_3 + 0.5\rho_2 K_2 + \rho_1 K_1)$, тоді СКВ складової невизначеності характеристики від розповсюдження невизначеності підхарактеристики отримуємо як:

$$\sigma_c(\Phi) = \frac{q}{2}\sqrt{0.25\rho_3^2 u_c^2(K_3) + 0.25\rho_2^2 u_c^2(K_2) + \rho_1^2 u_c^2(K_1)} = 0.078.$$

СКВ агрегування підхарактеристик в характеристику дорівнює $\sigma_a[\Phi] = 0.0316$. Сумарна стандартна невизначеність характеристики становить $u_c(\Phi) = 0,084$.

Таким чином загальний результат оцінювання характеристики якості $\Phi = 0.683$, $\sigma_\Phi = 0,084$.

Якщо порівняти отримані дані з застосуванням медіани Уолша (таб.3) і медіани, то очевидно, що точність оцінювання комплексного показника якості значно підвищується.

Таблиця 2

Бюджет невизначеності комплексного показника якості за медіаною

Фактор	**Стандартна невизначеність фактору**	**Ваговий Коефіцієнт критерія**	**Критерій**	**Стандартна невизначеність**	**Ваговий коефіцієнт метрики**	**Метрика**	**Сумарна стандартна**	**Значення одиничних ПЯ (оціночних елементів)**
Φ	$u_c(\Phi)$	p_i	K_i	$u_c(K_j)$	V_{ji}	M_{ji}	$u_c(M_{ji})$	z_{jil}
0,65	0,26	0,3	0,72	0,251	0,5	0,75	0,060	0,8 ; 0,7
					0,2	0,90	0.060	0,9
					0,3	0,80	0,073	0,7; 0,9; 0,8; 0,9; 0,7
		0,4	0,50	0,099	1,0	0,50	0,073	0,3; 0,3; 0,4; 0,4; 0,5; 0,6; 0,6; 0,7; 0,7
		0,3	0,81	0,399	0,2	0,85	0,060	0,9; 0,8

					0,8	0,80	0,073	0,9; 0,9; 0,7; 0,8; 0,7

Таблиця 3

Бюджет невизначеності при оцінюванні комплексного показника якості за медіаною Уолша

Фактор	**Стандартна невизначеність оцінювання фактору**	**Ваговий коефіцієнт критерія**	**Критерій**	**Стандартна невизначеність оцінювання критерію**	**Ваговий коефіцієнт метрики**	**Метрика**	**Стандартна невизначеність оцінювання метрики**	**Значення одиничних ПЯ (оціночних елементів)**
Φ	$u_c(\Phi)$	p_i	K_i	$u_c(K_j)$	v_{ji}	M_{ji}	$u_c(M_{ji})$	z_{jil}
0,68	0,08	0,3	0,78	0,095	0,5	0,75	0,052	0,8 ; 0,7
					0,2	0,90	0,060	0,9
					0,3	0,80	0,047	0,7; 0,9; 0,8; 0,9; 0,7
		0,4	0,5	0,047	1	0,50	0,047	0,3; 0,3; 0,4; 0,4; 0,5; 0,6; 0,6; 0,7; 0,7
		0,3	0,81	0,283	0,2	0,85	0,052	0,9; 0,8
					0,8	0,80	0,047	0,9; 0,9; 0,7; 0,8; 0,7

Висновки. В роботі представлено спосіб оцінювання комплексного ПЯ за ієрархічною структурою ПЯ складного об’єкта при використанні операторів агрегування ПЯ: медіани та медіани Уолша.

Запропоновано використовувати медіану Уолша для підвищення точності оцінювання комплексного ПЯ за одиничними ПЯ, що характеризують ординальні властивості складного об’єкта..

Розглянуто спосіб оцінювання невизначеності комплексного ПЯ, що супроводжується прикладом. Для демонстрації підвищення точності при застосуванні медіани Уолша наведено бюджет невизначеності при використанні медіани.

Список літератури

1. Інформаційні технології. Оцінювання програмного продукту. Частина 1. Загальний огляд (ISO/IEC 14598 -1:1999, IDT): ДСТУ ISO/ IEC 14598-1:2004 –[Чинний від 2006-04-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2006.–17с. –(Національний стандарт України).

2. Програмна інженерія. Якість продукту. Частина 1. Модель якості (ISO/IEC 9126-1:2001, IDT): ДСТУ ISO/IEC 9126-1:2013 –[Чинний від 2014-07-01]. –К.: МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ України, 2014. –20 с. –(Національний стандарт України).

3. Програмна інженерія. Якість продукту. Частина 2. Зовнішні метрики (ISO/IEC TR 9126-2:2003, IDT): ДСТУ ISO/IEC TR 9126-2:2008–[Чинний від 2010-07-01].–К.: Держспоживстандарт України, 2011. –85 с.–(Національний стандартУкраїни).

4. Програмна інженерія. Якість продукту. Частина 3. Внутрішні метрики (ISO/IEC TR 9126-3:2003, IDT): ДСТУ ISO/IEC TR 9126-3:2012–[Чинний від 2013-05-01].–К.:МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ України, 2013.–46 с.–(Національний стандарт України).

5. Програмна інженерія. Якість продукту. Частина 4. Метрики якості під час використання (ISO/IEC TR 9126-4:2004, IDT): ДСТУ ISO/IEC TR 9126-4:2012–[Чинний від 2013-05-01].–К.: МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ України, 2013. –49 с. –(Національний стандарт України).

6. Яремчук Н. А., Года О. Ю., Проскин В. В. Оценивание комплексного показателя качества сложного объекта с характеристикой неопределенности тезы докладов XIV Международный научно-технический семинар Неопределенность измерений: научные, нормативные, прикладные и методические аспекты. - UM-2017. –с. 204-205.

7. Оценка качества программных средств. Общие положения.: ГОСТ 28195–89. – [Введ. 01.07.90]. – М.: Изд – во стандартов, 1990. – 30 с.2.

8. International vocabulary of metrology. – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – ICGM, 2012. – 88 p.

9. Лагутин М.Б. Наглядная математичная статистика / М.Б. Лагутин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний.- 2007.- 472с.

10. Редьога О.Ю., Яремчук Н.А. Обчислення невизначеності при експертному оцінюванні вагових коефіцієнтів з використанням медіани Уолша // Системи обробки інформації. – Київ – 2012. – №1(99). – ст. 17-20

11. Солопченко Г.Н. Представление измеряемых величин и погрешностей измерений как нечетких переменных // Измерительная техника. – 2007. - №2. – с. 3-7.

12. Гнатієнко Г.М., Снитюк В.С. Експертні технології прийняття рішень: Монографія. – К.: ТОВ «Маклаут», - 2008. – 444с.

Н. А. Яремчук[1] к.т.н. проф., **О. Ю. Года**[2] к.т.н. старший преподаватель
[1,2] Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ЗА ИХ ОРДИНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Предложен способ повышения точности определения комплексного показателя качества при условии, что единичные показатели качества являются ординальными величинами, с использованием оператора агрегатирования - медианы Уолша. Разработана процедура оценки неопределенности полученного комплексного показателя. Показано, что использование медианы Уолша позволяет уменьшить неопределенность оценки комплексного показателя качества.

Ключевые слова: *комплексный показатель качества, неопределенность, медиана Уолша*

N. YAremchuk[1] , **O. Hoda**[2]
[1,2] National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

WAY TO INCREASE ACCURACY OF EVALUATION OF THE COMPLEX INDICATOR COMPLEX OBJECTS QUALITY FOR THEIR ORDINARY PROPERTIES

The method of increasing the accuracy of the definition the complex quality index is proposed, provided that the single quality indices are ordinal quantities, using the aggregation operator - the Walsh median. The procedure for estimating the uncertainty of the obtained complex indicator has been developed. It is shown that the use of the Walsh median can reduce the uncertainty of the estimation of the complex quality index.

Key words: *complex quality index, uncertainty, median Walsh*

Стаття надійшла до редакції 3.05.2018.

© Яремчук[1] Н. А. к.т.н. проф., Года[2] О. Ю. к.т.н. старший викладач

ДО УВАГИ КОРЕСПОНДЕНТІВ!
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ ДО ЗБІРНИКА«ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ»

1. Наукова стаття повинна мати наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше питань загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); структурований виклад матеріалів дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; чіткі висновки, які відповідають цілям і стану даного дослідження і перспективи подальшої роботи у даному напрямку.

2. Статтю можна подавати українською, російською або англійською мовами. Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 6.0/7.0 і надрукована тільки на лазерному або струменевому принтері на білих листках формату А4 (290х210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати.

3. Параметри сторінки: ліве – 3 см, верхнє, нижнє, праве поле – 2 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.

4. Шапка статті: індекс УДК, прізвища та ініціали авторів, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по лівому краю. Назва статті розміщується на 1 см нижче назви організації, набирається прописними літерами шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру. Анотація має бути розширеною (об’ємом 1000-1200 знаків), повинні містити короткий виклад статті і розміщуються на 1см нижче назви статті, набираються з абзацного відступу 1см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині. Нижче анотацій вказуються ключові слова. Прізвища та ініціали авторів, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова подаються українською, російською та англійською мовами, при чому, анотація мовою статті подається на початку, а прізвище, назва організації, назва статті, анотація, ключові слова іншими двома мовами після інформаційних джерел.

5. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.

6. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифт для формул Symbol; для тексту – Time New Roman Cyr; розмірами: звичайний 12 пт., крупний індекс 7 пт., дрібний індекс 5 пт., крупний символ 18 пт., дрібний символ 12 пт.). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.

7. Наявні ілюстрації розташовувати по тексту, вирівнюючи підписи (Рис. 1. Схема ...) по центру. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі в форматі jpg. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.

8. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (Таблиця 1) – вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці, вирівнюючи по центру.

9. Інформаційні джерела подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.

10. До статті обов’язково додаються відомості про авторів:

- Прізвище, Ім’я, По батькові;
- Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання;
- Наукові інтереси;
- Адреса для листування, телефон.

- Заява на ім'я редакції про те, що стаття не є плагіатом і друкується автором вперше.

Основні наукові напрями:

1. Прилади та системи фізичних та біомедичних технологій.
2. Прогресивні технологічні процеси в машино- та приладобудуванні.
3. Проблеми технологічного менеджменту та сервісного обслуговування медичної техніки.
4. Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології, стандартизація та сертифікація.
5. Проблеми, теорія та практика підготовки фахівців технічного спрямування в контексті євроінтеграції вищої школи України.

Статті приймаються в електронному вигляді – за електронною адресою: **confkptm@gmail.com**, в письмовому вигляді − за поштовою адресою: **43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56, каф. Приладобудування (каб. 40)**, відповідальному редактору В.І. Марчуку постійно протягом року.

Редакція здійснює рецензування статей у такій послідовності:

- перевірка статті на відповідність вимогам;
- прийняття рішення щодо прийому статті;
- інформування авторів про можливість *публікації* та *дозвіл на оплату*.

Статті приймаються *українською*, *російською* *або* *англійською* мовами. Вартість публікації становить **35 грн**. за 1 стор.

Оплата проводиться за реквізитами:
Картка Приватбанку № 5168 7573 4753 6411

В призначенні платежу слід вказати «**За видання статті у збірнику «Перспективні технології та прилади» від (ПІБ)**».

Квитанцію про сплату надіслати у сканованому вигляді за електронною адресою **confkptm@gmail.com**.

Сайт видання **http://www.ptp.pp.ua**

Видання входить до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (наказ МОН України від 22.12.2016 № 1604 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 13 грудня 2016 року»)

Журнал включено до переліку міжнародних наукових видань за номером ISSN 2313-5352

Видання індексується **Google Scholar**

Видання в національній бібліотеці **імені В.І. Вернадського**

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів можна отримати у технічного секретаря – **Марчук Ірини Вікторівни** за тел. **(0332) 26-49-43**, 095-862-18-12, або за електронною адресою: **confkptm@gmail.com**.

ДЛЯ НОТАТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

Комп’ютерний набір: Марчук І.В.
Коректор: Пташенчук В.В.
Технічний редактор: Марчук І.В..
Відповідальний за випуск Марчук В.І.
Друкується в авторській редакції

Здано у виробн. 26.06.2018 р.
Формат 60х84/8. Гарнітура Time New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк арк. 24,5. Обл.-вид. арк. 24,0 Тираж 500 пр. Зам. № 59

Віддруковано у інформаційно-видавничому відділі
Луцького національного технічного університету
43018, Україна, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Свідоцтво Держкомтелерадіо ДК №4123 від 28.07.2011 р.