

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2023**  
**Машинобудівний факультет**

Збірник тез доповідей щорічної  
науково-практичної конференції викладачів, науковців,  
молодих учених, аспірантів та студентів

**24–28 квітня 2023 року**

Електронне видання комбінованого  
використовування на DVD-ROM

м. Запоріжжя

УДК 001.89  
Т39

*Рекомендовано до видання Вченою радою  
Національного університету «Запорізька політехніка»  
(протокол № 9 від 29.05.2023 р.)*

Упорядник: Ніна АНТОНЕНКО

**Редакційна колегія:**

*Вадим ШАЛОМССВ, д-р техн. наук, професор (відпов. ред.)  
Олексій КУЗЬКІН, д-р техн. наук, професор  
Василь ГЛУШКО, канд. техн. наук, доцент  
Олександр КЛИМОВ, канд. техн. наук, доцент  
Микола АНТОНОВ, канд. техн. наук, доцент  
Віра САВЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент  
Олександр МАЛИЙ, канд. техн. наук  
Микола КАСЬЯН, канд. техн. наук, доцент  
Владислав КОРОЛЬКОВ, канд. екон. наук, доцент  
Микола ДСДКОВ, канд. іст. наук, доцент  
Олена ВАСИЛЬЄВА, д-р екон. наук, професор  
Ірина ПУЩИНА, канд. пед. наук, доцент  
Юрій ФІЛЕЙ, канд. юр. наук, професор  
Таїсія ГАЙВОРОНСЬКА, канд. філос. наук, доцент  
Михайло БРИКОВ, д-р техн. наук, професор  
Наталя ВИСОЦЬКА, начальник патентно-інформаційного відділу  
Наталя САВЧУК, начальник редакційно-видавничого відділу  
Сніжана ВИЧУЖАНІНА, керівник відділу наукової роботи студентів  
Юлія ЧУШКІНА, провідний фахівець відділу наукової роботи студентів  
Сергій ЛЕОЩЕНКО, голова НТСА*

Тези доповідей друкуються методом прямого відтворення тексту, представленими авторами, які несуть відповідальність за його форму і зміст.

**Т39 Тижень науки-2023. Машинобудівний факультет.** Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 24–28 квітня 2023 р. [Електронний ресурс] / Редкол. : Вадим ШАЛОМССВ (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 177с. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.

ISBN 978-617-529-402-4

Зібрані тези доповідей, заслуханих на щорічній науково-практичній конференції серед викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів та студентів. Збірка відображає широкий спектр тематики наукових досліджень, які проводяться у Національному університеті «Запорізька політехніка». Збірка розрахована на широкий загал дослідників та науковців.

ISBN 978-617-529-402-4

© Національний університет  
«Запорізька політехніка»,  
(НУ «Запорізька політехніка»), 2023

## ЗМІСТ

### СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ»

<i>Яхно Д.А., Дядя С.І.</i> Актуальність пригнічення коливань при обробці різанням .....	11
<i>Leoshchenko S., Pukhalska G., Bezkhlibnyi D.</i> Modelling of blade operating processes .....	12
<i>Дядя С.І.</i> Роль проектного управління в забезпеченні ошадливого використання ресурсів .....	14
<i>Демешко Д.К., Тумарченко Л.О.</i> Магнітопорошковий метод неруйнівного контролю .....	15
<i>Вишнєпольський Є.В., Шевченко О.С., Циплаков В.С.</i> Підвищення характеристик деталей з нейлону за допомогою термічної обробки .....	16
<i>Слободян А.Г., Бобровнік А.В., Гончар Н.В.</i> Порівняння різновидів фінішної обробки лопаток компресору авіаційних двигунів для подальшого її вдосконалення .....	18
<i>Ярошенко Ю.П., Степанов Д.М.</i> Підвищення якості обробки зубчастого вінця шестерні фінішними методами .....	19
<i>Степанов Д.М., Немчин О.В.</i> Основні методи неруйнівного контролю .....	21
<i>Вишнєпольський Є.В., Ярошенко І.В.</i> Особливості фрезерування тонкостінних деталей .....	23
<i>Кононов В.В., Шищенко А.В., Діденко А.А.,</i> <i>Скрипник Г.В., Воздраганова А.Ю., Кононов Г.В.</i> Методи отримання отворів малого діаметру .....	24
<i>Вишнєпольський Є.В., Криворучко Г.О.</i> Підвищення точності обробки тонкостінних деталей .....	28
<i>Вишнєпольський Є.В., Кориунов В. Р.</i> Особливості цементації авіаційних деталей .....	29
<i>Степанов Д.М., Козлова С.С.</i> Огляд досліджень покращення трибологічних властивостей черв'ячної передачі .....	30
<i>Вишнєпольський Є.В., Діменський О.Г.</i> Особливості формоутворення глибоких отворів малого діаметру .....	31
<i>Тришин П.Р., Булах Є.В.</i> Сучасні методи нанесення захисних покриттів .....	33

<i>Гончар Н.В., Михеева І.А.</i>	
Неруйнівні методи контролю залишкових напружень .....	35
<i>Тришин П.Р., Боровик К.В.</i>	
Лідери з виробництва сучасного обладнання для зняття задирок на зубчатих колесах.....	37
<i>Руденко І.М., Гончар Н.В.</i>	
Центрифуги – сучасний метод очищення ЗОТС та розділу різних рідин.....	38
<i>Дядя С.І., Зубарев А.Є.</i>	
Шляхи оптимізації конструкцій металорізальних верстатів .....	40
<i>Дядя С.І., Мазуренко М.А.</i>	
Розширення можливостей САМ систем при використанні верстатів з ЧПУ .....	41
<i>Бebesко В.А., Козлова О.Б.</i>	
Лазерне поверхнєве зміцнення деталей машин .....	42
<i>Комісаров О.О., Пухальська Г.В.</i>	
Матеріали для FDM-друку в Україні.....	43
<i>Гуменний Д.А., Козлова О.Б.</i>	
Підвищення зносостійкості поверхонь деталі «Корпус» .....	45
<i>Грінблат М.Г., Степанов Д.М.</i>	
Очищення стружки стратегічних матеріалів та її брикетування.....	46
<i>Матвійко С.В., Тумарченко Л.О.</i> Методи фінішної обробки виробів отриманих за допомогою адитивних технологій.....	48
<i>Свириденко В.М., Тумарченко Л.О.</i>	
Хімічне оксидування .....	49
<i>Лукінова О.В.</i> Фінішна обробка зубчастих коліс.....	50
<i>Козлова О.Б., Дядя С.І., Діхтяр О.С.</i>	
Актуальність комп'ютеризації технологій машинобудування і майбутній розвиток країни .....	52
<i>Пойденко М.В., Козлова О.Б.</i>	
Шляхи підвищення експлуатаційної стійкості деталі методом нанесення покриття .....	53
<i>Козловський Н.М., Гончар Н.В.</i>	
Заміна механічної обробки дрібних конструктивних елементів на електрофізичний прожиг .....	54

## **СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЇ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ»**

*Півень І.П.*

Техніко-економічна доцільність переведення

ГТД на експлуатацію по технічному стану.....

<i>Бойко І.А., Кіреєва О.В., Сахнюк Н.В., Юр'єва В.В.</i>	
Оброблюваність зносостійких покриттів деталей ГТД.....	58
<i>Таратута В.М.</i>	
Застосування наноматеріалів в ядерній енергетиці.....	59
<i>Констандій Н.О.</i>	
Наноструктуровані покриття на деталях	
ГТД застосування, властивості .....	61
<i>Приладишев Д.Ю.</i>	
Застосування наноматеріалів і нанотехнологій у військовій справі.....	63
<i>Черній Ю.О., Кривих Ю.І.</i>	
Результати досліджень властивостей наноматеріалів і нанотехнологій, застосованих в авіадвигунобудуванні .....	65
<i>Лазарєв І.О., Лазарєва О.О.</i>	
Напружено-деформований стан поверхні адгезійного контакту з застосуванням покриттів.....	67
<i>Соляненко О.М., Качан О.Я.</i>	
Використання нанотехнологій при виготовленні лопаток ГТД.....	68
<i>Волошин Д.О., Бойко І.А.</i>	
Композиційні матеріали для авіаційного призначення.....	69
<i>Шеремет О.І.</i>	
Застосування наноматеріалів і нанотехнологій у космічних апаратах.....	70

## **СЕКЦІЯ «МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ ТА СИСТЕМИ»**

<i>Циганов В.В.</i>	
Структурна однорідність та енергетичний стан поверхневого шару при терті з складним динамічним навантаженням .....	72
<i>Фролов М.В., Танченко С.В.</i>	
Визначення мінімальних кількості зразків та часу для випробувань з нульовими відмовами.....	73
<i>Циганов В.В., Первєєв Д.В.</i>	
Методологія ефективного шліфування з використанням полімеру у МОТЗ.....	75
<i>Штанкевич В.С., Афанасьєв Ю.О.</i>	
Вплив методу заточування свердла на його працездатність .....	76
<i>Штанкевич В.С., Бублик О.А.</i>	
Вплив схеми фрезерування на якість обробленої поверхні.....	78

*Штанкевич В.С., Радкевич С.В.*

Вибір оптимальної конструкції протяжки  
при протягуванні фасонних поверхонь ..... 79

*Фролов М.В., Назарова К.О.*

Прогнозування параметру  
форми розподілення відмов спеціальних підшипників  
для авіадвигунів при плануванні випробувань ..... 80

*Танченко С.В., Фролов М.В., Нотченко Р.В.*

Методика планування та проведення експерименту з  
дослідження точності позиціонування верстата з ЧПК моделі АТПР800.. 82

*Танченко С.В., Фролов М.В., Сурков С.Ю.*

Оптимізація системи технічного обслуговування  
та ремонту верстатів для підвищення ефективності  
експлуатації обладнання ..... 83

## **СЕКЦІЯ «ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНІ, ДОРОЖНІ, БУДІВЕЛЬНІ, МЕЛІОРАТИВНІ МАШИНИ І ОБЛАДНАННЯ»**

*Мартовицький Л.М., Глушко В.І., Шаніна З.М.*

Ймовірнісне прогнозування робочого стану елементів  
металоконструкцій важких кранів ..... 85

*Фролов Р.О., Сидоренко М.В.*

Модернізація лабораторних стендів сучасними  
керуваними системами ..... 86

*Волков Г.П., Вініченко В.С.*

Удосконалення системи технічного обслуговування  
дорожніх машин ..... 87

*Руднев О.М.*

Щодо тенденцій розвитку баштових кранів ..... 89

*Задоя Н.О.*

Область застосування інженерних методик розрахунку  
теплопровідності при затвердінні склопластиків ..... 91

*Руднев О.М., Василенко І.С.*

Переваги заміни сталевих кранових канатів на канати  
із синтетичного волокна ..... 93

*Козак Д.С., Шутов К.Р.*

Методика дослідження на опір  
втомі в умовах асиметрії циклу зразків з  
концентратором напружень ..... 94

*Мартовицький Л.М., Цой В.В.*

Спосіб передачі енергії зубчато-роликівим зачепленням ..... 95

<i>Фролов Р.О., Вечеря Е.С.</i>	
Застосування пружних вставок у кранових колесах мостових кранів .....	96
<i>Задоя Н.О., Костюк А.С.</i>	
Розв'язання задачі розподілу температури у циліндрі методом кінцевих різниць .....	97
<i>Волков Г.П., Вініченко В.С., Подковиров Д.В.</i>	
Розширення сировинної бази будівельних матеріалів .....	99

## **СЕКЦІЯ «ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ»**

<i>Матюхін А. Ю., Приходько С.С.</i>	
Вибір типу приводу для гідравлічних пресів .....	102
<i>Матюхін А.Ю., Падафет О.О.</i>	
Аналіз причин виникнення браку при прокатуванні .....	103
<i>Матюхін А.Ю., Андреев А.І.</i>	
Необхідність кування злитків з малопластичних металів та сплавів .....	104
<i>Матюхін А.Ю., Кабаченко В.С.</i>	
Визначення інтервалу температурного режиму гарячого прокатування .....	105
<i>Матюхін А.Ю., Горбач Д.М.</i>	
Аналіз способів виготовлення деталей герметичних з'єднань .....	106
<i>Матюхін А.Ю., Ковтун А.О.</i>	
Розрахунок деформаційного режиму прокатування .....	107
<i>Матюхін А.Ю., Пассікун Є.В., Кас'янова Д.В., Лайко Н.С.</i>	
Застосування методів пластичного деформування при виготовленні деталей до авіаційних двигунів .....	108
<i>Матюхін А.Ю., Широкобокова Н.В.</i>	
Енерго-силові та температурні параметри напівгарячого штампування в порівнянні з існуючими методами обробки металів тиском .....	110
<i>Матюхін А. Ю., Ключев Д.І.</i>	
Вплив ступеня деформації на фізико-механічні властивості металу при волочінні .....	112
<i>Широкобоков В.В., Мороз В.А.</i>	
Вдосконалення технології та оснащення для виготовлення виробу «Насадок» .....	113
<i>Широкобоков В.В., Бондаренко В.М.</i>	
Дослідження та вдосконалення оснащення і технології	

для виготовлення «Кронштейн утримувача замка дверей» з метою автоматизації виготовлення запчастин для автомобілей .....	114
<i>Широкобоков В.В., Євтушенко В.І.</i>	
Технологія виготовлення виробів із пластмас на прикладі заглушки ізоляції в електричній системі авіаційного двигуна.....	115
<i>Широкобоков В.В., Коваленко С.В.</i>	
Дослідження та вдосконалення оснащення і технології для виготовлення виробів спеціального призначення з метою автоматизації виробництва .....	116
<i>Широкобоков В.В., Зінченко С.П.</i>	
Вдосконалення технології та оснащення для виготовлення виробу «Корпус повітряного фільтра» в умовах діючого виробництва.....	118
<i>Широкобоков В.В., Мороз В.С.</i>	
Вдосконалення технології та оснащення для виготовлення виробу «Корпус ресивера» в умовах діючого виробництва .....	119
<i>Широкобоков В.В., Глеба А.А., Савостін А.Ю.</i>	
Охолодження штампів гарячого штампування.....	120
<i>Обдул В.Д., Стешенко А.Д.</i>	
Розробка та вдосконалення технології виготовлення підшипників ковзання з вуглецево-полімерних композицій .....	121
<i>Обдул В.Д., Єпішкін О.В., Морозов К.В.</i>	
Аналіз систем регулювання енергії ударів гвинтових пресів.....	122
<i>Обдул В.Д., Безуглий Б.А.</i>	
Розробка двогвинтового преса .....	123
<i>Обдул В.Д., Портнов Є.О.</i>	
Удосконалення технологічного процесу виготовлення лопаток компресора ГТД .....	124
<i>Обдул В.Д., Олефіренко С.І.</i>	
Удосконалення технології кування нержавіючих марок сталей .....	125
<i>Обдул В.Д., Дзева В.П.</i>	
Підвищення стійкості штоків повітряних молотів .....	126
<i>Бень А.М., Широкобоков О.В.</i>	
Дослідження та розробка револьверної подачі для роботи в автоматизованому режимі .....	127
<i>Бень А.М., Арцибашева М.С.</i>	
Дослідження термомеханічних властивостей сталей гарячого штампування .....	128
<i>Обдул В.Д., Сауткін О.В.</i>	
Технологічні параметри прокатування і їх вплив на поздовжню та поперечну різновтовщинність смуги .....	129



<i>Обдул В.Д., Буторін О.В.</i> Вдосконалення технології прокатування трубної заготовки на стані 1050/950 .....	130
<i>Бень А.М., Растоваров Д.О.</i> Вплив обробки металів тиском на довговічність і міцність матеріалу .....	131
<i>Бень А.М., Фуніков Т.М.</i> Використання технології гарячого пресування для отримання складних металевих виробів зі збільшеними фізико-механічними властивостями .....	132
<i>Бень А.М., Шолох О.М.</i> Розрахунок міцності головних валів .....	134
<i>Бень А.М., Солдатенко В.В.</i> Холодна та гаряча та напівгаряча деформація .....	135
<i>Ленок А.А., Строколіс А.А.</i> Переваги та недоліки методу магнітно-імпульсного штампування (МІОМ) .....	137
<i>Ленок А.А., Штапура С.С.</i> Особливості методу валкового штампування .....	138
<i>Ленок А.А., Улінець А.О.</i> Вплив анізотропії листових матеріалів на процеси обробки металів тиском .....	139
<i>Ленок А.А., Андронов Є.С.</i> Дослідження деталей заклепувального з'єднання в машинобудуванні .....	140
<i>Ленок А.А., Бусько Д.В., Коробов О.О.</i> Регулювання експериментальних процесів обробки металів тиском шляхом 3D-моделювання .....	141
<i>Ленок А.А., Жуков О.А., Кубарев Д.О., Ольховський В.В.</i> Сучасні формувальні методи обробки металів тиском .....	142
<i>Єпішкін О.В., Рудик Д.А.</i> Аналіз процесів гідроформування .....	144
<i>Єпішкін О.В., Коломосць С.А.</i> Аналіз та оптимізація технологічних процесів для виробництва виробів методом гарячого штампування .....	144
<i>Єпішкін О.В., Мангаєв О.Г.</i> Дослідження можливостей використання методу високошвидкісного штампування .....	146

## СЕКЦІЯ «ВИЩА МАТЕМАТИКА»

<i>Онуфрієнко В.М., Слюсарова Т.І.</i> Електричний пробій фрактального каналу польового нанотранзистора .....	147
<i>Онуфрієнко В.М.</i> Контактна задача Герца про ударну взаємодію фрактально конфігурованих тіл .....	149
<i>Онуфрієнко В.М., Антоненко Н.М., Онуфрієнко О.В., Килимник І.М.</i> Диферінтегральна модель гістерезисних та ередитарних реологічних фрактальних процесів .....	151
<i>Онуфрієнко В.М., Засовенко А.В., Онуфрієнко О.В.</i> Моделювання буферності зв'язаних фрактальних автогенераторних елементів .....	153
<i>Шаніна З.М., Килимник І.М.</i> Математичне моделювання поверхні зубчатого робочого органу (ЗРО) для обробки ґрунту .....	155
<i>Шаніна З.М., Засовенко А.В.</i> Опис процесу подріблення ґрунту при обробці його зубчатим робочим органом.....	157
<i>Snizhko N.</i> Approximation of functions of two variables on Lyapunov skeletons .....	158
<i>Данільченко Д.В., Засовенко А.В.</i> Моделювання динамічного деформування обтічника при дії зовнішнього розподіленого навантаження .....	160
<i>Килимник І.М.</i> Застосування методів гармонійного аналізу для опису гістерезисних характеристик електротехнічних сталей .....	162
<i>Сніжко Н.В.</i> Принципи досягнення розуміння при викладанні вищої математики.....	164
<i>Фасоляк А.В.</i> Нестационарна динаміка пружного напівсередовища з циліндричною порожниною, яка підкріплена тонкою оболонкою, при осесиметричних навантаженнях .....	166
<i>Zinenko I.</i> Mathematical model of a flanged N-plane horn with dielectric slab in aperture.....	167
<i>Антоненко Н.М., Шишкін І.Р., Дубінін Я.П.</i> Осесиметрична стаціонарна задача теплопровідності для двошарової плити з теплоізолюваною нижньою межею.....	169
<i>Антоненко Н.М., Кірюніна А.Є.</i> Про деякі застосування циклічних функцій в олімпіадних задачах .....	171

## СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ»

УДК 621.914.2

Яхно Д.А.<sup>1</sup>, Дядя С.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> асп. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### АКТУАЛЬНІСТЬ ПРИГНІЧЕННЯ КОЛИВАНЬ ПРИ ОБРОБЦІ РІЗАННЯМ

Машинобудівні підприємства у сучасних прогресивних умовах змушені постійно прагнути підвищення продуктивності технологічних процесів та використання інтенсивних режимів різання на операціях механічної обробки. Все це стримується, головним чином, втратою динамічної стабільності технологічної системи.

Колівання виникають за умови, коли коливальній системі надається енергія при виведенні її з положення рівноваги.

Колівання, що відбуваються за рахунок внутрішніх сил системи, називаються вільними. Вони виникають унаслідок початкового відхилення тіла один раз з положення рівноваги, а потім підтримуються силами пружності системи. Наявність сил опору призводить до загасання вільних коливань.

Змінним зовнішнім впливом викликаються вимушені коливання, які відбуваються під дією змушуючої сили по гармонічному закону з певною частотою. За рахунок постійної періодичної підтримки зовнішнього впливу амплітуда вимушених коливань є незгасаючою.

При наближенні змушуючої частоти до частоти вільних коливань спостерігаються різке заростання амплітуди внаслідок резонансу. Дане явище при механічній обробці є небажаним, тому намагаються добиватися великої різниці між частотою вільних коливань та частотою дії змушуючих сил.

В процесі обробки можливе виникнення автоколивань, що підтримуються без періодичної дії змушуючої сили. При цьому втрати енергії поповнюються за рахунок періодичного припливу від джерела, що не має коливальних властивостей.

При різанні у загальному випадку можливий процес змішаного характеру, коли коливання діють у послідовності від вимушених, на які накладаються вільні і автоколивання. При дослідженнях їх можна виявити за допомогою спектрального аналізу.

Питання зменшення інтенсивності коливань відповідно до природи їх походження, в залежності від впливу на якість та шорсткість поверхонь, є досі важливим. Актуальним напрямком вирішення цього питання може бути використання демпфуючих властивостей самого процесу різання.

УДК 004.896

Leoshchenko S.<sup>1</sup>, Pukhalska G.<sup>2</sup>, Bezkhlibnyi D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PhD student NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

<sup>2</sup>PhD, assistant professor NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

## MODELLING OF BLADE OPERATING PROCESSES

When military helicopters and transport aircraft take off and are forced to land on a desert or simple runway, sand and dust cause erosion of the aircraft blades by solid particles, which leads to a decrease in compressor performance and structural integrity, which seriously affects engine reliability [1].

Paper [2] investigated the erosion wear of the gas-solid flow of a compressor blade in an aero-turbine engine. In the study, a test bench for testing the Ti-6Al-4V alloy for erosion wear was designed and manufactured. Particle velocities were tested using particle image velocimetry at different air pressures. The results showed that the wear areas are concentrated on the rotor blade's pressure surface, as well as on the stator blade's suction and pressure surfaces. The maximum wear concentration was observed near the leading edge of the 80% span and near the leading and trailing edges of the 95% span on the rotor blade [2].

In studies[3] were conducted to predict the erosion of gas turbine engine blades. The model of blade material erosion is based on three-dimensional modelling of particle trajectories in a three-dimensional turbine flow field. The trajectories provide a specific distribution of particle impact parameters on the blade surface. To increase the blade's resistance to erosion and reduce blade wear, the blades must be coated [3].

Paper presents the results of an experimental study of the erosion resistance of fibre-reinforced structural carbon fibre reinforced plastic used in the structural elements of a gas turbine engine. A methodology for characterising the process of gas-abrasive wear of thin-walled structures made of polymer composite materials has been developed. The factors that determine the level of abrasive impact of the dust-gas mixture formed during take-off and landing are found. A criterion for assessing the erosion resistance of a material is presented. The factors that determine the level of abrasive impact of the dust and gas mixture formed during take-off and landing are found. A criterion for assessing the erosion resistance of a material is presented.

Erosion is an important mechanism of wear of jet engine compressors. To predict the damage caused by erosion, it is necessary to determine the rate. The physical model presented in [4] offers a new approach to adapt the erosion-induced wear mechanisms to any geometry of the compressor blade.

As an object of research, the blades of the first stage of the compressor of the TV3-117 engine, made of VT8 alloy, which have operational damage to the blade feathers of the engines, were selected.

The study was carried out on two engines that were operated under the same conditions, but have different operating times and, accordingly, different degrees of blade damage. For the study, 20 blades without gross mechanical damage were selected from the two engines.

To build regression models, we first selected informatively significant features (using stepwise regression methods). The selection of features allows us to discard uninformative features that complicate the model and introduce erroneous data that reduce the accuracy of the model. After that, regression models were built using the selected groups of features.

The study of blade geometry consisted of measuring the chord, C1, C2 in sections A2-A2.....A8-A8. In the original data  $x_1, x_4, x_7, x_{10}, x_{13}, x_{16}, x_{19}$  – chordal value in different sections;  $x_2, x_5, x_8, x_{11}, x_{14}, x_{17}, x_{20}$  – thickness of the leading edge;  $x_3, x_6, x_9, x_{12}, x_{15}, x_{18}, x_{21}$  – thickness of the trailing edge;  $x_{22}$  – hardness of the trailing edge, HRC;  $x_{23}$  – yield strength of the initial material, MPa;  $x_{24}$  – tensile strength, MPa;  $y_1$  – total operating time;  $y_2$  – operating time before 1 repair;  $y_3$  – frequency of natural vibration of the blades, Hz.

Regression models of blade service life and natural oscillation frequencies were constructed.

Linear regression models of the second order with a first-order term:

$$y_1 = -50,81 - 11616,91 x_{13} + 11774,24 x_{19} - 12941,78 x_3 + x_{13} + 8294,39 x_3 + x_{16} + 4332,86 x_3 + x_{19} + 26582,52 x_{13} + x_{15} - 6700,64 x_{13} + x_{16} - 1653,66 x_{13} + x_{17} - 50,81 x_{13} + x_{18} - 1594,87 x_{13} + x_{19} + 353,01 x_{13} + x_{20} - 27506,72 x_{13} + x_{21} - 26828,98 x_{15} + x_{19} + 14604,59 x_{16} + x_{17} + 8490,52 x_{17} + x_{19} - 13196,27 x_{17} + x_{20} - 7295,96 x_{19} + x_{21} + 27928,12 x_3^2 + 11444,33 x_{13}^2 + 4471,35 x_{16}^2 - 1037,9 x_{19}^2$$

$$y_2 = -211,77 - 3660,12 x_{13} + 3709,69 x_{19} - 4077,55 x_3 + x_{13} + 2613,30 x_3 + x_{16} + 1365,15 x_3 + x_{19} + 8375,31 x_{13} + x_{15} - 2111,16 x_{13} + x_{16} - 521,02 x_{13} + x_{17} - 16,01 x_{13} + x_{18} - 502,49 x_{13} + x_{19} + 111,22 x_{13} + x_{20} - 8666,50 x_{13} + x_{21} - 8452,97 x_{15} + x_{19} + 4601,45 x_{16} + x_{17} + 2675,10 x_{16} + x_{19} - 4157,73 x_{17} + x_{19} - 2298,73 x_{17} + x_{20} + 8799,27 x_{17} + x_{21} + 3605,75 x_3^2 + 1408,78 x_{13}^2 - 327,03 x_{16}^2 - 1143,78 x_{19}^2$$

$$y_3 = +102428,81 - 12147,18 x_{13} + 4986,58 x_{19} - 4614,65 x_3 + x_{13} + 2141,45 x_3 + x_{16} + 2381,85 x_3 + x_{19} + 5371,39 x_{13} + x_{15} + 750,30 x_{13} + x_{16} - 4343,15 x_{13} + x_{17} - 22,36 x_{13} + x_{18} - 274,72 x_{13} + x_{19} + 24,94 x_{13} + x_{20} - 1565,90 x_{13} + x_{21} - 5462,51 x_{15} + x_{19} + 5648,81 x_{16} + x_{17} + 177,70 x_{16} + x_{19} - 1287,82 x_{17} + x_{19} - 1117,12 x_{17} + x_{20} + 1595,23 x_{19} + x_{21} + 3339,80 x_3^2 + 43,50 x_{13}^2 - 540,16 x_{16}^2 - 29,66 x_{19}^2$$

The obtained regression models show that during the operation of helicopter engines, the geometry of the blade inlet and outlet edges in the sections A6-A6.....A8-A8 has the greatest impact on the engine life and the frequency of blade natural oscillations. Therefore, special attention should be paid to measures that can minimise the erosion wear of blade edges and extend the engine service life.

## REFERENCES

1. Di Wang Solid Particle Erosion / Wang Di, Yang Zhen // *Advances in Turbomachinery*. – 2023. – Режим доступу: <https://www.intechopen.com/online-first/85507>
2. Li Chao Study on the erosive wear of the gas-solid flow of compressor blade in an aero-turboshaft engine based on the Finnie model / Chao Li, Guangfu Bi, Jian Li, Zezhong Liu // *Tribology International*. – 2021. – № 163. – С. 1057–1077.
3. Tabakoff W. Blade Deterioration in a Gas Turbine Engine / W. Tabakoff, A. Hamed, V. Shanov // *International Journal of Rotating Machinery*. – 1998. – № 4. – С. 233–241.
4. Lorenz M. Prediction of Compressor Blade Erosion Experiments in a Cascade Based on Flat Plate Specimen / M. Lorenz, M. Klein, J. Hartmann, C. Koch, S. Staudacher // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2022. – № 8. – Режим доступу: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2022.925395/full>

УДК 334

Дядя С.І.

канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## РОЛЬ ПРОЄКТНОГО УПРАВЛІННЯ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ОЩАДЛИВОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ

Ощадливе ставлення до ресурсів є невід’ємною складовою роботи кожного працівника на підприємстві. Пов’язано це з тим, що у собівартості продукції найбільшу частку займає саме вартість ресурсів. Їх перевитрати призводять або до збільшення ціни на кінцеву продукцію, або до зменшення заробітної плати. Обидва варіанти є негативними. Тому актуальним постає питання, яким чином не допустити перевитрат ресурсів. Світовий досвід, що досліджується за закріплюється у вигляді стандартів, дозволяє його розповсюджувати. Стандарти ISO серії 9000 орієнтують організації на зосередженості уваги на тих процесах, які додають цінність продукту. Ощадливе використання ресурсів при цьому забезпечується якісним виконанням робіт за

рахунок використання методик, які описують послідовність виконання роботи, матеріально технічного забезпечення та підготовленого персоналу. Але якість продукції є лише частиною того, що зумовлює використання ресурсів при виготовленні продукції. У сучасному світі, що характеризується непередбачуваними змінами, треба вміти орієнтуватися в умовах невизначеності та ризиків.

Добитися успіхів при цьому дозволяє проектне управління, яке, базуючись на управлінні якістю, за рахунок контролю за роботою при плануванні та виконанні робіт забезпечує миттєве реагування на зміни. Для цього визначаються результати, які повинні бути після виконання певних робіт. Використання набутого досвіду з виконаних попередніх робіт дозволяє передбачувати можливі ризики, які призводять до збільшення терміну виконання робіт та перевитрат ресурсів. Дієвість призначених попереджувальних заходів перевіряється у контрольних точках через певний період виконання робіт. За необхідністю вносяться зміни. Таким чином при використанні проектного управління ощадливе ставлення до ресурсів реалізується від планування і до продажу готової продукції.

УДК 620.179.141

Демешко Д.К.<sup>1</sup>, Тумарченко Л.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> асист. НУ «Запорізька політехніка»

## **МАГНІТОПОРОШКОВИЙ МЕТОД НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ**

Головною особливістю неруйнівного контролю є те, що він не призводить до руйнування (ушкодження) контрольованого об'єкта [1], що, в свою чергу, дозволяє перевіряти якість продукції без порушення її придатності до використання за призначенням.

Одним з найпоширеніших методів неруйнівного контролю є магнітопорошковий метод, який ґрунтується на явищі тяжіння частинок магнітного порошку магнітними потоками розсіювання, що виникають над дефектами в намагнічених об'єктах контролю. Магнітопорошковий метод призначений для виявлення поверхневих (з шириною розкриття біля поверхні 0,001 мм і більше, глибиною 0,01 мм та більше [2]), підповерхневих (що лежать на глибині до 2 мм) та внутрішніх (великих розмірів, що лежать на глибині більше 2 мм) порушень суцільності: волосин, тріщин різного походження, непроварів зварних з'єднань, флокенів, заходів, надривів і т.п. Чутливість магнітопорошкового методу визначається: магнітними характеристиками матеріалу, його формою, розмірами і шорсткістю поверхні, напруженістю, що намагнічує поле і дефект, місцем розташування й орієнтацією дефектів, взаємним

напрямок намагнічення поля і дефекту, властивостями дефектоскопічного матеріалу, способом його нанесення на об'єкт контролю, а також способом і умовами реєстрації індикаторного рисунка дефектів, що виявляються. Максимальна чутливість методу може бути отримана під час контролю деталі з шорсткістю, що відповідає параметру  $Ra = 1,25...2,5$  мкм. Зі збільшенням шорсткості чутливість методу знижується.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Камель Г. І. Контроль якості зварювання. Том 1 Неруйнівні методи контролю / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. – Кам'янське : ДДТУ, 2018. – 241 с.

2. Сусліков Л. М. Неруйнівні методи контролю: навч. посібник / Л. М. Сусліков, І. П. Студеняк. – Ужгород : Видавництво УжНУ, 2016. – 192 с.

УДК 621.7

Вишнепольський Є.В.<sup>1</sup>, Шевченко О.С.<sup>1</sup>, Циплаков В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

## ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ З НЕЙЛОНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Матеріали для 3D-друку, що використовуються для моделювання методом наплавлення (FDM), є термопластичні полімери у формі нитки. Для цього типу процесу 3D-друку існує багато різних матеріалів. Найбільш поширені матеріали для технології FDM є ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол), PLA (полімолочна кислота) і нейлон (поліамід), але також можуть використовуватися інші різновиди матеріалів, такі як суміш пластику та дерева або вуглецю. Для цієї технології 3D-друку можуть використовуватись і інженерні матеріали (PA, TPU і PETG), а також деякі високоефективні термопластичні матеріали (PEI або PEEK) [1].

Нейлон – це напівкристалічний та, як правило, дуже міцним матеріал з гарною термічною та хімічною стійкістю. Нейлон має тенденцію поглинати вологу із довкілля. Це поглинання триває доти, доки не буде досягнуто рівноваги, і це може вплинути на розмірну стабільність [2]. З урахуванням його високої міцності, нейлон виявляється чудовим вибором для виготовлення деталей, у яких питання термо- та зносостійкості є ключовими.

Термообробка використовується з метою зміни молекулярної структури матеріалу та/або виключення внутрішніх напруг. Застосування термообробки



до деталі, надрукованої на 3D-принтері, може покращити її механічні та/або термічні властивості. Після термообробки деталь повинна витримувати вищі механічні навантаження та температури. Проте, ефективність термообробки залежить від матеріалу, який використовується, і зазвичай кращі результати досягаються при термообробці кристалічних або напівкристалічних матеріалів, аніж аморфних [3].

Низька температура склування нейлону, що дорівнює 53 °С, спрощує термообробку. Проте температура плавлення – 250 °С. Отже, температуру печі слід задавати 130-140 °С. Ця температура досить висока, щоб матеріал розм'якшився, вивільнив напругу та наростив свою кристалічну структуру.

Термообробка нейлону полягає в нагріванні печі до потрібної температури, впродовж години витримка цієї температури, для того щоб нагрівання розподілилося рівномірно.

Далі нейлонову деталь потрібно розмістити в печі і витримати дві години. Цей час потрібен для перебудови полімерних ланцюгів та рекристалізації. Не можна відкривати піч у процесі термообробки. Після двох годин потрібно вимкнути піч і залишити деталь усередині для поступового охолодження печі до кімнатної температури. Це дозволить зменшити ризик перекосів та максимізує переваги, отримані за рахунок термообробки.

Як правило, термообробка збільшує деформаційну теплостійкість нейлонових деталей більш ніж на 40%. При роботі з матеріалом Nylon важливо враховувати можливість зміни розмірів та форми деталей при термообробці. Тому при проектуванні та друку деталей слід враховувати ці фактори, щоб досягти бажаних властивостей матеріалу та уникнути небажаних ефектів. Крім того, не завжди потрібно застосовувати термообробку, і необхідність у ній залежить від кінцевого застосування деталей та необхідних властивостей матеріалу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Конспект лекцій з дисципліни «Адитивні технології» для студентів всіх форм навчання спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології машинобудування» галузі знань «Механічна інженерія» / Укл. П. Р. Тришин. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 77 с.

2. Електронний ресурс: [https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Polyamides.aspx#:~:text=\\*\\*\\*%20very%20good-,APPLICATIONS,%2Dthe%20Dbag%20food%20packaging](https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Polyamides.aspx#:~:text=***%20very%20good-,APPLICATIONS,%2Dthe%20Dbag%20food%20packaging)

3. Електронний ресурс: [https://themachinebros.com/apply-annealing-to-3d-printed-parts/#What\\_is\\_the\\_Purpose\\_of\\_Annealing](https://themachinebros.com/apply-annealing-to-3d-printed-parts/#What_is_the_Purpose_of_Annealing)

УДК 62-253.5

Слободян А.Г.<sup>1</sup>, Бобровнік А.В.<sup>2</sup>, Гончар Н.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **ПОРІВНЯННЯ РІЗНОВИДІВ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРУ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ЇЇ ВДОСКОНАЛЕННЯ**

З розвитком передових технологій виготовлення авіаційних двигунів у напрямку високого співвідношення тяги до ваги та мінімізації маси з'явилася низка специфічних авіаційних матеріалів з низькою щільністю, таких як титанові сплави, а також жароміцні сплави на основі нікелю та композитні матеріали на основі кераміки, які широко використовуються для ключових компонентів в аерокосмічній галузі, а також стали основними виробничими матеріалами для лопаток авіаційних двигунів. Однак через чутливість карбіду до концентрації напружень, анізотропію та крихкість композитних матеріалів поступово висвітлюється проблема втомного руйнування. Існуючі дослідження показують, що характеристики опору втомі лопаток авіаційних двигунів мають важливий взаємозв'язок з процесом їх обробки і остаточною якістю, що, в свою чергу, впливає на експлуатаційні характеристики і термін служби [1].

Фінішна обробка, як завершуючий процес доводки пера лопаток авіадвигунів, безпосередньо визначає кінцеву цілісність поверхні і опір втомі лопаток при отриманні точних профілів високошвидкісним фрезеруванням і наступною оздоблювальною обробкою. Для оцінки різниці характеристик поверхні пера лопаток при їх виготовленні було запропоновано порівняти декілька видів фінішної обробки після високошвидкісного фрезерування (ВШФ), а саме ручне полірування, комплексна обробка – ручне плюс віброполірування і тільки віброабразивна обробка.

Після обробки ВШФ фреза залишає на поверхнях пера лопатки видимі, так звані «строчки», форма і розміри яких варіюються в залежності від режимів, в основному від подачі фрези, яка визначає продуктивність фрезерування. Для видалення крупних «строчок» використовують ручне полірування, яке виконується на полірувальних бабках послідовно полірувальними кругами різної зернистості. Під ручне полірування залишали значний припуск. Через важкість, відповідальність, напруженість і монотонність ручної праці, було вирішено остаточно тонке полірування, яке заповірювало ризики, що залишались після ручного полірування, виконувати за допомогою віброабразивної обробки, тобто це є комплексна фінішна обробка – ручне і віброполірування. Як варіант також було запропоновано використовувати віброабра-

зивну обробку відразу після ВШФ, і в цьому випадку, по-перше, не передбачали додаткового припуску, а, по-друге, в залежності від розміру «строчок» вибирали ступеневу послідовну обробку наповнювачами різної форми, матеріалу та зернистості.

В результаті попередні дослідження показали, що третій варіант при забезпеченні такої ж точності і якості дає найвищу продуктивність за рахунок обробки одразу всього набору лопаток (40-100 штук і більше) в залежності від габаритів лопаток. До того ж сучасне обладнання, на якому проводили віброобразивне полірування – установки «Rösler» [2] – дають можливість швидкого автоматичного сепарування деталей від наповнювача, зміни наповнювача, заміни режимів тощо задля значного скорочення допоміжного часу операції. В результаті є можливість скоротити час фінішної обробки загалом в 2–5 разів, що через свою актуальність визиває необхідність проведення подальших досліджень.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Huang Yun Research progress of aero-engine blade materials and anti-fatigue grinding technology [J] / Huang Yun, Li Shaochuan, Xiao Guijian, Chen Benqiang, Zhang Youdong, He Yi, Song Kangkang // Journal of Aeronautical Materials. – 2021. – 41 (4). – P. 17–35.

2. Електронний ресурс: <https://de.rosler.com/de-de/en/>

УДК 621.7

Ярошенко Ю.П.<sup>1</sup>, Степанов Д.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ЗУБЧАСТОГО ВІНЦЯ ШЕСТЕРНІ ФІНІШНИМИ МЕТОДАМИ**

Зубчасті колеса є важливими елементами різного роду конструкцій, від автомобільних виробів, кораблів, вітроенергетичних установок, верстатів до конструкцій авіаційної промисловості. Міжнародний ринок зубчастих передач постійно розширюється завдяки постійному зростанню попиту на виготовлення цих конструкцій. Загальний обсяг ринку дуже важко оцінити, але в будь-якому випадку це кількомільярдний бізнес, що потребує чималих вкладень та взамін вимагає відповідної якості зубчастих коліс. З конструктивних особливостей сучасних зубчастих коліс, можна зробити висновок про важливість належної і точної обробки цих коліс в серійному виробництві, що в

основному включає в себе вимоги економічності та безпеки виробництва в різних умовах. Найбільш важливими потребами є:

- переважно високоміцні та індивідуальні характеристики матеріалу серцевини шестерні та валу шестерні для забезпечення їх низької ваги, гарантуючи при цьому незначні зміни положення посадки в залежності від стану навантаження;

- надзвичайно тверді та зносостійкі характеристики матеріалу верхнього шару зубчастого зачеплення для отримання високої міцності бічних поверхонь та вершин зубів;

- геометрична видозміна зубчастого зачеплення за розміром, положенням і формою для забезпечення безперебійного зачеплення зубів, а також компенсації деформацій зубчастого зачеплення, що залежать від навантаження, для досягнення меншого відхилення фактичного положення посадки в порівнянні з бажаним положенням посадки [1].

На початку технологічного процесу виготовлення зубчастих коліс є або процеси формоутворення, наприклад кування в штампах, або процеси різання з геометрично чітко визначеними ріжучими кромками, такі як свердління, точіння та фрезерування, тобто зубофрезерування. Така попередня механічна обробка в поєднанні з подальшою термічною обробкою, особливо загартовуванням або нітроцементацією, призводять до викривлень, які вимагають жорсткої фінішної обробки корпусу колеса і бічних поверхонь зубців [2]. Таким чином, фінішна обробка зубчастих коліс є необхідним завершальним етапом процесу для досягнення двох найважливіших цілей – максимальної навантаженості та мінімального рівня шуму під час роботи (рис. 1). Тому, пов'язані з цим заходи, тобто видозміна бічних поверхонь та зменшення похибок форми, повинні бути досягнуті за допомогою найбільш підходящих виробничих процесів.

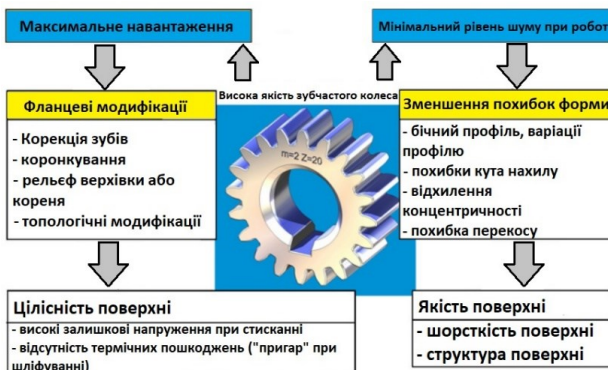


Рисунок 1 – Схематичне зображення цілей фінішної обробки зубчастих коліс

Одним з найефективніших процесів фінішної обробки зубчастих коліс є хонінгування, завдяки своїй високій ефективності та відмінній якості поверхні.

Вперше хонінгування зубчастих коліс було застосовано для усунення транспортних пошкоджень на загартованих бічних поверхнях зубців. Від відомих процесів шліфування бічних поверхонь зубів хонінгування відрізняється кінематикою та інструментом, який зазвичай має форму зубчастого колеса. Цей метод обробки забезпечує не тільки високу якість, а й високу точність та виправляє інші похибки зубчастого вінця.

Для зубчастих коліс 6–7 класів точності, які є особовідповідальними деталями авіаційного двигуна та сприймають високообертові навантаження, задіяння фінішної обробки є обов'язковим. Дослідження та використання існуючих фінішних методів, таких як хонінгування, та пошук і розробка нових методів є актуальним завданням при виготовленні зубчастих коліс в авіадвигунобудуванні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Karpuschewski B. Gear finishing by abrasive processes / B. Karpuschewski, H.-J. Knoche, M. Hipke // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57. – P. 621–640.
2. Gawronski Z. Synergistic Effects of Thermo-Chemical Treat-Ment and Super Abrasive Grinding In Gears / Z. Gawronski, B. Kruszynski // Manufacturing. Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – № 159/2. – P. 249–256.

УДК 620.179.11

Степанов Д.М.<sup>1</sup>, Немчин О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

## ОСНОВНІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Неруйнівний контроль – це широка група методів, що використовуються для виявлення внутрішніх дефектів металу відповідальних деталей, які неможливо визначити візуальним контролем або пошкодження поверхні деталі. Найбільш поширеними методами є контроль магнітними частинками, контроль пенетрантом, ультразвуковий контроль, радіографічний контроль, акустична емісія та вихроструменевий контроль. При цих випробуваннях у процесі виробництва або експлуатації виявляються такі дефекти, як пори, тріщини, зменшення товщини стінки або проміжки у внутрішніх конструкціях. Ці випробування повинні виконуватись відповідно до стандарту ISO 9712:2014.

Магнітопорошкова дефектоскопія – це метод випробувань для виявлення дефектів на поверхні деталей. Основним принципом цього є те, що до поверхні деталі прикладається магнітне поле ззовні або подається електричний струм через матеріал деталі, який, у свою чергу, створює магнітне поле. При цьому частинки заліза розпорошуються на випробуваній поверхні. Поверхневі дефекти у матеріалі створюють спотворення магнітного поля, що викликає обтікання ліній магнітного поля навколо дефекту. Магнітні частинки притягуються поверхневим полем в ділянку дефекту і вказують на її місце знаходження. Магнітопорошковий контроль вперше застосували англієць С.М. Саксбі у 1868 р. та американець Вільям Хок у 1917 р. намагаючись виявити тріщини у стовбурах гармат [1]. Промислове застосування було зроблено Віктором де Форестом і Фостером Доаном в 1929 р. Цей метод застосовується лише до феромагнітних матеріалів. Після контролю деталі вимагають розмагнічування та очищення.

Рентгенівський метод став першим методом неруйнівного контролю, який отримав промислове застосування. Цей метод неруйнівного контролю є методом, в якому використовуються рентгенівські або гамма-промені, щоб побачити внутрішню структуру матеріалу. Високоенергетичні електромагнітні хвилі проникають у матеріал. Випромінювання, що проникає в матеріал, впливає на чутливу до випромінювання плівку, розташовану з іншого боку матеріалу. При прояві ця плівка розкриває зображення внутрішньої частини матеріалу, якою проходить промінь. Більш темні області на зображенні оцінюються як індикатори неполадок. Вільгельм Конрад Рентген відкрив рентгенівське проміння у 1895 році під час експериментів з катодними променями [1]. У той час промисловість ще не потребувала цього винаходу, а медицина потребувала. Спершу з'явилося медичне обладнання. Єдиний побічний ефект, який Рентген не міг передбачити був тим, що рентгенівські промені шкідливі здоров'ю людини. До того, як з'явився радіаційний захист, багато людей загинуло. Перші технічні застосування рентгенівських променів було зроблено Річардом Зайфертом приблизно 1930 року у Німеччині [1]. Цей метод можна використовувати для виявлення внутрішніх та поверхневих дефектів у всіх металевих та неметалічних матеріалах.

Ультразвуковий контроль заснований на передачі височастотних звукових хвиль матеріалам та одержанні їх назад для виявлення будь-яких дефектів. Зонди зі спеціалізацією генератора імпульсів/приймача використовуються для надсилання звукових хвиль. Зонд, підключений до ультразвукового випробувального пристрою, посилає звукові хвилі у матеріал. Звукові хвилі проходять через матеріал і відбиваються до зонда. При виявленні розриву звукові хвилі повернуться до зонда до завершення відстань, це покаже, що розрив був. У 1912 було запропоновано перше застосування ультразвуку після інциденту з Титаніком. Англієць Річардсон у своїх патентних заявках

запропонував ідентифікацію айсбергів за допомогою ультразвуку [1]. У Франції Чиловскі та Ланжевен почали свої розробки з виявлення підводних човнів за допомогою ультразвуку під час Першої світової війни. У 1929 році С.Ю. Соколо запропонував використовувати ультразвук для контролю виливків, у тому ж році він створив високочастотні коливання у матеріалах за допомогою кристала кварцу. Виявлення розшарування в листах та дрібних неметалевих включень у гарячекатаних профілях стало необхідним під час Другої світової війни. Вже існуючі методи неруйнівного контролю було неможливо вирішити ці проблеми. Основними винахідниками промислового використання ультразвукового контролю були Адольф Трост, Дональд О. Спроул та Флойд Файрстоун.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. NDT – non destructive testing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.szutest.com/non-destructive-testing/> (дата звернення: 02.04.2023).

УДК 621.9

Вишнепольський Є.В.<sup>1</sup>, Ярошенко І.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

## ОСОБЛИВОСТІ ФРЕЗЕРУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ

Фрезерування тонкостінних деталей є важливим процесом в машинобудуванні та інших галузях виробництва. Особливості фрезерування тонкостінних деталей полягають у вирішенні завдання забезпечення точності та якості обробки, а також уникнення деформацій та пошкоджень деталей.

Одним з основних аспектів фрезерування тонкостінних деталей є використання спеціальних інструментів, які дозволяють зменшити вібрації та забезпечити стабільність процесу фрезерування. Такі інструменти зазвичай мають короткий виступ, що зменшує відхилення деталі під час обробки.

Для забезпечення точності та якості обробки важливо враховувати також характеристики матеріалу, з якого виготовлена деталь. Наприклад, при фрезеруванні тонкостінних деталей з алюмінієвих сплавів необхідно враховувати їх низьку теплопровідність, що може призвести до нерівномірного нагріву деталі та її деформації. У такому випадку можна використовувати системи охолодження інструменту та деталі, що забезпечать більш рівномірний розподіл тепла під час фрезерування.

Для уникнення деформацій та пошкоджень деталей під час фрезерування тонкостінних деталей важливо також враховувати налаштування парамет-

рів процесу, таких як швидкість руху інструменту та різальні параметри. При цьому необхідно дотримуватися режимів фрезерування, що забезпечать оптимальне співвідношення швидкості руху і глибини різання.

Для досягнення високої якості обробки тонкостінних деталей також важливо використовувати сучасні системи контролю та вимірювання, які дозволяють в режимі реального часу контролювати параметри процесу та виявляти неполадки.

У підсумку, фрезерування тонкостінних деталей є складним та відповідальним процесом, який вимагає використання спеціальних інструментів, налаштування оптимальних параметрів фрезерування, врахування характеристик матеріалу та використання сучасних систем контролю та вимірювання. Виконання цих вимог дозволяє забезпечити високу якість та точність обробки тонкостінних деталей у машинобудуванні та інших галузях виробництва.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Jiang S. A non-uniform allowance allocation method based on interim state stiffness of machining features for NC programming of structural parts / S. Jiang, Y. Li, C. Liu // *Vis Comput Ind Biomed Art.* – 2018. – №1. – Режим доступу: <https://vciba.springeropen.com/articles/10.1186/s42492-018-0005-2>
2. Ratchev S. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts / S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A. A. Becker // *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* – 2004. – № 44. – P. 1629–1641.

УДК 621.762.793:669.15

Кононов В.В.<sup>1</sup>, Шищенко А.В.<sup>2</sup>, Діденко А.А.<sup>2</sup>, Скрипнік Г.В.<sup>2</sup>,  
Воздраганова А.Ю.<sup>2</sup>, Кононов Г.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> студ. гр. М-111сп НУ «Запорізька політехніка»

## МЕТОДИ ОТРИМАННЯ ОТВОРІВ МАЛОГО ДІАМЕТРУ

Відповідальні деталі газотурбінних двигунів складаються з деталей (турбінні й соплові лопатки), що працюють в екстремальних умовах при температурах, близьких до температури плавлення самого жароміцного сплаву. Для забезпечення довговічною і надійною експлуатації, лопатки перфоровані отворами малого діаметру від 0,3 мм до 1 мм з допуском на діаметр отвору в межах 0,05–0,10 мм. Через ці отвори продувається повітря, що охолоджує поверхні, схильні до теплового впливу.



### 1. Отримання отворів литтям по виплавлених моделях.

В даний час лиття по виплавлених моделях (в оболонковій формі) є єдиним методом, який дозволяє в промисловому масштабі найбільш економічно отримувати заготовки охолоджуваних лопаток турбіни, котрі мають потреби в подальшій обробці. Високоякісні виливки з жароміцних сплавів отримують в вакуумних індукційних печах. Після охолодження металу в формах і видалення оболонкової форми проводять вилуговування стрижнів. Контроль лопаток здійснюють для виявлення дефектів лиття, перевірки цілісності каналів охолодження, а також геометричних параметрів лопатки.

### 2. Отвори, одержувані механічною обробкою.

Механічною обробкою отвори формують свердлінням, зенкуванням, розго-ртанням, а також розточуванням. Для отримання отворів малого діаметра використовують свердління. Однак, використання цього методу обмежено якістю і стійкістю свердел, а також відсутністю високочутливого сверлильного обладнання. Розрізняють основні важливі фактори, що впливають на свердління: биття свердла і шпинделя обладнання, характер і плавність подачі, а також характеристики конструкції інструменту. Кожен фактор може привести як до поломки свердла так і зниження точності отвору.

### 3. Електроерозійна прошивка отворів.

Електроерозійні методи ефективно використовуються для отримання пазів і отворів в деталях газотурбінних двигунів (ГТД) з жароміцних і титанових сплавів. Технологічні показники цього методу полягають в практичній незалежності фізико-механічних характеристик оброблюваних матеріалів і обробка здійснюється без помітних силових впливів. При цьому, застосування класичної електроерозійної обробки для отримання отворів малого діаметру, особливо з великим значенням відношення  $L / D$ , викликає технологічними труднощами. При прошивці отворів суцільним електродом-інструментом (дротом) всі його геометричні дефекти (похибка форми в поперечному і поздовжньому перетинах, відхилення від прямолінійності осі) будуть позначатися на якості одержуваних отворів. Це пов'язується з ускладненням евакуації продуктів ерозії, тому необхідний правильний вибір технологічної схеми і режимів ЕЕО. Для перфорації охолоджуючих отворів в лопатках доцільно застосування струменевого методу ЕЕО. Сутність цього методу полягає в обертанні трубчастого електроду-інструменту (ЕІ), через внутрішню порожнину якого прокачується робоча рідина під великим тиском. В якості робочої рідини застосовується дистильована вода або спеціальні рідини, що містять вуглеводи. Струменева ЕЕО забезпечує високу продуктивність і якість обробленої поверхні, однак не виключає зміння поверхневого шару. При отриманні охолоджуючих отворів в лопатках необхідно використовувати спеціальну технологічне оснащення, яке дозволяє орієнтувати лопатку під певний кут (наприклад, по вхідній кромці). Багатоелектродна елект-

роерозійна обробка ефективно вирішує завдання отримання отворів малих діаметрів, а також створити якісно нові конструкції деталей, що поліпшують основні показники сучасних авіаційних двигунів.

#### 4. Отримання отворів електрохімічної обробкою.

За технологічною ознакою електрохімічне прошивання схоже з електроерозійним. Однак, видалення металу при розмірній електрохімічній обробці відбувається під дією електричного струму в середовищі електроліту без посереднього контакту між інструментом і заготовкою. При прошивці порожнин і отворів електрод-інструмент має один робочий рух – поступальний до деталі. Міжелектродний зазор підтримується постійним. Через міжелектродний зазор прокачують електроліт. За цією схемою прошивають пази і отвори на пері лопаток турбін. За цією ж схемою отримують отвори струменевим методом. Електрод-інструмент складається з токоподводу, що омивається потоком електроліту. Токоподвод знаходиться всередині корпусу з ізоляційного матеріалу. Електроліт створює струмопровідний канал між струмопідведенням і заготовкою. У місці контакту електроліту з оброблюваною поверхнею матеріал заготовки розчиняється і утворюється поглиблення.

#### 5. Хімічне витравлювання отворів.

Витравлювання – це видалення шару металу хімічним шляхом. Розрізняють рідинне і сухе витравлювання. У основі рідинного витравлювання лежить хімічна реакція рідкого травильника і твердого тіла. Для забезпечення заданої швидкості витравлювання підбирають хімічний склад, концентрацію і температуру травильника. Витравлювання може бути ізотропним і анізотропним. Ізотропне витравлювання йде з однаковою швидкістю в усіх напрямів. Анізотропію витравлювання кількісно оцінюють відношенням швидкостей витравлювання в різних напрямках. Сухе анізотропне витравлювання робиться у вакуумній установці в плазмі газового розряду. Розрізняють іонне витравлювання, витравлювання плазмохімічне витравлювання і реактивне іонне. Для витравлювання поверхонь виробів з нержавіючих і жароміцних сталей застосовують водний розчин наступного складу у вагових частинах: сірчана кислота – 14, соляна кислота – 13, азотна кислота – до 9. Робоча температура – до 85 ОС.

Цей метод в основному застосовується при отриманні отворів в тонких листах.

#### 6. Отримання отворів лазерним променем.

Лазерна обробка отворів є продуктивнішим процесом, хоча по питомій витраті енергії вона перевищує механічні і електрофізичні методи. Лазерне свердління отворів характеризується такими фізичними явищами, як: нагрів, випар і плавлення матеріалу. Для отримання отворів малого діаметру використовують лазери з короткими імпульсами. Існує декілька методів лазерного свердління: свердління одиничним імпульсом, внаслідок чого виходить отвір.

Велике значення у формуванні отворів при обробці плавких матеріалів одиничним імпульсом має перерозподіл рідкої фази до моменту твердіння. В результаті форма отвору відрізняється від тієї, яка була після закінчення імпульсу. Таким чином, істотно знижується ефективність і точність свердління одиничним імпульсом. Ударне свердління отримують під впливом декількох лазерних імпульсів. При багатоімпульсній обробці отвір росте в глибину поступово за рахунок пошарового випару матеріалу кожним імпульсом. Остаточна глибина отвору визначається сумарною енергією імпульсів, а його діаметр – усередненими параметрами окремого імпульсу випромінювання в серії. Використання для багатоімпульсної обробки імпульсів малої тривалості дозволяє отримувати отвори в крихких матеріалах.

7. Електронно-променевий спосіб отримання отворів. Електронно-променева прошивка здійснюється електронними гарматами, які формують потік прискорених електронів, а також надають електронному промінню до заготовки необхідних відносних переміщень. Основні стадії формування пучка електронів: отримання потоку вільних електронів; прискорення електронів і звуження їх в промінь; управління положенням електронного променя. Електронно-променевий спосіб характеризується високою швидкістю і точністю, а також безкисневими процесами при отриманні отворів, проте, температурна дія на матеріал викликає структурні зміни в поверхневому шарі. А враховуючи використання вакуумної камери, здорожує технологічний процес прошивання отворів.

8. Імпульсний гідроабразивний метод прошивки отворів. Гідроабразивна обробка є процес, при якому матеріал обробляється тонким струменем суміші води і абразиву, що випускається з високою (надзвуковою) швидкістю і під високим тиском. Процес є ерозійним руйнуванням під дією робочого струменя, при якій дрібні частинки абразиву знімають шар мікростружки, а вода, евакуує їх із зони різання. В якості абразиву використовують загострені подрібнені мінерали з величиною зерна від 0,1 до 0,3 мм. Залежно від оброблюваного матеріалу і товщини кількість використовуюваного абразиву складає від 100 до 600 г/хв.

Таким чином, отримання отворів малого діаметру при перфорації лопаток турбін є важливою проблемою в авіабудуванні. Розглядаючи усі перераховані способи прошивання отворів в лопатках турбін, найбільш оптимальним варіантом є електроерозійне прошивання.

УДК 621.942.3:004.89

Вишнепольський Є.В.<sup>1</sup>, Криворучко Г.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

## **ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ**

Обробка тонкостінних деталей є складним технологічним процесом, який вимагає високої точності та уваги до деталей. Підвищення точності обробки тонкостінних деталей є важливим завданням для забезпечення якості та ефективності виробництва.

Основні методи підвищення точності обробки тонкостінних деталей.

Використання високоточного обладнання. Високоточне обладнання дозволяє зменшити похибки обробки та забезпечити більш точні розміри деталей. Однак, високоточне обладнання зазвичай має високу вартість та складність в експлуатації.

Використання спеціальних інструментів та технологій обробки. Наприклад, використання мікрофрезерування дозволяє отримати більш точний розмір отворів та вирізів на тонкостінних деталях. Використання спеціальних інструментів може зменшити похибки обробки та забезпечити більш точні розміри деталей.

Використання методу компенсації похибок обробки. Даний метод полягає у використанні спеціального програмного забезпечення, яке здійснює компенсацію похибок обробки та забезпечує більш точні розміри деталей.

Переваги та недоліки методів підвищення точності обробки тонкостінних деталей.

Використання високоточного обладнання. Перевагою цього методу є висока точність та якість обробки. Однак, цей метод має високу вартість та може бути складним у експлуатації. Крім того, високоточне обладнання зазвичай не може оброблювати великі деталі або великі обсяги виробництва.

Використання спеціальних інструментів та технологій обробки. Перевагою цього методу є зменшення похибок обробки та більш точні розміри деталей. Однак, використання спеціальних інструментів може бути складним та вимагати додаткової кваліфікації робочого персоналу. Крім того, використання спеціальних інструментів може збільшити витрати на виробництво.

Використання методу компенсації похибок обробки. Перевагою цього методу є зменшення похибок обробки та більш точні розміри деталей без необхідності використання дорогого обладнання або спеціальних інструментів. Однак, для використання цього методу потрібно мати відповідне програмне забезпечення, що може збільшити витрати на виробництво.

Перед виробництвом тонкостінних деталей слід ретельно планувати технологію обробки та вибір методу залежно від конкретної ситуації та потреб виробництва.

Розробляти нові методи та технології обробки тонкостінних деталей з метою підвищення точності та ефективності виробництва.

Перед використанням будь-якого методу підвищення точності обробки тонкостінних деталей слід провести дослідження та тестування для оцінки його ефективності та ефективності виробництва.

Необхідно забезпечувати постійний контроль якості виробництва тонкостінних деталей з метою виявлення похибок та їх усунення.

Підвищення точності обробки тонкостінних деталей є важливим завданням для забезпечення якості та ефективності виробництва.

Використання високоточного обладнання, спеціальних інструментів та технологій обробки, або методу компенсації похибок обробки можуть підвищити точність обробки тонкостінних деталей.

Кожен метод має свої переваги та недоліки, тому вибір методу залежить від конкретної ситуації та потреб виробництва.

УДК 669.018.44

Вишнепольський Є.В.<sup>1</sup>, Коршунов В. Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Мз-112м НУ «Запорізька політехніка»

## **ОСОБЛИВОСТІ ЦЕМЕНТАЦІЇ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Цементування є одним із процесів термічної обробки, який використовують для зміцнення металевих деталей.

Одним з головних принципів цементування є те, що деталь повинна бути занурена в розплавлений матеріал, який містить вуглець, такий як порошкова сталь або графіт. Після зняття з розплаву деталь охолоджується, що дозволяє вуглецю проникнути в метал. Цей процес викликає зміну мікроструктури металу та збільшення його твердості та зносостійкості.

Однак, цементування авіаційних деталей має свої особливості, пов'язані з вимогами щодо їх якості та міцності. Одна з особливостей полягає в тому, що деталі повинні бути піддані строгому контролю якості перед, під час та після цементування. Це дозволяє забезпечити високу якість та міцність деталей після процесу цементування.

Ще одна особливість цементування авіаційних деталей пов'язана з вибором матеріалу для цементування. У випадку авіаційних деталей використовуються спеціальні порошки з високою чистотою, що містять вуглець. Це дозволяє досягти високої якості та міцності деталей.

Також важливо враховувати температуру та тривалість процесу цементування. Деталі повинні бути піддані високій температурі, що може досягати до 900 градусів Цельсія, протягом декількох годин. Довгий час зберігання деталей в розплаві може призвести до перегріву та деформації деталей, що негативно вплине на їх міцність та якість.

Крім того, процес цементування може мати вплив на корозійну стійкість деталей. Після цементування деталі повинні бути піддані спеціальній обробці, яка зменшує ризик корозії та зберігає їх міцність та якість.

Однією з основних переваг цементування авіаційних деталей є те, що цей процес дозволяє зміцнити лише поверхню деталей, не змінюючи їхню загальну структуру. Це дозволяє зберегти вагу деталей та знизити ризик пошкодження структури літака.

Загалом, цементування є важливим процесом для виробництва авіаційних деталей. Однак, цей процес має свої особливості, пов'язані з вимогами до якості та міцності деталей, вибором матеріалів для цементування, температурою та тривалістю процесу, а також обробкою після цементування. Дотримання всіх цих факторів дозволяє забезпечити високу якість та міцність авіаційних деталей, що забезпечує безпеку польотів та надійність літаків.

УДК 620.179.11

Степанов Д.М.<sup>1</sup>, Козлова С.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

## **ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ПОКРАЩЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ**

Черв'ячна передача постійно зазнає ковзного руху, що викликає втрати на тертя, а також знос зубців. Щоб уникнути втрат енергії на тертя та зносу зубців використовуються різні мастильні середовища. Олія, як мастильне середовище, створює тонкий шар між зубцями і запобігає прямому контакту їх поверхонь. Використання олій знижує знос черв'ячних передач, а також втрати енергії на тертя.

Для змащення зубчастих передач, особливо черв'ячних, олія досі грає життєво важливу роль [1]. Однак завдяки недавнім розробкам з'явилися нові типи консистентних мастил. Які в порівнянні з олією мають ряд переваг, через що стали все частіше застосовуються в черв'ячних передачах, особливо для малогабаритних редукторів, що працюють на малих швидкостях і при малих навантаженнях.

У роботі [2] представлені дослідження впливу олії на зношування черв'ячної передачі. У цьому дослідженні автори використовували олії з

різним відсотковим вмістом присадок. Моделювання та аналіз, розрахунок тертя та зносу виконувались у програмному пакеті FEA. У роботі встановлено ряд переваг застосування олій порівняно з консистентним мастилом.

У статті, опублікованій Фукуямою [3], він заявив, що за останні кілька десятиліть у мотор-редукторах по всій Японії почали замінювати олії на консистентне мастило. В основному вони знаходять застосування в низькошвидкісних черв'ячних передачах малих розмірів, але все частіше їх використовують і в силових передачах.

У порівнянні з олією консистентне мастило демонструє меншу несучу здатність і менший відвід тепла через обмежену охолоджувальну здатність. Використання консистентного мастила є найкращим вибором для запобігання витoku в обладнанні та забруднення готової продукції, наприклад, у харчовій промисловості. Тому в черв'ячних передачах, що працюють на малих швидкостях, все частіше використовують консистентне мастило.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Raadnu Surapol Condition monitoring of worm gear wear and wear particle analysis of industrial worm gear sets / Raadnu Surapol // *Wear*. – 2021. – Vol. 476. – P. 203687.

2. Admankar V. Experimental investigation and optimization of tribological properties for worm gear with different additives percentage of lubricating oil / V. Admankar, J. Bhat, U. Bhapkar // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 50(5). – P. 1697–1699.

3. Fukunaka K. Allowable surface durability in grease lubricated gears / K. Fukunaka // *Tribology transactions*. – 1987. – Vol. 31 (4). – P. 454–460.

УДК 621.92.053

Вишнепольський Є.В.<sup>1</sup>, Діменський О.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

### **ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ГЛИБОКИХ ОТВОРІВ МАЛОГО ДІАМЕТРУ**

У виробництві механічних компонентів та пристроїв досить часто виникає потреба у формуванні глибоких отворів малого діаметру, що можуть бути необхідні для забезпечення дренажу, транспортування рідини або газу, а також для забезпечення вентиляції. Однак формування таких отворів може бути досить складним процесом, який потребує спеціальних інструментів та технологій.

У даній доповіді будуть розглянуті особливості формоутворення глибоких отворів малого діаметру та методи їх реалізації.

Перш за все, слід зазначити, що формоутворення глибоких отворів малого діаметру може бути досягнуто за допомогою різних методів. Найпоширеніші з них – це свердління, фрезерування та глибоке термічне формоутворення. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки та може бути використаний в залежності від конкретних вимог щодо виробів.

Один з методів формоутворення глибоких отворів – це свердління. Він використовується для отримання отворів малого діаметру та глибини, і його основна перевага полягає в тому, що він може бути виконаний на дуже високій швидкості. Однак, свердління може бути досить складним процесом, особливо якщо отвір має бути досить глибоким або має бути виготовлений зі складної матеріалу. Також, під час свердління можуть виникати проблеми зі стійкістю свердла та розривом матеріалу. Для покращення процесу формоутворення глибоких отворів малого діаметру можна використовувати різні технології та методи. Одним з найефективніших є метод глибокої свердловини, який полягає в розширенні отвору за рахунок поступового збільшення діаметру свердла та використання спеціальних інструментів.

Іншим методом є використання лазерного свердління, яке дозволяє досягти високої точності та якості отвору, а також підвищує продуктивність процесу. Проте важливо враховувати особливості матеріалу та товщини стінки, щоб уникнути деформації та руйнування деталі.

Одним з найважливіших факторів при формоутворенні глибоких отворів є контроль за процесом та вимірювання параметрів отвору. Для цього можна використовувати різні методи, такі як оптичні вимірювання та контроль з різних боків деталі.

При формоутворенні глибоких отворів важливо також враховувати особливості матеріалу, з якого виготовлена деталь. Наприклад, м'які матеріали потребують меншої сили для свердління, але вони більш вразливі до деформації. Тверді матеріали, навпаки, вимагають більшої сили та потужності обробки, але менш вразливі до деформації. Також важливим аспектом є використання підходів до підтримки тонкої стінки деталі. Наприклад, при свердлінні можна використовувати спеціальні підпори, щоб уникнути згину стінки.

Отже, було розглянуто особливості формоутворення глибоких отворів малого діаметру. Було зазначено, що одним з ефективних методів формоутворення таких отворів є свердління. Важливо звернути увагу на те, що при свердлінні глибоких отворів малого діаметру необхідно дотримуватись певних технологічних рекомендацій, зокрема використовувати свердла з відповідним кутом заточки, правильно підбирати параметри свердління та робочого режиму, контролювати температуру та стан інструменту.



## СУЧАСНІ МЕТОДИ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

Надійність та довговічність деталей машин та механізмів визначається конструктивною міцністю матеріалів, з яких вони виконані. Експлуатаційні характеристики багатьох виробів – зносостійкість, корозійна стійкість, відбивна здатність, теплопір та інші – визначаються властивостями поверхні. Для отримання високих характеристик конструктивної міцності поверхневих шарів часто застосовують різні методи нанесення покриттів, що дозволяють захистити поверхні деталей від зовнішніх дій, підвищити термін їх служби.

Покриттями називають штучно створені поверхневі шари, які можуть відрізнитися від матеріалу основи хімічним та фазовим складами, структурою та властивостями. Покриття наносяться для захисту поверхні від різних видів впливів (високих навантажень, температур, різних агресивних середовищ), у декоративних цілях, відновлення порушеної геометрії виробів. Захисні покриття поділяють на металеві та неметалічні. Першим методом нанесення металевих покриттів є занурення у розплав – гарячий спосіб нанесення покриття методом занурення виробу у ванну з розплавленим металом (олово, цинк, алюміній або свинець) [1]. Даний метод не надто поширений, тому що витрачає велику кількість захисного покриття, при цьому не забезпечуючи його рівномірну товщину і не дозволяючи наносити метал у вузькі зазори. Другий метод – це плакування, при якому на поверхню основного металу наноситься інший, більш стійкий до агресивного середовища, шляхом лиття, спільної прокатки, пресування або кування. До неметалевих покриттів відносяться полімерні, гумові, лакофарбові, емалеві та інші покриття. Полімерні покриття на сьогоднішній день є найбільш популярною альтернативою оцинкування та фарбування виробів. Як напилюваний матеріал найчастіше виступають поліестер, пластизоль, поліуретани, полівінілдефторид та деякі інші. Ще один вид неметалевого покриття є емалювання – це тонке покриття на металі, що має антикорозійні властивості. Отримують за допомогою високотемпературної обробки склоподібним порошком, змішаним з водою. Фарбування - цей метод антикорозійного захисту металу добре відомий кожному. Однак лакофарбові покриття не відрізняються термостійкістю та зносостійкістю, пошкодити їх дуже легко.

Найбільш поширеними методами отримання захисних покриттів є хімічні. До них належить оксидування – створення оксидної плівки на поверхні сталевих виробів в результаті окислювально-відновної реакції [1]. Оксидування переважно використовують для отримання захисних та декоративних

покриттів, а також для формування діелектричних шарів. Оксидування створює на низьколегованих та вуглецевих сталях шар від 1 до 5 мікрон. Дане покриття надає виробам красивого вигляду сірого, темно-сірого або чорного кольору. Переваги оксидування – це тривала експлуатація без корозії, підвищення адгезії клеїв та інших лакофарбових матеріалів; не спотворює розміри оброблюваних деталей (максимальне відхилення 0,6-1,2 мкм); оперативність виконання; загальна дешевизна обробки.

Також один з поширених методів нанесення металевого захисного покриття є гальванізація. Цей метод передбачає використання електроліту. Електролітичний склад підбирається відповідно до необхідного результату та характеристик металу, з якого виконана заготівля [2]. У порівнянні з іншими методами захисту, гальванічний спосіб покриття металів має низку унікальних переваг: захисний шар відрізняється рівномірною товщиною, високою щільністю та адгезією до інших матеріалів; наносити покриття можна на конструкції будь-якої форми; метод підвищує високі антикорозійні властивості металів, продовжуючи термін їхньої служби; покриття відрізняються високою зносостійкістю та стійкістю до механічних впливів; економічність – технологія не вимагає складного устаткування й великих витрат за організацію виробництва. При цьому вона затребувана практично у всіх сферах економіки, що робить її не лише перспективною, а й високорентабельною. У гальванізації є лише декілька істотних недоліків: розмір і форма оброблюваних виробів обмежені габаритами ємності яких протікає процес гальванічного покриття, що унеможливує обробку виробів великого розміру; технологічний процес гальванічного покриття може бути організований строго стаціонарно. Також процес гальванізації є більш дорогокоштовним, аніж хімічні методи.

Незважаючи на велику кількість існуючих методів нанесення захисних покриттів, з розвитком нових технологій з'являється безліч сучасних прогресивних методів, одним з таких є дифузійний метод. Дифузійні покриття отримують при сумісному нагріванні металічних виробів і елементу покриття, який може використовуватись як у вигляді порошку з додаванням хлоридів, так і в вигляді парів його летючих з'єднань [2]. При такому сумісному нагріванні елемент, що виділяється, в атомарному стані дифундує в поверхневий шар виробу: виріб набуває стійкість до газової корозії, підвищується твердість та зносостійкість. Дифузійна металізація – це процес насичення при високих температурах стійких до агресивних середовищ елементами: алюмінієм (алітирування), хромом (хромування), кремнієм (сіліціювання). Шар покриття, отриманий даним методом, практично суцільно складається зі сплаву металу основи і металу покриття. Вирішальними факторами, що визначають можливість утворення дифузійних покриттів, є співрозмірність розмірів атомів споріднених кристалічних структур у взаємно дифундуючих металів. Основними перевагами методу є висока міцність покриттів, дешеви-

зна процесу, екологічна чистота та висока адгезія з металом. Єдиний недолік – розмір оброблюваної деталі обмежується розміром обладнання.

Нині у світі розроблено десятки видів та способів нанесення покриттів, що мають різні комплекси властивостей. Залежно від вимог, які пред'являються до матеріалів, ці покриття можуть значною мірою змінити властивості поверхні конструкційного матеріалу, надавши йому необхідні якості. Такі методи нанесення захисних покриттів, як гальванізація та дифузія, мають ряд переваг в порівнянні з хімічними методами, такими як оксидация, пасивация. До них можна віднести: дешевизну технологічного процесу, високу міцність покриття, екологічну чистоту робочого процесу, велику адгезію з металом, рівність і щільність захисної плівки.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кондращенко О. В. Корозія і захист матеріалів та конструкцій / О. В. Кондращенко. – Харків : ХНАМГ, 2005. – 124 с.
2. Сопрунюк П. Н. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів / П. Н. Сопрунюк, В. М. Юзевич. – Львів : ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, вид-во «СПОЛОМ», 2005. – 292 с.

УДК 62-5.681-5

Гончар Н.В.<sup>1</sup>, Михеева І.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

### НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Рентгенівська дифракція широко використовується як метод неруйнівного контролю для визначення залишкових напружень у полікристалічних матеріалах. Окрім лінійних детекторів, що використовуються для добре відомого методу  $\sin^2\psi$ , в рентгенівських аналізаторах напружень поступово впроваджуються двовимірні детектори, наприклад пластини для формування зображень (ПФЗ) та напівпровідникові детектори. Застосування цих детекторів забезпечує новий підхід до швидких і автоматизованих вимірювань напружень за допомогою портативного обладнання [1].

Японська компанія *Pulstec Industrial CO., LTD* розробила і випустила портативний рентгенівський аналізатор залишкових напружень ще в 2012 році. Серія *PULSTEC  $\mu$ -X360* базується на методі  $\cos\alpha$  для розрахунку напружень. Метод використовує все кільце Дебая-Шеррера, зареєстроване на двовимірному детекторі та під одним кутом падіння рентгенівського випромінювання (рис. 1). Проста оптична система  $\mu$ -X360s значно зменшує енергію

випромінювання, робить аналізатор напружень легким, компактним, портативним, з високою швидкістю і, таким чином, більш зручним у використанні для вимірювань на місці та в польових умовах.

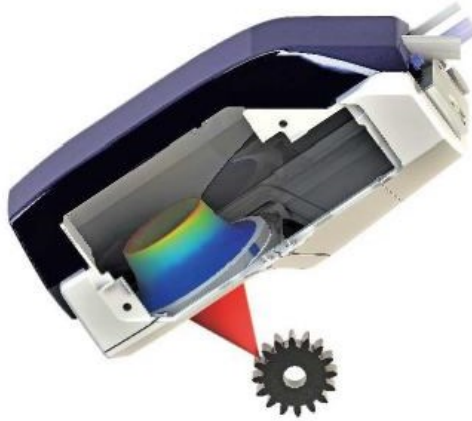


Рисунок 1 – Принципова схема блоку датчиків [1].

Професор Еккехард Мюллер з Університету прикладних наук в Бохумі, Німеччина, був першим користувачем Pulstec  $\mu$ -X360s в Центральній Європі. З грудня 2016 року, прилад знаходиться в постійному користуванні вже виконавши понад 20 000 вимірювань і пропрацювавши 270 годин роботи без жодних проблем. Близько 25 % цих вимірювань було проведено за межами лабораторії. Основною причиною були великі розміри зразків [1].

Прикладами таких великих деталей є шатуни і вали для залізничних двигунів, валки для сталеливарної промисловості, підшипники, шестерні для вітрових електростанцій та багато інших. Всі вимірювання можуть бути виконані в звичайному промисловому середовищі з використанням спеціальної ліцензії для мобільних вимірювань [1].

Рентгенівський аналізатор напружень легко монтується на столі або візку. Позиціонування точки вимірювання легко здійснюється за допомогою лазера, спрямованого в ту ж позицію, що і рентгенівське випромінювання. Безпечна зона навколо місця вимірювання обмежена лише двома метрами.

Використовуючи швидкі вимірювання і просте налаштування  $\mu$ -X360s, можна проводити високоавтоматизовані вимірювання величезної кількості зразків. Крім того, низька радіаційна небезпека і знижені обмеження безпеки дозволяють проводити вимірювання у виробничих умовах. За допомогою робота або конвеєра, деталі стрічки, можна автоматично розміщувати під  $\mu$ -X360s для проведення вимірювань. Крім того, робот або інше автоматизоване

обладнання переміщує блок датчика  $\mu$ -ХЗ60s в потрібне положення, завдяки низьким вимогам до точності відстані і кута між датчиком і поверхнею зразка.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Behler J. A New Approach to Fast and Automated Residual Stress Measurements / J. Behler, Y. Teramoto, E. Müller // MFN (Metal Finishing News). – 2021. – Vol. 22. – P. 22–25.

УДК 621.924

Тришин П.Р.<sup>1</sup>, Боровик К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-112М НУ «Запорізька політехніка»

## ЛІДЕРИ З ВИРОБНИЦТВА СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЯТТЯ ЗАДИРОК НА ЗУБЧАТИХ КОЛЕСАХ

Більшість методів нарізання зубців на зубчатих колесах утворюють небажані задири. Задири, які утворюються під час кожного процесу нарізання зубців, різні за своєю природою та залежить від матеріалу, твердості та гостроти ріжучих інструментів. Наявні задири на високошвидкісних високоточних зубчатих колесах можуть призвести до несправності механізмів, що, у свою чергу, призведе до втрати продуктивності та ефективності обладнання в цілому. Гарне видалення задирок вимагає великого досвіду використання різних сучасних методів та інструментів. Тому видалення задириків стало критично важливою операцією при виготовленні зубчатих колес. Процес видалення задирок забезпечує плавний і подовжений термін служби механізмів.

З 1989 року компанія «Grind Master» розробляє технології для зняття задирок на зубчастих колесах. Асортимент «Grind Master» верстатів і методів для зняття задирок на зубчатих колесах поширюється від механічно оброблених деталей з прокату до штампованих з тонких листів. Верстати для зняття задирок «Grind Master» включають базові машини для зняття задирок із використанням шліфувальних кругів, щіток для загального машинобудування та прецизійні машини для видалення задирок, які додатково заокруглюють кромку зубців. Робототехнічне обладнання для зняття задирок «Grind Master» є дуже універсальним і гнучким і використовується для конструктивно складних зубчатих коліс.

Компанія «SENJO SEIKI» є одним із небагатьох виробників у світі, які спеціалізуються лише на верстах для зняття фаски та задирок на зубчатих колесах. У 1997 році «SENJO SEIKI» розробила перший верстат для зняття фаски і задирок, використовуючи запатентовану технологію з системою тра-

сування. Зараз асортимент компанії включає від невеликих і гнучких верстатів із ручним завантаженням до великих машин спеціального призначення для зубчастих коліс діаметром понад 3000 мм.

Добре себе зарекомендували на ринку наступні виробники: «Helios Gear Products», «Flexmill», «TecnoMacchine» та ін.

Останніми роками зріс попит на роботизовані більш якісні процеси зняття задирок на зубчастих колесах. Виробникам обладнання стає все важче задовольняти вимоги клієнтів за допомогою існуючих технологій. Тому роботи про розробці нових технологій, інноваційних інструментів, пошуку шляхів збільшення продуктивності обладнання не припиняються і досі.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Deburring Machine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://grindmaster.co.in/deburring/> (дата звернення: 02.04.2023).

2. Gear Chamfering & Deburring Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.micronz.co.uk/gear-chamfering> (дата звернення: 02.04.2023).

УДК 621.899

Руденко І.М.<sup>1</sup>, Гончар Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ЦЕНТРИФУГИ – СУЧАСНИЙ МЕТОД ОЧИЩЕННЯ ЗОТС ТА РОЗДІЛУ РІЗНИХ РІДИН**

Відділення твердих речовин від рідин – а також відділення різних рідин одна від одної – за допомогою відцентрової сили – це технологія, яка існує вже багато десятиліть. Наприклад, завдяки своїм численним економічним і екологічним перевагам, у сфері масової обробки центрифуги більш-менш повністю витіснили хімічні системи очищення стічних вод. Центрифуги настільки ефективно видаляють дрібні частинки металу і середовища з технологічної води, що очищена вода може бути повторно використана в процесі масової обробки. Це допомагає скоротити споживання води на 90%. Додатковою перевагою є те, що відцентровий процес не видаляє сполуки, а залишає їх в очищеній технологічній воді, що є ще однією значною економією коштів. Центрифуги все частіше використовуються для очищення і переробки всіх видів рідин, що застосовуються в промислових виробничих процесах, таких як прання, очищення, фарбування, шліфування кераміки і скла, різання

каменю і гідроабразивна обробка, а також механічна обробка, штампування, волочіння дроту, загартування тощо [1].

Основними рідинами – змащувально-охолоджувальними технологічними середовищами (ЗОТС), що використовуються у виробничих процесах, є вода та олія або їх суміш у вигляді емульсії. Вода в основному використовується для миття та очищення, а також для охолодження та захисту від пилу. Наприклад, металеві деталі необхідно промивати після механічної обробки та штампування, або промивати виливки по виплавлюваних моделях для видалення залишків керамічної оболонки. Для охолодження і запобігання пилу вода і емульсії використовуються в операціях шліфування, а також використовується для збору надлишкового розпилення при фарбувальних роботах з використанням мокрої фарби [1].

Відцентровий метод центрифуги використовує принцип, що тверді забруднення у промивній воді, емульсії тощо важчі за саму рідину. Так само вода і емульсії мають більшу щільність, ніж чиста олія.

Високошвидкісне обертання барабана центрифуги створює силу понад 2000 G. У порівнянні з цим максимальна сила в реактивному винищувачі досягає приблизно 10-15 G. Ця висока сила G відокремлює тверді частинки від рідини, а також може розділяти різні рідини, такі як вода і олія.

Функція центрифуги (рис.1): забруднена рідина закачується в барабан, що обертається зі швидкістю від 2800 до 3200 об/хв, тверді частинки, оскільки вони важчі за рідину, осідають на стінці барабана у вигляді осаду, що складається приблизно на 75% з твердих частинок і на 25% з рідини, відокремлена, тепер уже чиста рідина залишається всередині, де її збирає збірна трубка і повертає у виробничий процес для повторного використання. Накопичений шлам-осад необхідно періодично видаляти з барабана.

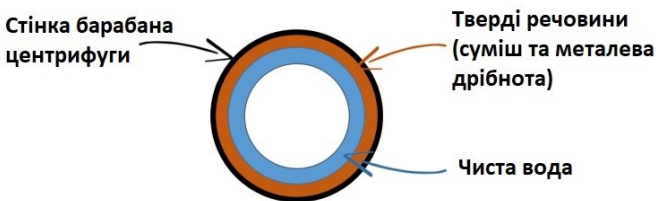


Рисунок 1 – Схематичне зображення відділення води від шламу.

При належному обслуговуванні технічна вода може зберігатися протягом тривалого часу, зазвичай від 3 до 12 місяців. Як тільки вона стає занадто забрудненою для очищення, її необхідно замінити новою порцією свіжої води та суміші.

При інтенсифікації виробництва, наприклад, при використанні багатокоординатних, багатоцільових верстатів з ЧПК та обробних центрів, очистка

ЗОТС має велике значення в зацикленому використанні технологічного середовища. Її важливість зростає при введенні оздоблювальних переходів в операції з ЧПК наприкінці формуютьвальної обробки без зняття деталей з верстата, що вводить додаткову органічну складову в ЗОТС, яку необхідно видалити. Також, якщо основний матеріал деталі немагнітний (алюмінієві, титанові, нікелеві сплави, що є широкозастосованими в авіаційній промисловості), дослідження сучасних методів очищення ЗОТС від стружки та відходів за допомогою центрифуг є актуальною задачею, і має також додаткову мету – відокремлювати металеву стружку, яка в авіаційній промисловості відноситься до стратегічних матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Holzknacht E. How Centrifuges Can Save Costs And Contribute To Environmental Sustainability / E. Holzknacht // MFN (Metal Finishing News). – 2021. – Vol. 22. – P. 42–44.

УДК 621.9

Дядя С.І.<sup>1</sup>, Зубарев А.Є.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

## ШЛЯХИ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Ощадливе ставлення до ресурсів дозволяє підприємствам бути конкурентоспроможними, як на внутрішньому, так і зовнішньому ринках. Такий підхід дозволяє враховувати ризики, які пов'язані зі зміною попиту споживачів на продукцію, і своєчасно проводити коригуючі дії за рахунок використання у виробництві CAD, CAE, CAM систем та верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ), на яких можливо переходити до обробки інших деталей шляхом заміни програми без додаткового переналаштування. На цьому фоні актуальним стоїть питання, чи можливо ще менше витратити ресурсів і таким чином ще підвищити продуктивність?

Для цього потрібні сучасні рішення, бо підвищення швидкості різання та холостих переміщень, з одного боку підвищують продуктивність, а з іншого боку підвищують температуру у вузлах верстата та зоні різання, що призводить до прискореному зносу деталей вузлів та інструменту. Таке протиріччя вирішується впровадженням сучасних конструкцій вузлів, матеріалів деталей та інструментів, методів обробки.

В конструкціях верстатів поєднуються декілька видів обробки, які мають спільні формуютьвальні рухи. Використання фрезерування твердосплавними



фрезами дозволяє обробляти з високою швидкістю не тільки призматичні поверхні, але й складнопрофільні та циліндричні поверхні, які характерні для точення. При цьому в якості шпиндельного вузла використовується мотор-шпиндель з керамічними підшипниками. Напрямні ковзання замінюються на рейкові лінійні напрямні. Звичайні кульково – гвинтові передачі (КВП) замінюються на високошвидкісні КВП з великим кроком. Ці заходи дозволяють працювати з високими температурами в парах тертя та підвищувати продуктивність за рахунок збільшення швидкостей різання та холостих переміщень.

УДК 621.9

Дядя С.І.<sup>1</sup>, Мазуренко М.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

## **РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ САМ СИСТЕМ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ**

Науково-технічний прогрес розповсюджується по усьому світові з різною швидкістю, що пов'язано зі сформованістю свідомості населення у різних державах. В державах, де створюються передові технології, розуміння ощадливого ставлення до ресурсів є рушійною силою. Тому широке використання на виробництві знаходять багатоопераційні та багатоінструментальні верстати з ЧПУ, що дозволяє суттєво підвищувати продуктивність та точність виготовлення деталей.

Але скопіювати таку ефективність використання верстатів з ЧПУ на вітчизняних підприємствах неможливо через неузгодженість між придбаним обладнанням з різними системами ЧПУ та програмними продуктами. Сучасні програмні продукти САМ систем дозволяють моделювати обробку на верстатах з ЧПУ. При цьому відпрацьовуються різноманітні стратегії, краща з яких обирається для впровадження. Вносяться корективи щодо якості обробки поверхонь. Всі рухи деталі та інструмента візуалізуються та записуються у вигляді управляючої програми. Але через різноманіття стійок з ЧПУ на верстатах не завжди ці програми можна запровадити. Це є актуальною проблемою, бо набирання на верстаті вручну складної програми для обробки деталі без її візуалізації, з одного боку не виключає похибок при різанні, а з другого боку, потребує багато часу.

Рішенням такої проблеми є створення постпроцесору (програми), який дозволяє адаптувати створену в САМ системі програму під конкретну систему ЧПУ верстата. Підготовка таких програмістів, які цілісно сприймають використання САМ систем і можливості стійок верстатів з ЧПУ, дозволить ефективно використовувати можливості сучасного продуктивного обладнання.

УДК 621.899

Бєбєшко В.А.<sup>1</sup>, Козлова О.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ЛАЗЕРНЕ ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Завдяки створенню потужних вуглекислотних лазерів стало можливим широке застосування процесів лазерного поверхневого зміцнення, що включає трансформаційне зміцнення, поверхневе наплавлення, поверхневе легування, плакування поверхні та нанесення керамічного покриття. Поширення нових методів лазерного зміцнення поверхні призвело до покращення фізичних властивостей поверхонь високонавантажених деталей, не впливаючи при цьому на властивості серцевини, та підвищення продуктивності їх виготовлення. Широкий асортимент сталей, які використовуються в машинобудуванні та верстатобудуванні, успішно поверхнево зміцнюються лазерами на бажану глибину, при цьому значно покращуються показники твердості, зносостійкості та міцності.

Найбільшого застосування сьогодні знаходить лазерне трансформаційне зміцнення поверхні – це процес локального загартування поверхонь при якому покращуються механічні властивості високонавантажених деталей, такі як зносостійкість, опір кавітаційної ерозії, втомної міцності та інші. Цій обробці в основному піддаються такі деталі, як підшипники, кулачки та шестерні. При чому цей процес проходить без розплавлення поверхні або додавання будь-яких зовнішніх хімічних елементів. Вперше ця технологія була введена у виробничий процес у 1973 році після появи потужних СО<sub>2</sub>-лазерів [1]. З того часу через низку безперечних переваг у порівнянні з традиційними методами дана технологія широко застосовується в машинобудуванні. До переваг цієї технології можна віднести наступне:

- вибіркова (локальна) термообробка поверхонь деталей;
- самозагартування за рахунок теплопровідності без необхідності будь-якого зовнішнього загартування;
- незначна деформація деталі;
- поліпшення втомної довговічності деталей.

Через наведені переваги лазерне загартування стає оптимальним технологічним рішенням для обробки поверхні дрібних і складнопрофільних тонкостінних деталей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nath A. K. Chapter 11. Laser Transformation Hardening of Steel / A. K. Nath, S. Sarkar // *Advances in Laser Materials Processing*. – 2018. – P. 257–298.

## МАТЕРІАЛИ ДЛЯ FDM-ДРУКУ В УКРАЇНІ

В українській промисловості дуже різноманітно представлені пластики для 3D-друку. Україна входить в топ країн с розвинутою структурою послуг 3D-друку. В особливості для FDM-друку промисловість надає дуже різноманітний спектр витратних матеріалів, які представлені трьома виробниками філаменту. Також особливістю ринку філаменту в Україні є різноманітність пластиків, які являються сумішшю декількох полімерів, з торговою назвою яку дав конкретний виробник. Вони мають свої властивості і не співпадають з пластиками, які пропонують інші виробники, а також виробники інших країн. Так, наприклад, назва ABS+ відноситься до пластику ABS, але зі зниженим згортанням при охолодженні. Компонент який додає цю властивість не документован і у різних виробників може відрізнятись. Розглянемо пластики виробників, які найбільш представлені на українському просторі.

ABS (monofilament) - пластик має гарну пластичність, рівномірну та однорідну якість поверхні надрукованих виробів. Вироби легко обробляються в етилацетаті, ацетоні, дихлоретані, дихлорметані. Чудово підходить для 3D-друку більшості ненавантажених виробів, до яких не пред'являються високі вимоги. Температура експлуатації від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+90^{\circ}\text{C}$ .

ABS+(monofilament) – полімерний матеріал, спеціально розроблений для якісного FDM 3D-друку. Модифікована формула матеріалу дозволяє використовувати його для друку різних виробів при температурах нижче звичайного ABS пластику на вищій швидкості 3D-друку, при цьому абсолютно забувши про проблеми з адгезією до платформи, деламінацією та деформацією виробу. Вироби, які надруковані з ABS+ пластику, мають гарну рівномірну та однорідну поверхню. Цей матеріал призначений для 3D-друку великих виробів з можливістю подальшої обробки. Вироби витримують температури до  $-40^{\circ}\text{C}$ , а також володіють підвищеною міцністю, внаслідок збільшення міжшарової адгезії. Температура експлуатації від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ .

ABS+(plexiwire) – аналог попереднього пластику від виробника plexiwire.

СOPET (monofilament) – більш жорсткий у порівнянні з ABS пластиком. Прозорий в натуральному кольорі, згинається в холодному стані без побіління в місці згину. Володіє високою прозорістю і рівномірним світлорозсіюванням. Для СOPET характерні: висока розмірна стабільність, глянцева поверхня; інертність до розчинників; висока адгезія між шарами при друці; відсутність деламінації і деформації при друці. Рекомендується для 3D-друку дета-

лей технічного призначення – втулки, муфти, підшипники, несильно навантажені шестерні та ін. Використовується для 3D-друку прозорих виробів різного призначення – макети, декорації, вивіски. Температура експлуатації від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

PETG(plexiwire) – аналог пластику coPET від виробника plexiwire.

PLA (monofilament) – пластик є найкращим матеріалом для початку роботи з 3D-принтером. Практично повна відсутність усадки у цього пластика сприяє правильному друку моделі, а також забезпечує високу роздільну здатність друку, що дозволяє створювати моделі геометрично складніші, ніж при використанні ABS. Матеріал призначений для 3D-друку різних виробів з підвищеною деталізацією, макетів, прототипів, іграшок. Температура експлуатації від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

PC (monofilament) – прозорий матеріал для 3D-друку, з характерною високою жорсткістю і одночасно високими характеристиками міцності. Стійкий до високих температур. Використовується для 3D-друку деталей різного призначення: корпусів, кріплень, шестерен з температурою експлуатації до  $120^{\circ}\text{C}$ .

PET(monofilament) – прозорий матеріал для 3D-друку, має високу механічну міцність і ударну стійкість. Стійкий до стирання і багаторазовим деформаціям при розтягуванні і згині, можливе гартування. Використовується для 3D-друку різних виробів, що експлуатуються при високих температурах. Температура експлуатації від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+220^{\circ}\text{C}$ .

Також крім цих пластиків компанія monofilament пропонує багато матеріалів, які вони розробили самостійно, такі як: ABS eco, ABS pro, ABS flex, PLA+, T\_PLA, PLA-HT, PLA-LW, ABS/PC. Який склад цих полімерів і є в них аналоги у інших виробників невідомо, а їхні властивості при друкуванні можна дізнатись тільки експериментальним методом.

Найчастіше після друку може з'явитися необхідність провести допоміжну обробку здобутої деталі (пост-обробка). В цьому випадку усі вище наведені пластики в практичному застосуванні мають деякі особливості, котрі у більшості випадків не описані виробником.

Так пластики ABS та ABS+ при побудові на принтері у зв'язку з усадкою мають ефект відриву від платформи, а також підгинанню краю на великих деталях. Але ці пластики мають найліпший показник для механічної обробки після друку, тому незважаючи на недоліки вони дуже часто використовуються.

PLA пластик дуже жорсткий і погано обробляється механічно, хоча і не має недоліків типу усадки і відривання, тому частіше його використовують без подальшої обробки.

COPEL(PETG) має найбільшу жорсткість, але в процесі побудови з'являється дуже багато напливів у зв'язку з високою плинністю у розплавленому стані, які потім важко видалити, тому що пластик дуже жорсткий.

РС пластик жорсткий, не має усадки, але у зв'язку з високою температурою друку і поверхні платформи (110–120<sup>0</sup>С), його можливо використовувати тільки на принтерах, які підтримують ці параметри.

Дослідження властивостей пластиків, які пропонують українські виробники дуже актуально, тому що вони дають можливість здобути найвищий показник якості і ціни на сучасному індустріальному просторі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електронний ресурс: <https://monofilament.com.ua/ua/products/>
2. Електронний ресурс: <https://shop.plexiwire.com.ua/abs-plus-filament/>

УДК 621.2.082.18

Гуменний Д.А.<sup>1</sup>, Козлова О.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛІ «КОРПУС»

Поверхнями, що труться, в деталі «Корпус» є отвори, в які встановлюються сателіти, які в процесі роботи піддаються фретінг корозії.

Фретінг-корозія - прискорене зношування при терті між поверхнями, що стикаються, як результат корозії і невеликого коливального руху між двома поверхнями [1, 2]. Відомо, що основними факторами, що визначають надійність вузлів є стан робочих поверхонь та властивості мастильного матеріалу [3].

Масляна плівка при граничному терті має обмежену здатність демпфувати вібрацію та ударні навантаження. Значне контактне напруження і висока динамічність навантаження призводять до неминучого і значного зносу робочих поверхонь у період припрацювання. У той самий час висока твердість і зносостійкість поверхонь тертя зумовлюють тривалість припрацювання. Висока твердість робочих поверхонь, неминучі при виготовленні та монтажі відхилення від геометричної форми та взаємного розташування призводять до виникнення додаткових та значних за величиною контактних напружень. Це призводить до зародження в підповерхневих шарах мікроушкоджень, наявність яких значною мірою позначається на ресурсі деталі і є однією з причин великого розсіювання їх по довговічності [3].

Зазначені фактори роблять період припрацювання особливо напруженим і показують необхідність проведення досліджень з метою забезпечення сприятливих умови припрацювання, а також підвищення якості робочих поверхонь для забезпечення високого рівня зносостійкості та довговічності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Голего Н. Л. Фреттинг-коррозія металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шеверя. – Киев : Техніка, 1974. – 272 с.
2. Waterhouse R. B. Fretting Corrosion / R. B. Waterhouse. – Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig : Pergamon Press, 1972. – 253 p.
3. Оцінка довговічності засобів транспорту в АПК з урахуванням впливу агресивних середовищ : монографія / П. В. Попович, П. О. Марущак, В. О. Дзюра, О. С. Шевчук. – Тернопіль : Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя, 2018. – 281 с.

УДК 621.9

Грінблат М.Г.<sup>1</sup>, Степанов Д.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### ОЧИЩЕННЯ СТРУЖКИ СТРАТЕГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇЇ БРИКЕТУВАННЯ

З швидким плином та вдосконаленням технологічного прогресу значно збільшуються темпи використання сировини (металу, кольорових сплавів тощо), яка в свою чергу має властивість вичерпуватися. Що тягне за собою підвищення попиту, а з тим і зріст цін на цю сировину. Враховуючи, що запаси руди не безкрайні, а легкодоступний металобрухт майже вичерпаний, постає завдання пошуку можливостей поновлення сировинних ресурсів металу.

Основним зі способів поновлення тієї самої сировини, саме і є збирання з наступною переробкою металевої стружки, що утворюється в результаті обробки деталей на металообробних верстатах. При обробці деталей на виробництві утворюється чимала кількість металевої стружки, яка подекуди становить біля 10% від загальної маси оброблюваних деталей. Що в свою чергу для машинобудування є дуже ваговою, якщо й не недопустимою, кількістю відходів, які могли б піддатися переробці, а саме переплавлення для отримання нової сировини. Враховуючи напрямок авіабудівної промисловості на зниження маси деталей (і, відповідно, всього двигуна), що збільшує відносний обсяг стружки при обробці тонкостінних та складнопрофільних деталей, який іноді перевищує 50% маси заготовки, та специфічність авіаційних матеріалів, які є стратегічними, – збирання, очищення, брикетування, зберігання і транспортування стружки є важливою задачею виробництва.

Збирання та транспортування металевої стружки значно ускладнюється низькою щільністю відходів (стружки). Це призводить до швидкого заповнення контейнеру для збору металевої стружки, тому цей процес є цикліч-

ним, тобто контейнери треба час від часу випорожнювати і відправляти стружку на переробку. Забезпечення правильної утилізації відходів після закінчення їхнього терміну служби має численні екологічні переваги, а також скорочення витрат, оскільки промисловість може повторно використовувати перероблені матеріали.

Перед переробкою металеві стружки вона підлягає ущільненню, стисненню (брикетуванню або пакуванню) для того, щоб значно зменшити її об'єм для зручного зберігання і транспортування, а також щоб виключити можливість виникнення підвищеного вигорання в зоні дії дуги, збільшити обсяг заповнення камери плавильної печі та полегшити процес плавлення [1].

Одними з найбільш корисних машин у процесі переробки є подрібнювачі, конвеєри, компактори та преси. Пресування (брикетування) – це ефективний спосіб скоротити витрати на транспортування та максимізувати корисне навантаження під час кожного збору відходів. Пресувальні машини використовують унікальний процес пресування для деформації великих шматків металу в менші форми, наприклад кубоподібні або циліндричні, залежно від щільності металів. Машини використовують гідравліку для роботи пресувального механізму, який пресує металеві відходи та стружку у брикети. Пресування металобрухту в брикети допомагає заощадити витрати, збільшуючи кількість металевих відходів, яку можна вивезти одним транспортним засобом [2].

Машина для брикетування металевих відходів може широко використовуватись для різних технологічних процесів, що включають в себе різні види заготовок, а саме алюмінієві профілі, сталеві відливки, алюмінієві відливки, мідні відливки. Машина та обладнання можуть миттєво пресувати порошкоподібну сталеву стружку, мідні та алюмінієві відходи, шлак тощо, і пресувати їх у коржі вагою 3-6 кг за допомогою гідравлічного пресу або штампувальної машини, що зручно для транспортування та подачі в піч. Весь процес не вимагає нагрівання, домішок або інших методів обробки. Відносна щільність відходів після пресування становить 5...6 т/м<sup>3</sup>. Використання безпосередньо холодного пресування гарантує, що вихідна сировина залишається незмінною [2]. Такий вид оброблення стружки для стратегічних матеріалів забезпечує мінімальний вплив на їх хімічний склад, мінімальне окислення тощо. Це збільшує вірогідність їх повторного використання, що в умовах ресурсозбереження є дуже важливим.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Веретільник О. В. Технології переробки металеві стружки (Огляд) / О. В. Веретільник // Сучасна електрометалургія. – 2020. – № 1. – С. 31–38.
2. NEWVISION. The uses and advantages of scrap metal balers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.visionbaler.com/info/the-uses-and-advantages-of-scrap-metal-balers-67500984.html> (дата звернення: 03.04.2023).

УДК 621.9

Матвійко С.В.<sup>1</sup>, Тумарченко Л.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> асист. НУ «Запорізька політехніка»

## **МЕТОДИ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Технології адитивного виробництва полягають у виготовленні тривимірного об'єкту шляхом накладання послідовних шарів матеріалу за даними цифрової моделі. Це також називається «виросуванням», оскільки виріб виготовляється поступово шар за шаром. Якщо при традиційних видах виробництва, наприклад, при екструзійно-видувному формуванні, виходить заготовля, з якої відсікається зайве або виробляються маніпуляції з формою, у разі адитивного виробництва із сировини будується новий готовий виріб. Залежно від обраної адитивної технології створення виробу може відбуватися знизу вгору або зверху вниз, також об'єкт може набувати різних властивостей.

Хоча в результаті 3D-друку виходять високоточні вироби, на них помітні лінії – місця з'єднання шарів. Цей недолік легко забирається за допомогою різних видів фінішної обробки. Насамперед, забираються підтримки – цей етап необхідний для багатьох технологій 3D-друку. Підпирки бувають звичайні та розчинні, і їх легко прибрати у промисловому виробництві.

До існуючих методів пост обробки відносяться [1]:

Ошкурювання – метод використовується для всіх видів виробів, від прототипів до повнофункціональних вузлів.

Піскоструминна обробка – дуже популярний метод обробки в якому з сопла під напором розпоршується дрібнодисперсний матеріал, який приховує смуги шарів.

Парова обробка – в цьому методі виріб тримають у парах закипілої речовини, де частинки цієї речовини вплаваються в об'єкт на глибину приблизно 2 мікрони, після чого поверхня стає гладка та блискуча.

Занурення виробу у спеціальний розчин – до цього методу відноситься процес занурення виробу у спеціальні речовини, наприклад, ацетон, дихлорметан.

Заповнення порожнин – після зачищення або розчинення підпор зовні можуть виявитися порожнечі, які іноді утворюються під час друку, заповнення цих порожнин здійснюється за допомогою епоксидної смоли або спеціальних наповнювачів.

Поліровка – метод, в якому за допомогою спеціальних складів для обробки пластику, оброблюють виріб щоб створити дзеркальний блиск.



Металізація (гальванізація) – в цьому методі досить складна обробка, доступна лише у професійній майстерні, де готовий виріб вимагає покриття антикорозійним складом.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електронний ресурс: <https://ua.retail.com>.

УДК 661.872

Свириденко В.М.<sup>1</sup>, Тумарченко Л.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> асист. НУ «Запорізька політехніка»

## ХІМІЧНЕ ОКСИДУВАННЯ

Хімічний склад металу відрізняється можливістю появи на ньому спеціальних оксидних плівок, якщо виявляються створені відповідні умови. Це необхідно для того, щоб унеможливити контакт матеріалу з джерелами окислення, загальмувати поступовий процес руйнування металу.

Крім безпосереднього завдання захисту матеріалу, оксидування також може використовуватися і з метою зміни зовнішнього вигляду матеріалу. Це допомагає надати йому особливих зовнішніх якостей, зробити значно більш естетичним.

Сам процес оксидування може проводитись різними способами. У промисловості зустрічається електрохімічне, хімічне, мікродугове та термічне оксидування.

Хімічне оксидування – обробка розплавами або розчинами окиснювачів, таких як хромати, нітрати тощо, переважно, для захисту від корозії або створення покриттів декоративного призначення на поверхні чорних та кольорових металів і сплавів.

Хімічне оксидування чорних металів проводять в кислотних (кислотне воронування) або лужних (лужне воронування) розчинах за температури 30...100 °С. Зазвичай використовують суміші соляної, нітратної або ортофосфатної кислот з додаванням сполук  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  тощо. Лужне оксидування проводять у розчині лугу з додаванням окиснювачів за температур 30...180 °С. Оксидні плівки на поверхні чорних металів отримують також у розплавах, що складаються з лугу  $\text{NaNO}_3$  та  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{MnO}_3$  при температурах 250...300 °С. Після оксидування вироби промивають, сушать й інколи піддають обробці в окиснювачах ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) або промаслюють [1].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kovtukhova N. I. Templated Surface Sol–Gel Synthesis of  $\text{SiO}_2$  Nanotubes and  $\text{SiO}_2$  - Insulated Metal Nanowires / N. I. Kovtukhova, T. E. Mallouk, T. S. Mayer // *Advanced Materials*. – 2003. – Vol. 15 (10). – P. 780–785.

## ФІНІШНА ОБРОБКА ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Зубчасті передачі – найбільш поширений тип механічних передач, що використовуються в машинах та приладах для перетворення обертального руху. Від їхньої якості залежать експлуатаційні властивості та надійність цих машин. Забезпечення необхідних значень шорсткості поверхні та отримання необхідного ступеня точності виробів у результаті обробки є важким завданням. Для його вирішення розглянуті методи фінішної обробки коліс, що застосовуються в промисловості.

Існує два підходи до виконання фінішної обробки зубчастого вінця. При першому вінець піддається залишковій механічній обробці до гарту, при іншому після гарту.

Найбільш продуктивним способом фінішної обробки до загартування є зубошевінгування. Ріжучий інструмент – шевер є косозубим зубчастим колесом, з кутом нахилу зубів  $5^\circ$  або  $15^\circ$ . Канавки на зубах інструменту створюють велику кількість різальних кромки із переднім і заднім кутами різання, рівними  $0^\circ$  [1].

Продуктивність зубошевінгу надзвичайно висока. Вже після кількох обертів заготовки бувають досягнуті всі бажані результати: покращено профіль, напрямок зуба та шорсткість, зменшено вихідне радіальне биття вінця.

До недоліків відноситься неможливість виправити такі параметри обробки, як крок та накопичена помилка кроку. Нежорсткий кінематичний зв'язок між шевером та заготівлею робить шевінгування дуже залежним від якості попередньої обробки зубів.

Можна доповнити технологічний процес операцією зубохонінгування заготованого вінця. Інструмент – косозубе колесо з абразивного матеріалу. Процес зубохонінгування схожий із зубошевінгуванням, щоправда, виконується при меншому тиску інструменту на заготівлю. Додаткові труднощі створює проблема виготовлення зубчастих хонів, адже це має бути високоточне абразивне колесо. Як і шевінг, хонінг не може виправити помилку кроку [2].

Зубошліфування є поширеним методом найточнішої остаточної обробки робочих поверхонь попередньо заготованих зубчастих коліс. Цей спосіб зубообробки направлений на виправлення всіх похибок, які має зубчастий вінець. Такий підхід значно підвищує надійність технологічного процесу. Незважаючи на збільшену в десятки разів трудомісткість зубошліфування порівняно із зубошевінгуванням, загалом витрати виробника на отримання якіснішого виробу виправдовуються [2].

Для шліфування евольвентних зубів циліндричних коліс у промисловості застосовують наступні методи – безперервне обкатне черв'ячним шліфувальним кругом та переривчасте профільне двостороннім конічним колом [2].

Профільне зубошліфування характеризується лінійним контактом між шліфувальним колом та заготовкою. Особливості переривчастого профільного шліфування визначили переважну область застосування цього методу для зубчастих коліс:

1. У одиничному та дрібносерійному виробництві, де потрібний універсальний інструмент та невисока продуктивність.

2. З великим модулем (понад 10 мм), які можуть оброблятися на обкатних верстатах.

3. Зі спеціальними геометричними параметрами зубів (мала кількість зубів, великий кут профілю, маленька довжина лінії зачеплення тощо).

4. З близько розташованими зубчастими вінцями. Обробку роблять шліфувальними колами маленького діаметру, як правило, абразивними ріжучими елементами кубічного нітриду бору.

До негативних властивостей профільного зубошліфування слід віднести високу теплонапруженість процесу, тобто можливість утворення на поверхні зубів шліфувальних припалів у вигляді плям, смуг, що чергуються, або окремих дрібних штрихів. Тепло, що виділяється при шліфуванні, може викликати небажані зміни структури поверхневого шару та його фізичного стану, а також коливання твердості. Шліфувальні припали суттєво знижують контактну та згинальну витривалість зубів [1].

При безперервному обкатному зубошліфуванні витки черв'ячного кола, що мають близький до рейкового профіль, відтворюють евольвентний профіль та поздовжню форму зуба. Для обкатного методу характерний точковий контакт шліфувального кола та заготовки, що постійно змінює своє положення по висоті та довжині зуба. Дуже короткий час точкового контакту не викликає великих термічних навантажень на зуб колеса, що обробляється, тому при шліфуванні цим методом можливі високі швидкості різання без небезпеки виникнення припалів на поверхні зубів. Найбільш продуктивним способом зубошліфування є шліфування методом безперервної обкатки абразивним черв'яком [1].

В даний час найбільшу популярність має зубошліфування тарілчастими колами. При шліфуванні коліс двома тарілчастими колами шліфувальні круги можуть займати різні положення щодо колеса, що обробляється, а саме, паралельно між собою на відстані, що дорівнює довжині загальної нормалі оброблюваного колеса.

Обробку зубчастих коліс даним методом ведуть переважно на зарубіжних верстатах моделі MAAG. Ці верстати дозволяють забезпечити високий рівень

точності, але мають низьку продуктивність і найвищу теплонапруженість процесу, яка зумовлюється тим, що процес обробки ведеться без охолодження.

Оцінивши переваги та недоліки всіх перерахованих вище методів, можна підвести підсумок: для фінішної обробки зубів найкраще підходить шліфування методом обкату абразивним черв'яком. Він ідеально підходить для багатосерійного виробництва, не викликає великих термічних навантажень, має достатньо високу точність.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Воронов А. Э. Повышение производительности финишной обработки зубчатых колес [Електронний ресурс] / А. Э. Воронов // Наукові вісті Давілівського університету.– 2013. – № 10. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu\\_2013\\_10\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2013_10_14) (дата звернення: 22.04.2023)

2. Електронний ресурс: <https://studfile.net/preview/9326706/page:35/>

УДК 004.01

Козлова О.Б.<sup>1</sup>, Дядя С.І.<sup>1</sup>, Діхтяр О.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Мз-112м НУ «Запорізька політехніка»

## АКТУАЛЬНІСТЬ КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ І МАЙБУТНІЙ РОЗВИТОК КРАЇНИ

Машинобудування є однією з найстаріших та найголовніших галузей промисловості, яка визначає розвиток суспільства. Тому актуальним стоїть питання забезпечення її конкурентоздатності за рахунок впровадження інтегрованих технологій на підставі поєднання можливостей сучасних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), програмного забезпечення, комп'ютерної техніки та засобів автоматизованого контролю виконання технологічних процесів. Все це визначає перспективу країни та її майбутнє [1, 2].

Для роботи на таких підприємствах необхідні спеціалісти, які своїми компетентностями можуть охоплювати увесь життєвий шлях виготовлення продукції за рахунок використання CAD, CAM, CAE та PLM систем.

Їх підготовка ґрунтується на освітньо-професійних програмах які мають наскрізний алгоритм опанування програмним забезпеченням.

На першому етапі студенти навчаються створювати тривимірний макет заготовки та деталі у програмі AUTOCAD. При цьому виконується перевірка її геометричних параметрів та форми на відповідність до умов експлуатації у програмі Ansys. За необхідністю робляться коригування. На другому етапі навчання закріплюються навички розробки керуючих програми для обробки

на верстатах з ЧПК у програмному середовищі Unigraphics NX. На третьому етапі вивчається проектування пристосувань з використанням програми Solid Works та автоматизація технологічного забезпечення виробництва.

Програмне забезпечення, яке використовується при навчанні адаптоване до реальних умов виробництва, тому спеціалісти після закінчення навчально-го закладу проходять стажування на робочих місцях для знайомлення зі специфікою своєї роботи і зразу можуть бути залучені для виконання виробничих завдань.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Туташинський В. І. Основи машинознавства : методичний посібник / В. І. Туташинський. – К. : Педагогічна думка, 2019. – 143 с.

2. Технологічні основи машинобудування : навч. посібник для студентів інженерно-хімічного факультету та механіко-машинобудівного інституту, які навчаються за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафєєв, А. А. Сурбін та ін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 112 с.

УДК 621.9

Пойденко М.В.<sup>1</sup>, Козлова О.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-112м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ДЕТАЛІ МЕТОДОМ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ

Всезростаючі вимоги до рівня довговічності та корозійної стійкості деталей машин призводять до необхідності застосування методів і технологій захисту поверхні від руйнівного впливу експлуатаційних умов. У зв'язку з цим, великого значення набули металеві покриття, що захищають вироби зі сталі від корозії, скорочують витрату дорогих металів і сплавів та знижує вартість кінцевої продукції [1].

Гальванічні покриття – це електро-хімічний спосіб захисту від несприятливих зовнішніх впливів. Тонка металева плівка захищає деталі від дії хімічних речовин та вологи, продовжує термін служби [2].

Враховуючи умови експлуатації, найбільше уваги зазвичай приділяють саме кріпленням, до яких відноситься деталь «Гайка», що досліджується і яка обов'язково має проходити процес гальванічної обробки. В технологічному процесі обробки цієї деталі запропоновано виконання операції міднення –

гальванічного покриття, яке використовують при необхідності притирання сполучених деталей, що труться і зменшення при цьому шуму.

Міднення – це процес гальванічного нанесення шару міді завтовшки від 1 мкм до 300 мкм і більше. Мідні покриття мають високе зчеплення (адгезію) з різними металами, високу пластичність та електропровідність [2].

На початковому етапі необхідно ретельно підготувати металеву поверхню до проведення процедури покриття. Для цього з неї прибирають всі забруднення та проводять процес знежирення. Потім, необхідно промити поверхню водою та обробити засобами для зупинки процесу окислення. Після всіх підготовчих процедур деталі занурюють у гальванічні ванни. На завершальному етапі проводяться тести щодо визначення рівня зчеплення металевого сплаву з поверхнею.

Контроль мідних покриттів полягає в оцінці якості на вигляд. Перевірка товщини шару проводиться у відповідності до ГОСТ 3003-58.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1 Анतिकорозійний захист кріпильних виробів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://metalvis.ua/uk/article/corrosion-protection-of-fasteners/> (дата звернення: 22.04.2023)

2. Рабочая программа, методические указания и контрольные задания к изучению дисциплины «Коррозия и защита металлов» для студентов направления 0904 – металлургия заочной формы обучения / Сост. : Е. Э. Чигиринец, А. П. Стовпченко, И. Г. Рослик. – Днепропетровск : НМетАУ, 2007. – 47 с.

УДК 621.9.048.4

Козловський Н.М.<sup>1</sup>, Гончар Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-122м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ЗАМІНА МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДРІБНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИЙ ПРОЖИГ

Створення нових і вдосконалення існуючих методів комбінованої обробки матеріалів у машинобудуванні сьогодні пов'язане з посиленням вимог до деталей, що застосовуються в сучасному авіабудуванні, машинобудуванні, космічній і медичній техніці, та потребують високої точності, якості та продуктивності процесу. Особливу складність в обробці представляють дрібні конструктивні елементи (отвори та пази), розмір яких не дозволяє використовувати традиційні методи формування отворів, зокрема, метод механічного зняття стружки. Використання для деталей вищеназваних галузей високоміц-

них, жароміцних та/або корозійностійких матеріалів і сплавів також є вагомим аргументом при виборі методів формоутворення. Вирішення технологічних завдань при обробці деталей з важкооброблюваних матеріалів спрямоване на використання методів формоутворення отворів та пазів розмірами до 1 мм на основі електрофізичних та електрохімічних процесів.

Для їх обробки у різних матеріалах існують різні методи такі, як електрохімічне мікросвердління, електроерозійне мікросвердління (ЕЕМС), механічне мікросвердління, електроерозійний прожиг, обробка лазерним променем, фотохімічна обробка, електронно-променева обробка, лазерне свердління з обробкою ЕЕМС, електрохімічна обробка тощо. Вибір відповідного методу для обробки мікроотворів залежить від декількох аспектів, а саме характеристики матеріалів заготовки, діаметру отвору, глибини отвору, якості отвору, співвідношення сторін тощо [1]. Традиційні методи видалення матеріалу прикладають значні сили різання до елементів заготовки та створюють в ній механічні залишкові напруження, також вони стикаються з іншими проблемами, а саме високим зношенням інструменту, тепловідділенням в зоні різання, недостатньою жорсткістю процесу обробки тощо. В умовах ресурсозберігаючих технологій та мінімізації маси деталей, їх тонкостінності, електрофізична обробка – електроерозійний прожиг [2] – є доволі ефективною альтернативою для отримання дрібно розмірних пазів та отворів у важкооброблюваних та новітніх матеріалах, по типу нікелю, нікелевих сплавів, інструментальної сталі, титанових сплавів, композитних матеріалів тощо [1].

Електрохімічне мікросвердління (ЕХМС) є одним із способів електрохімічної мікрообробки (ЕХМО), тоді як електроерозійне мікросвердління (ЕЕМС) є способом електроерозійної мікрообробки (ЕЕМО). Ці поняття виникли на основі стандартних процесів електрохімічної обробки (ЕХО) і електроерозійної обробки (ЕЕО). ЕХО і ЕЕО – це два основних електрофізичних процеси (або процеси електрообробки) з унікальними можливостями [3].

В основі процесу електроерозійної обробки лежать закони електролізу Фарадея, в яких два електроди (інструмент і заготовка) занурюються у водний електроліт, що знаходиться в електролітичній комірці та при достатній різниці потенціалів електродів на аноді (заготовці) відбувається різання металу. Електрохімічні процеси шляхом контрольованого анодного розчинення завжди використовують слабкий розчин кислоти як електроліт [3].

Перевагами електрохімічної обробки отворів на основі кислот є:

- висока якість поверхні;
- відсутність залишкових напружень;
- відсутність зношення інструменту;
- відсутність задирок і викривлення отворів;
- одночасне свердління великої кількості отворів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yu Z. Y. High Aspect Ratio and Complex Shaped Blind Micro Holes by Micro EDM / Z. Y. Yu, K. P. Rajurkar H. Shen // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2002. – Vol. 51(1). – P. 359–362.
2. Electrical discharge machining. Wikipedia, the free encyclopedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_discharge\\_machining](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_discharge_machining) (дата звернення: 07.04.2023).
3. Zishanur Rahman Drilling through electrochemical processes / Zishanur Rahman, Alok Kumar Das, Somnath Chattopadhyaya // A review, Materials and Manufacturing Processes. – 2010. – Vol. 59. – P. 239–240.



## СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЇ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ»

УДК 629.7.03

Півень І.П.

асп. НУ «Запорізька політехніка»

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ПЕРЕВЕДЕННЯ ГТД НА ЕКСПЛУАТАЦІЮ ПО ТЕХНІЧНОМУ СТАНУ

Для збільшення ресурсу до першого капітального ремонту двигуна і його модулів та міжремонтного ресурсу двигуна потрібен наступний обсяг випробувань:

а) випробування одного двигуна по програмі ЕЦВ на встановлюваний ресурс із запасом по циклах для двигуна в цілому;

б) встановлення призначених ресурсів основних деталей двигуна відповідно до діючих вимог.

Якщо до моменту збільшення ресурсу наробіток парку двигунів недостатній для підтвердження рівнів безвідмовності, погоджених з Компетентним органом, або у двигуні збільшеного ресурсу внесені значні конструктивні зміни, то проводяться випробування по програмі ЕЦВ другого двигуна на збільшений ресурс до першого капітального ремонту.

Таким чином, для встановлення збільшених ресурсів потрібно випробувати, як мінімум, два двигуни й установити призначені ресурси основних деталей двигуна.

У випадку застосування стратегії керування ресурсом СКР2 обмежується призначений ресурс основних деталей і відсутня необхідність встановлення призначеного ресурсу, ресурсу до першого капітального ремонту й міжремонтного двигуна в цілому і його модулів.

Для встановлення й збільшення призначеного ресурсу основних деталей двигуна досить виконати випробування одного екземпляра двигуна по програмі ЕЦВ (з необхідним коефіцієнтом запасу), або випробування основних деталей може проводитися на окремих установках.

Переклад двигуна на стратегію керування ресурсом СКР2:

а) виключає поняття фіксованого ресурсу до першого капітального ремонту й міжремонтного ресурсу, що дозволяє знизити вартість технічного обслуговування й ремонту на одну годину наробітку двигуна в складі літака за рахунок заміни трудомістких і дорогих планових заводських (капітальних і середніх) ремонтів двигунів видами періодичних (регламентних) робіт - контролюючо-відбудовними роботами.

б) скорочує потрібні обсяги обмінних фондів запасних частин у зв'язку зі скасуванням призначених ресурсів і термінів служби двигуна.

в) знижує витрати по проведенню ресурсних випробувань за рахунок відсутності необхідності проведення випробувань другого екземпляра двигуна.

За результатами виконаних розрахунків, очікуваний економічний ефект, від скорочення кількості екземплярів двигунів для встановлення проектного ресурсу становить більше 20 млн. грн.

Додатковими факторами зниження витрат є зниження експлуатаційних витрат, таких як:

– скорочення необхідних обсягів обмінних фондів запасних частин у зв'язку зі скасуванням призначених ресурсів і термінів служби (і відповідних замін і ремонтів) двигуна;

– зменшення трудомісткості технічного обслуговування й ремонтів внаслідок формування раціональних режимів техобслуговування й ремонтів при впровадженні методів технічної експлуатації по стані.

УДК 621.9.2

Бойко І.А.<sup>1</sup>, Кіреєва О.В.<sup>2</sup>, Сахнюк Н.В.<sup>3</sup>, Юр'єва В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-712м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> інж. АТ «Мотор Січ»

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **ОБРОБЛЮВАНІСТЬ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

Авіаційні газотурбінні двигуни (ГТД) є одними з важливіших, відповідальних і складних елементів літальних апаратів.

Вимоги до надійності, економічності, збільшення ресурсу та жорсткі експлуатаційні режими ГТД призводять до збільшення вимог ефективності їх виробництва.

Для підвищення працездатності, довговічності і забезпечення ремонтоспридатності пошкоджених швидкозношуваних робочих поверхонь деталей і вузлів авіаційних двигунів, які працюють в умовах підвищеного тертя і зносу, використовуються захисні зносостійкі покриття різних типів.

Захисні покриття представляють із себе наноструктурні та мікроструктурні тугоплавкі порошкові матеріали, важкі при механічній обробці. Вони мають високі механічні властивості, неоднорідність структури, що різко знижує їх оброблюваність різанням, заважають досягненню необхідного стану поверхневого шару деталей, особливо при обробці лезвійним інструментом.

В більшості випадків для обробки таких покриттів використовуються абразивні методи, однак деталі ГТД мають багато складнопрофільних поверхонь, для яких вкрай необхідно використання лезової обробки.

Виявлено, що найбільш прийнятним варіантом забезпечення оброблюваності зносостійких порошкових покриттів типу ПКХТН-30 деталей ГТД, за

результатами проведених досліджень, є використання різців, оснащених пластинами із кубічного нітриду бору, які мають кращі різальні властивості і найбільшу стійкість, яка в 1,5–2 рази перевищує стійкість пластин із твердого сплаву [1].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко І. А. Проблеми забезпечення оброблюваності зносостійких порошкових покриттів у деталях авіаційних двигунів / І. А. Бойко, П. П. Мельничук, В. В. Юр'єва // Авіація, промисловість, суспільство : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., 12 травня 2022 р., Кременчук / МВС України, Харків. нац. ун-т внутр. справ, Кременчуц. льотний коледж., Наук. парк «Наука та безпека». – Харків : ХНУВС, 2022. – С. 207–209.

УДК 539.51, 629.7

Таратуга В.М.

студ. гр. М-622м НУ «Запорізька політехніка»

## ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ В ЯДЕРНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

**Мета роботи** – показати можливість застосування наногалузі в ядерній енергетиці.

Одним з основних напрямків є розробка нових матеріалів з використанням наночастинок, що може поліпшити ефективність ядерних реакторів та зменшити їх вартість.

Крім того, нанотехнології можуть використовуватися для поліпшення процесу зберігання ядерних відходів.

Одним з умов розвитку атомної енергетики є зниження питомого споживання природного урану при виробництві

Область застосування наноматеріалів у ядерній енергетиці дуже різноманітні і охоплюють практично все коло проблем ядерного паливного циклу і створюваного термоядерного циклу:

Створення нового високощільного ядерного палива з нанодобавками, паливних композицій для тепловиділяючих збірок активною зони АЕС. Освоєння торій-уранового циклу - наукомістка завдання, що вимагає застосування високих технологій [1].

Створення нанодисперсних матеріалів конструкційного і функціонального призначення. Цирконієві сплави для тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів). Дисперсно-зміцнені оксидами (ДЗО) феритно-мартенситні сталі або нанодисперсні ДЗО-сталі.

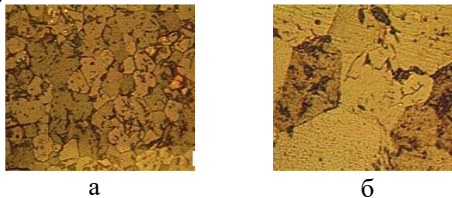
Дослідження і розробка матеріалів майбутніх термоядерних реакторів (ТЯР). Наноструктуровані матеріали бланкету і першою стінки ТЯР.

Наномембрани і нанофільтри для технологій звернення з відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) і радіоактивні відходи (РАВ).

Дослідження і розробка матеріалів для швидких реакторів і майбутніх реакторів 4-ого покоління.

Наноструктурні надпровідники (низько- і високотемпературні надпровідники) для магнітів ITER.

Ядерне паливо з нанометричними добавками. Однією з умов підвищення ефективності роботи АЕС є збільшення глибини вигорання ядерного палива. Для досягнення великокристалічного стану при пресуванні паливної кераміки ( $UO_2$ ,  $(U, Pu)O_2$ ,  $(U, Pu)N$ ) в її додають ультрадисперсний порошок  $UO_2$  з розмірами нанокристалітів  $\sim 40$  нм. Активація процесу спікання за рахунок нанодобавок може стати одним з напрямів створення технологій нових видів уранплутонієвих оксидів і нітридів для ядерного палива швидкої енергетики (Рис. 1).



а – стандартна мікроструктура;

б – мікроструктура, отримана з використанням нанодобавок.

Рисунок 1 – Мікроструктура ядерного палива.

Дисперсно-зміцнені оксидами (ДЗО) феритно-мартенситні сталі. Нанодисперсні ДЗО-сталі. Збільшення ефективності роботи і терміну служби перспективних реакторів на швидких нейтронах вимагає, насамперед, підвищення ступеня вигорання палива до 18-20% без зниження параметрів теплоносія. Один з шляхів рішення даної проблеми – це створення і використання нового класу феритно-мартенситних радіаційно-стійких сталей, зміцнених частинками оксидів нанометрового розміру (ДЗО-сталі).

Сталь ЕП450 ДЗО має феритну структуру з витягнутими областями вздовж напрямку екструзії, що складаються з крупних (30-50 мкм) і дрібних (0,5-2 мкм) зерен. Термічна повзучість сталі ЕП -450 ДЗО при температурах 650-700°C значно нижче в порівнянні зі звичайною сталлю [2].

Вражаючі характеристики ДЗО-сталей, як по механічним властивостям, так і по радіаційній стійкості дозволяють планувати використання подібних сталей у термоядерній енергетиці в якості матеріалу першою стінки і бланкету термоядерного реактора.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кириченко В. Г. Особенности структуры нанометрических поверхностных слоев графита / В. Г. Кириченко, Е. С. Мельникова // Вісник Харківського національного університету. Сер. фізична «Ядра, частинки, поля». – 2009. – Вип. 4/44/. – № 878. – С. 79–85.
2. Агеев В. С. Использование методов металлургии распыленных и быстроокаленных порошков для изготовления оболочек ТВЕЛОВ из дисперсно-упрочненных оксидами (дуо) жаропрочных ферритно-мартенситных сталей / В. С. Агеев, А. А. Никитина, В. В. Сагарадзе та ін. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2007. – № 2 (90). – С. 134–141.

УДК 629.7.8

Констандій Н.О.

студ. гр. М-612м НУ «Запорізька політехніка»

### НАНОСТРУКТУРОВАНІ ПОКРИТТЯ НА ДЕТАЛЯХ ГТД ЗАСТОСУВАННЯ, ВЛАСТИВОСТІ

Одним з найважливіших елементів авіаційної промисловості є газотурбінні двигуни (ГТД), які використовуються в повітряному транспорті та виробництві енергії. Виробництво та ремонт деталей ГТД є складним технологічним процесом, який потребує високої точності та якості виконання. Щоб підвищити продуктивність та ефективність деталей ГТД, застосовуються різні технології, в тому числі й наноструктуровані покриття.

Основна мета застосування наноструктурованих покриттів – це покращення властивостей поверхні матеріалів. Наночастинки, що входять до складу покриттів, можуть забезпечувати покращену міцність, твердість, антикорозійність, зносостійкість та інші властивості. Наноструктуровані покриття – це тонкі плівки, які застосовуються для покращення властивостей поверхні матеріалів. Вони складаються з наночастинок, які можуть мати різний розмір та форму, і застосовуються для захисту від корозії, зносу та інших негативних впливів [1].

Наноструктуровані покриття можуть бути використані на різних поверхнях, таких як метали, пластмаси, скло та інші матеріали. Отже, наноструктуровані покриття можуть бути використані на деталях газотурбінних двигунів для поліпшення їхніх властивостей та продовження терміну експлуатації. Такі покриття забезпечують зниження тертя та зносу деталей, що дозволяє збільшити їхню ефективність та зменшити витрати на ремонт та заміну.

Дослідження показали, що наноструктуровані покриття мають властивості, які роблять їх особливо корисними для застосування на деталях ГТД. Зокрема, ці покриття мають високу твердість та міцність, стійкість до високих температур та корозії.

Застосування наноструктурованих покриттів на деталях ГТД має великий потенціал для покращення ефективності та надійності газотурбінних двигунів. Водночас, важливо продовжувати дослідження в цій галузі, щоб розширити знання про властивості та можливості застосування наноструктурованих покриттів на деталях ГТД.

У майбутньому, наукові дослідження та технології розвитку наноматеріалів можуть привести до винайдення нових типів наноструктурованих покриттів, які ще більш ефективні та стійкі до впливу навколишнього середовища та високих температур. Застосування таких матеріалів на деталях ГТД може покращити ефективність та надійність газотурбінних двигунів, що є особливо важливим у галузі авіаційного транспорту та енергетики [2].

У цілому, наноструктуровані покриття на деталях ГТД є перспективним напрямком розвитку технологій та наукових досліджень. Вони можуть покращити ефективність та забезпечити більш довговічну експлуатацію газотурбінних двигунів, що в свою чергу допоможе зменшити витрати на ремонт та заміну деталей, а також підвищити економічну ефективність їхнього використання.

Можна зазначити, що наноструктуровані покриття мають ряд переваг порівняно з традиційними покриттями. Вони забезпечують підвищену міцність та зносостійкість, мають різні структурні властивості та тонку товщину [1].

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Вітюк Г. І. Нанотехнології і наноматеріали: перспективи застосування в сучасному виробництві / Г. І. Вітюк, О. С. Головащук, В. І. Маслов, Е. А. Клейменова // Науково-технічний журнал «Наука та прогрес транспорту». – 2018. – № 5. – С. 7–9.

2. Наноструктуровані шари та покриття, отримані за допомогою іоноплазмових потоків у титанових сплавах та сталях / О. М. Івасишин, О. Д. Погребняк, С. М. Братушка. – К. : Академперіодика, 2011. – 286 с.

## **ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ І НАНОТЕХНОЛОГІЙ У ВІЙСЬКОВІЙ СПРАВІ**

Мета роботи – показати всі сторони розвитку наногалузі у військовому промисловому комплексі.

«Костюм скорпіона» – це, по суті, м'яка броня, яка захищає солдата від необмеженої кількості куль – на відміну від сучасних бронезилетів, де кількість прийнятих куль обмежена.

Пульс, тиск, температуру солдата зчитують мікроскопічні датчики в костюмі, дані передаються лікареві, який знаходиться за сотні кілометрів від місця бойових дій. Той дає «костюму» команду зробити потрібні ін'єкції. «Костюм» попередить солдата про хімічну або біологічну атаку.

Накази універсальному солдатові приходитимуть, відображаючись на захисному склі його шолома. Шолом замінить йому бінокль і прилад нічного бачення. В рюкзаку за спиною солдата розміститься апаратура глобальної системи позиціонування, яка не дозволить йому заблукати навіть у найскладнішій місцевості.

Імплантовані системи, регулювання життєдіяльності організму.

Наступним природним етапом у дослідженнях можливостей аналізу, регулювання та підвищення фізичних та інтелектуальних «бойових показників» військовослужбовця є введення різноманітних пристроїв безпосередньо в організм, тобто імплантація датчиків у тіло людини. Такий підхід є цілком природним, оскільки у нормальних (природних) умовах будь-яке регулювання активності життєдіяльності організмів здійснюється саме «зсередини».

Розумний пил (англ. smartdust) – крихітні пристрої (групові роботи), що самоорганізуються, обмінюються бездротовими сигналами і працюють як єдина система [1].

Групуючи разом, моти (від англ. mote – «Пилинка») автоматично створюватимуть дуже гнучкі мережі з малим споживанням живлення. Области їх застосування можуть змінюватись від систем управління кліматом до пристроїв розваги, що взаємодіють з іншими інформаційними пристроями.

Захист від біологічної та хімічної зброї – так як такі токсини, як рицин, не містять ДНК, і, відповідно не можуть бути впізнані детектором HANAA, то компанія CombiMatrix випустила пристрій на основі іммунохімічного чіпа, яке може впізнавати 5 токсинів типу рицину.

Також для біологічного захисту будуть застосовуватися наноматеріали. Девід Додерер, інженер з US Global, заявив, що компанія розробила повітряні фільтри на основі нановолокон, які спочатку призначалися для астронавтів

NASA. Завдяки ультрамалих порам (близько 50 нм), фільтр не пропускає окремі віруси і бактерії [2].

Методи захисту від нанотехнологічних систем військового призначення.

Необхідність організації якихось методів оборони від нанотехнологічних систем військового призначення диктується передбачуваним і можливим широким використанням таких систем у недалекому майбутньому, особливо міні-, мікро- і нанороботів, і навіть нових засобів хімічного і біологічного поразки. Надалі, у міру розвитку та впровадження ще більш витончених методів (молекулярні НТ), необхідність у розробці та організації нових засобів захисту від нових засобів нападу стане ще більш актуальною, оскільки на озброєнні сторін може з'явитися безліч пристроїв, що працюють на основі різноманітних нових фізико- хімічні ефекти.

Ефективність використання гіпотетичних засобів нападу і захисту із застосуванням НТ в даний час практично неможливо оцінити, тому навіть неясно, яким буде їх співвідношення в рамках реальної оборонної стратегії армій майбутнього. Загалом можна лише відзначити, що у майбутніх військових конфліктах дедалі важливішу роль відіграватимуть запобіжні та превентивні дії.

Застосування наноматеріалів у військовому обладнанні відкриває нові можливості для поліпшення його міцності. Зусилля сучасних нанотехнологів зосереджені на керамічних матеріалах.

На сьогоднішній день компанія Triton Systems (ex.NanoTriton) випустила покриття NanoTuf™ для прозорих полімерних поверхонь, яке в кілька разів збільшує міцність пластика. NanoTuf™ складається з наночастинок в розчині. При нанесенні їх на пластикову поверхню вони утворюють надтверду плівку, яка не тільки захищає від біологічних та хімічних агентів, але і від попадання кулі! [3, с. 38].

Військові машини припускають оснастити спеціальною «електромеханічної фарбою», яка дозволить міняти їм колір на зразок хамелеона, а також запобіжить корозію і зможе «зтягувати» дрібні пошкодження на корпусі машини. «Фарба» буде складатися з великої кількості наномеханізми, які дозволять виконувати всі вищеперелічені функції.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Розумний пил [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Розумний\\_пил](https://uk.m.wikipedia.org/wiki/Розумний_пил)
2. Заява Девіда Додерера [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.upi.com/Science\\_News/2004/05/21/Nanotechnology-advancing-in-military-apps/78671085152500/](https://www.upi.com/Science_News/2004/05/21/Nanotechnology-advancing-in-military-apps/78671085152500/)
3. Покриття NanoTuf [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.navysbir.com/docs/2001NavySuccess.pdf>



УДК 620.18.541.18

Черній Ю.О.<sup>1</sup>, Кривих Ю.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-612М НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## **РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОМАТЕРІАЛІВ І НАНОТЕХНОЛОГІЙ, ЗАСТОСОВАНИХ В АВІАДВИГУНОБУДУВАННІ**

Нанотехнології і наноматеріали є нині одним з найбільш перспективних напрямів науки, технології і промисловості. Основні перспективи розвитку нашої індустрії в частині створення наноматеріалів і нанотехнологій пов'язані з удосконаленням підходів до проектування нових виробів і вузлів техніки різного призначення, з розробкою нових моделей, що дозволяють конструювати і прогнозувати необхідні технічні характеристики виробів із застосуванням наноматеріалів із спеціальними властивостями, визначати чіткі взаємозв'язки матеріал-конструкція [1].

Фізико-механічні властивості і експлуатаційні характеристики металовиробів залежать не лише від хімічного складу сплавів, з яких їх виготовляють, але і від міри подрібнення структурних «складових». Відомо, що чим дрібніше структура, тим вище механічні властивості металовиробів. Одним з найбільш широко поширених способів подрібнення структурних складових металевих композицій є модифікування [2].

Розглядається підвищення якості довгомірних лопаток ГТД за рахунок об'ємного модифікування жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВИ нанодисперсними композиціями.

В якості модифікаторів нікелевого сплаву застосовувалися нанодисперсні з'єднання на основі титану з розміром часток 10...100 нм. За допомогою запропонованого способу модифікування можна досягти значного подрібнення макроструктури лопаток турбіни ГТД. У модифікованих лопатках середній розмір макрозерна зменшився з 3...10 мм до 0,1...1 мкм, тобто в 10...12 разів. Також в модифікованих лопатках усунена стовбчастість і нерівномірність структури по висоті і перерізу лопаток, що має місце в лопатках серійного виробництва. Досягнуте підвищення пластичних властивостей, збільшилося з 15,8 % в початкових до 21,3 % – в модифікованих зразках, що є важливим показником для довгомірних лопаток. Також спостерігається підвищення ударної в'язкості модифікованих зразків від 6,1 кгм/см<sup>2</sup> до 7,0 кгм/см<sup>2</sup>. Випробування зразків на довготривалу міцність при 850°C показали значне збільшення їх жароміцності в порівнянні з немодифікованими зразками [1].

Перспективні напрямки застосування нанотехнологій в авіації:

– підвищення міцності літальних апаратів;

- зниження ваги;
- поліпшення аеродинаміки і зниження тертя;
- боротьба з обмерзанням;
- підвищення маскувальних здібностей літальних апаратів;
- підвищення живучість літальних апаратів.

Основним завданням нанотехнологій в області матеріалів є створення високоміцних композитів і полімерів, одночасно зі збереженням легкості і пластичності. Підвищення міцності конструктивних елементів підвищує і ресурс літака. Досягти підвищення міцності можливо завдяки застосуванню новітніх композитних полімерних матеріалів, які значно збільшують міцність конструкції і знижують її вагу.

Рішення найважливіших завдань аеродинаміки відчутно знижує опір літальних апаратів на різних висотах польоту. Зменшення опору, що виконують тривалий політ, що значно знижує витрату палива.

Нанотехнологічні методи створення гідрофобних поверхонь дозволяє істотно просунути у вирішенні проблеми обмерзання. Це можливо при створенні такої поверхні і покриття, на основі гідрофобної структури, яка перешкоджатиме появі льоду, а також, у разі його виникнення, повністю видалить його за допомогою нагріву або деформації форми.

Найбільш перспективним напрямом застосування наноматеріалів є зниження рівня помітності літальних апаратів в широкому діапазоні довжин хвиль. Куди важливіше добитися зниження помітності об'єкту в повітрі в радіодіапазоні, ніж візуального ефекту невидимості. Це досягається застосуванням спеціальною формою фюзеляжу і використанням поглинаючих і відбиваючих матеріалів і покриттів.

На даний момент найсучасніші розробки застосовані в конструюванні і створенні літаків п'ятого покоління: це надміцні і легкі полімери, новітні електронні помічники, що збільшують живучість літака до тридцяти разів, електромеханічна радіопоглинаюча фарба, що забезпечує зниження візуальної помітності і помітності у полі зору радару [2].

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Маслюк В. А. Отримання, структуроутворення і властивості зносостійких матеріалів «залізівуглецевий сплав – зернистий наповнювач із твердих сплавів» / В. А. Маслюк, Є. С. Караїмчук // Порошкова металургія. – 2019. – № 7/8. – С. 78–87.

2. Колобов Г. А. Жароміцні композити на металевій, інтерметалідній і керамічній основі / Г. А. Колобов, Д. В. Распорня, А. В. Осипенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – № 1. – С. 87–89.

УДК 621.793

Лазарев І.О.<sup>1</sup>, Лазарева О.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-612м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## **НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПОВЕРХНІ АДГЕЗІЙНОГО КОНТАКТУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ПОКРИТТІВ**

Можливості покращення цілого ряду експлуатаційних властивостей деталей, елементів конструкцій та інструменту з традиційних конструкційних матеріалів практично вичерпані. Це обумовлює необхідність пошуку нових шляхів підвищення таких характеристик, як міцність та зносостійкість поверхневого шару. Підвищення зносостійкості деталей та інструменту, які працюють в умовах інтенсивного тертя та значних навантажень, все більше пов'язують з модифікацією поверхні. Серед великої кількості різноманітних методів модифікації все більше застосування знаходять вакуум-плазмові покриття, які характеризуються високою твердістю, стійкістю до зношування та високою теплостійкістю [1].

Разом з тим, використання традиційного суцільного покриття в процесі експлуатації призводить до його інтенсивного руйнування. Уникнути руйнування покриття в результаті порушення когезійної (розтріскування) і адгезійної (відшарування) міцності можливо, замінивши суцільний шар покриття на переривчастий (дискретний) [2]. Вплив параметрів покриття дискретного типу в умовах контактного навантаження з урахуванням сил тертя на напруженість поверхні адгезійного контакту і, відповідно, на міцність зчеплення покриття з основою, вивчено недостатньо.

Використання сучасних чисельних методів, наприклад, таких, як метод скінчених елементів, дозволяє визначити напружено-деформований стан деталей та інструменту з покриттями дискретного типу з урахуванням експлуатаційних навантажень. Для визначення напружено-деформованого стану в системі «основа-покриття» розглянуто твердосплавну пластину ВК8 з вакуум-плазмовим покриттям дискретного типу на основі сполук титану. Формування такого покриття відбувається з використанням спеціальних «масок» з чарунками різних форм і розмірів, що дозволяє створювати конструкцію покриття з заданими геометричними параметрами [2].

Так, зі зростанням сили тертя максимальні дотичні напруження переміщуються із глибини матеріалу основи до поверхні адгезійного контакту, переходячи в дискретну ділянку покриття, а потім і на його поверхню. Збільшення коефіцієнту тертя призводить також до того, що максимум дотичних напружень зміщується в напрямку дії сили тертя, а в площині адгезійного контакту дотичні напруження розподілені вздовж всієї поверхні контакту.

Такі розрахунки дозволяють встановлювати залежність між величиною і характером розподілу дотичних напружень в системі «основа-покриття» для деталей покриттями дискретного типу, які працюють в умовах інтенсивного тертя та значних навантажень, в залежності від геометричних розмірів дискретних ділянок та типів покриттів. А також дозволять вибрати оптимальні конструктивні параметри покриття, що дає можливість запобігти руйнуванню поверхні деталей внаслідок відшарування покриття від основи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Антонюк В. С. Аналіз напружено-деформованого стану різального інструменту з покриттями / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, В. І. Калініченко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія приладобудування. – 2004. – Вип. 27. – С. 84–89.
2. Антонюк В. С. Дискретні покриття на різальному інструменті / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, Б. А. Ляшенко, А. В. Рутковский // Пробл. прочноти. – 2007. – № 1. – С. 138–143.

УДК 629.7

Соляненко О.М.<sup>1</sup>, Качан О.Я.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-612м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

## ВИКОРИСТАННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ЛОПАТОК ГТД

Чисельні наукові роботи [1,2] виявили, що при досягненні розмірів кристалів нижче певної порогової величини відбувається суттєва зміна властивостей. Ці ефекти спостерігаються при формуванні характерних елементів структури (як правило, кристалічних зерен) із середнім розміром не більше 100 нм.

В основі модифікування первинного зерна нікелю – зародковий механізм. У модифікованому нікелевому сплаві є додаткові центри кристалізації, якими служать частинки металевих з'єднань, спеціально введені в розплав.

В результаті модифікування досягнуто подрібнення структурних складників сплаву в 3–4 рази та загальну стабілізацію структури.

Механічні випробування зразків показали підвищення усіх параметрів у модифікованому стані:  $\sigma_B$  на 10 %;  $\sigma_{0,2}$  – на 13 %;  $\delta$  – на 20 % та КСЧУ на 40 % в порівнянні з вихідними зразками.

Завдяки особливостям будови, ультрамалій товщині шарів і їхній великій кількості, а також можливості щільного сполучення шарів різних матеріа-

лів, наноструктуровані покриття поєднують у собі якості шаруватих систем і специфічні властивості нанооб'єктів.

Численні дослідження показали, що зі зменшенням товщини плівки до 100 нм її поверхневі властивості починають домінувати над об'ємними.

Аналіз дослідження корозійної стійкості зразків із покриттями показав, що швидкість корозії у наноструктурованого покриття менша на 25 %, ніж у зразків із тришаровим покриттям, на 20 %, ніж у зразка з багатошаровим покриттям, і на 38 %, ніж у зразка без покриття.

Для матеріалу VT-6 встановлено [1], що межа втоми для наноструктурованого покриття вища на 10,3 % порівняно з одношаровим покриттям і на 8,3 % вища, ніж на зразку з багатошаровим (тришаровим) покриттям.

У зразків матеріалу VT-6 з одношаровим покриттям TiN ерозійна стійкість у 1,5 раза вища, ніж у вихідних зразків VT-6 без покриття. У зразків з наноструктурованим покриттям Ti-TiN ерозійна стійкість у 1,9 раза вища, ніж у вихідних зразків без покриття, і в 1,3 раза вища, ніж у зразків з матеріалу VT-6 з одношаровим покриттям TiN.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Грекова М. В. Підвищення структурної стабільності та властивостей жароміцних нікелевих сплавів для лопаток гтд обробкою наноматеріалами / М. В. Грекова, Н. Є. Калініна, В. Т. Калінін та ін. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 8. – С. 60–65.

2. Большаков В. І. Наноматеріали і нанотехнології / В. І. Большаков, В. З. Куцова, Т. В. Котова. – Дніпро : ПДАБА. – 2016. – 220 с.

УДК 629.7

Волошин Д.О.<sup>1</sup>, Бойко І.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> студ. гр. М-712м НУ «Запорізька політехніка»

## КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АВІАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У зв'язку зі стрімким розвитком ракетно-космічної та авіаційної промисловості, підвищенням вимог до якості та експлуатаційних характеристик вузлів та апаратів, таких як: мінімальна маса, максимальна жорсткість і міцність вузлів, максимальний ресурс роботи конструкцій в умовах експлуатації, висока надійність, виникла потреба у застосуванні новітніх матеріалів для виготовлення деталей машин. Саме такими матеріалами являються композити, на основі сучасних скляних волокон у поєднанні з полімерними, металевими, вуглецевими та іншими видами матриць (зв'язуючих).

Принципове значення заміни традиційних конструкційних матеріалів на композиційні матеріали полягає, очевидно, в тому, що замість металів із рівними у всіх напрямках властивостями з'являється можливість використання великої кількості нових матеріалів із властивостями, які розрізняються в різних напрямках залежно від орієнтації наповнювача. Причому, ця відмінність властивостей є регульованою, і у конструктора з'являється можливість цілеспрямовано створювати композиційні матеріали під конкретну конструкцію, у відповідності з діючими навантаженнями і особливостями її експлуатації.

У ході досліджень виявлено, що застосування композиційних матеріалів приводить до зниження ваги в діапазоні від 20% до 50%, проблема втоми і корозії практично відсутні. Також при зміні температури спостерігається термічна стабільність композиційних матеріалів. Саме цьому сьогодні композити є найважливішими конструкційними матеріалами і залишаться в багаторічній перспективі «матеріалами майбутнього».

УДК 629.78

Шеремет О.І.

студ. гр. М-632м НУ «Запорізька політехніка»

## **ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ І НАНОТЕХНОЛОГІЙ У КОСМІЧНИХ АПАРАТАХ**

Космонавтика – одна з найбільш перспективних та масштабних областей застосування нанотехнологій та наноматеріалів. Найближчими роками нанотехнології та різноманітні наноматеріали будуть дедалі ширше використовуватися при створенні нових зразків космічної техніки, що значно змінить підходи до конструювання космічних апаратів [2].

Як сорбуючий матеріал композитів для виготовлення ракетних шпательів і термозахисту космічного корабля використовуються вуглецеві волокна. Маючи високу термостійкість, хороші теплоізоляційні властивості, корозійну стійкість до впливу газових і рідких середовищ, високими питомою міцністю, опором втоми і жорсткістю, вони перевершують всі відомі жаростійкі волоконні матеріали [1]. Це дає можливість застосовувати вуглецеві наноструктури в якості теплових екранів та теплоізоляційних матеріалів у високотемпературній техніці. Також вони використовуються для термозахисту космічних кораблів, літаків, ракет (носових частин, деталей двигунів теплопровідних пристроїв). Конструкційні матеріали на основі вуглецевих наноструктур, завдяки своїй легкості, дозволяють максимально знизити малогабаритні характеристики пристроїв.

Електропровідність вуглецевих волокон дозволяє створювати на їх основі засоби захисту виробів ракетної та ракетно-космічної техніки від ста-

тичної електрики: достатньо ввести в матеріал 0,02-1 % вуглецевого волокна, щоб електричні заряди повністю «стікали» з поверхонь деталей, виготовлених з використанням цього матеріалу.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Антоненко С. В. Різні варіації вуглецю та їх застосування. Нові вуглецеві нанооб'єкти / С. В. Антоненко, О. С. Малиновська, С. М. Мальцев // Нанотехніка. – 2007. – № 11. – С. 8–14.

2. Новіков Л. С. Перспективи застосування наноматеріалів у космічній техніці : навч. посібник / Л. С. Новіков, О. М. Вороніна. – Київ : Університетська книга, 2008. – 188 с.

## СЕКЦІЯ «МЕТАЛОРИЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ ТА СИСТЕМИ»

УДК 621.891:669

Циганов В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

### СТРУКТУРНА ОДНОРІДНІСТЬ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СТАН ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ТЕРТІ З СКЛАДНИМ ДИНАМІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Процеси тертя і зношування, а також руйнування поверхневих шарів трибоз'єднань визначаються динамічним характером навантажень в контакті, амплітудами взаємних переміщень, що створюють специфічні умови контактної взаємодії. Такий комплекс умов навантаження викликає складний напружений стан поверхневих шарів контактуючих пар, що супроводжується відповідним механізмом зношування. Виникає нагальна потреба у визначенні кінематичних та динамічних особливостей навантаження трибовузлів з урахуванням їх еволюції в процесі експлуатації, розгляду зміни стану поверхневого шару, зносостійкості і відповідного механізму зношування трибоз'єднань.

Використання трибоспектрального методу (аналіз трибограм та результатів статистичної обробки значень сили тертя індентора під час сканування поверхневого шару) і методу аналізу електронної будови поверхневого шару металів на основі зміни роботи виходу вільних електронів (РВЕ) дозволило встановити зв'язок між структурною однорідністю поверхневого шару та його енергетичним станом при терті із складним динамічним навантаженням.

Показано, що оцінка зносостійкості трибосистем повинна проводитись на основі використання принципів структурно-енергетичної адаптації матеріалів при терті з різними видами термомеханічного навантаження. Так, навантаження зразків поперечними проковзуваннями з амплітудою до 0,08 мм призводить до збільшення об'ємної інтенсивності зношування для сплаву ХТН-61 – 2,6 рази в порівнянні з об'ємною інтенсивністю зношування при двокомпонентному навантаженні (без поперечних проковзувань), що обумовлено підвищенням однорідності поверхневого шару (рівномірності і розміру фрагментів) та зниженням РВЕ з 4300 до 4000 еВ і зменшенням розкиду в значеннях РВЕ.

Запропонована концепція підвищення зносостійкості трибосистем, яка на відміну від існуючої полягає в реалізації триботехнічного принципу мінімізації зношування матеріалів на основі використання реологічного явища структурно-енергетичної адаптації матеріалів, що супроводжується деформацією первинної структури при терті з різними видами динамічного навантаження. Розроблено модель структурної організації і руйнування поверхні при терті з багатокомпонентним динамічним навантаженням як цілісної картини



динамічної системи тертя, яка на відміну від існуючих дозволила обґрунтувати та урахувати динаміку умов навантаження, структурного та енергетичного стану поверхневих шарів, мікрогеометрії поверхні, деструкційних явищ.

Це дозволяє сформулювати триботехнічний принцип мінімізації зносу і зносостійкої здатності матеріалів, який полягає в створенні таких умов контакту, коли формується поверхневий шар з неоднорідним за міцністю та величиною фрагментів структурним станом підвищеної міцності в межах статистично визначної базової довжини.

УДК 519.873

Фролов М.В.<sup>1</sup>, Танченко С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## **ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНИХ КІЛЬКОСТІ ЗРАЗКІВ ТА ЧАСУ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ З НУЛЬОВИМИ ВІДМОВАМИ**

Одним з різновидів випробувань будь яких технічних об'єктів є демонстраційні метою яких є демонстрація факту, що виріб відповідає мінімальним встановленим вимогам. Демонстрація відбувається шляхом проведення випробувань вибірки зразків об'ємом  $n$  на протязі певного часу  $t$ , при цьому жоден з елементів вибірки не має відмовити. Такого роду тести носять назву «випробування з нульовими відмовами» або використовуються такі синонімічні назви як «сертифікаційні випробування», «кваліфікаційні випробування» та ін.

Нижня межа надійності  $R_L$  виводиться з міркувань про відсутність відмов в  $n$  тестах за біноміальним розподіленням. Є підстави вважати що відмови переважної кількості технічних об'єктів можуть бути описані розподіленням Вейбулла з параметром форми  $\alpha$  та параметром масштабу або характеристичним часом  $\beta$ . Наведені міркування призводять до наступного ключового виразу [1] з якого можуть бути отримані співвідношення для оцінки тих чи інших характеристик:

$$\exp \left[ - \left( \frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \geq (1 - q)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

де  $q$  – довірна імовірність.

Одним з таких співвідношень, що може бути отримано з (1) є співвідношення між об'ємом вибірки та часом випробування  $t$  який має бути більше або дорівнювати мініимальному  $\tau$

$$t \geq \tau = L_L \left[ \frac{\ln(1-q)}{n \cdot \ln\left(1 - \frac{p}{100}\right)} \right]^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (2)$$

де  $L_L$  – нижня межа часу безвідмовної роботи з імовірністю відмови  $p$  в %.

При плануванні випробувань за виразом (2) вважають, що параметр форми  $\alpha$  відомий та дорівнює значенню отриманому зі статистики відмов -  $\hat{\alpha}$ . Але не враховується, що  $\alpha$  є величиною випадковою і лежить в межах довірчого інтервалу [2]:

$$\hat{\alpha} \cdot \exp\left(\frac{-0,78 \cdot Z_q}{\sqrt{N}}\right) \leq \alpha \leq \hat{\alpha} \cdot \exp\left(\frac{0,78 \cdot Z_q}{\sqrt{N}}\right). \quad (3)$$

Тут  $N$  – об'єм вибірки за якою визначаються параметри розподілення; коефіцієнт  $Z_q$  залежить від довірчої імовірності і приймає наступні значення [2]:  $Z_{0,9} = 1,645$ ;  $Z_{0,95} = 1,96$ ;  $Z_{0,99} = 2,576$ .

Враховуючи (3) для  $L_L = 60$  хв.;  $\alpha = 3$ ;  $q = 0,95$ ;  $p = 10\%$  для  $n = 5$  мінімальний час випробувань  $\tau$  визначається як інтервал від 129 до 93 хвилин, тоді як рекомендоване (номінальне) значення складає 107 хв. Тобто в цьому випадку випробування треба проводити не менше 129 хвилин і умова відсутності відмов може бути і не виконана, хоча цей факт не обов'язково буде свідчити що зразки випробування не пройшли. Таким чином потрібно прагнути до звуження різниці між верхнім  $\tau_U$  та нижнім  $\tau_L$  значеннями мінімального часу випробування і в якості показника для вибору кількості зразків пропонується прийняти аналог коефіцієнту осциляції, що буде характеризувати коливання крайніх значень відносно номіналу:

$$Ko = \frac{\tau_U - \tau_L}{\hat{\tau}}, \quad (4)$$

де  $\hat{\tau}$  – номінальний мінімальний час випробувань, розрахований для показника форми  $\hat{\alpha}$ . На Рис.1 показано графік залежності  $Ko$  від кількості зразків для різних значень довірчої імовірності.

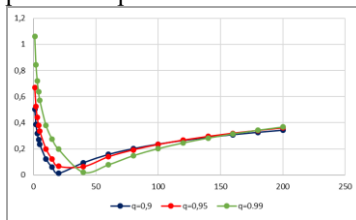


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнту осциляції від кількості зразків.

Мінімальний коефіцієнт для  $q=0,9$  відповідає  $n=20$  – час випробування складе 63 хв. при номіналі 62. Така кількість зразків і може бути прийнята для випробувань. При зростанні кількості зразків відхилення необхідного часу випробувань від номінального буде дещо зростати але не перевищить 5 хв.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. LaFollette J. P. Introduction to reliability demonstration testing of nonelectronic components / J. P. LaFollette. – Griffiss Air Force Base, NY : Rome Air Development Center, 1987. – 123 p.

2. Weibull analysis handbook / R. B. Abernethy et all. – West Palm Beach, FL : Pratt & Whitney Aircraft, 1983. – 228 p

УДК 621.891:669

Циганов В.В.<sup>1</sup>, Первеев Д.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-212м НУ «Запорізька політехніка»

### **МЕТОДОЛОГІЯ ЕФЕКТИВНОГО ШЛІФУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІМЕРУ У МОТЗ**

В умовах швидкого розвитку машинобудування виникають нові вимоги до технології виготовлення деталей, особливо під час їх фінішної обробки. Одним із перспективних варіантів підвищення ефективності шліфування поверхонь є застосування мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТЗ) з високомолекулярною полімерною складовою. Відомо, що полімери можуть бути використані для поверхневого диспергування твердих тіл. Останні наукові дослідження показують, що застосування полімерів допомагає прискорити процеси припрацювання в маслах, доведення та притирання полімер-абразивними складовими та вирішити інші технічні проблеми. Це стало початком систематичних досліджень властивостей полімерів з визначенням особливостей поверхневого пластифікування та диспергування металів під час різання. Можна припустити що такі процеси можуть бути пов'язані з дією на метал макрорадикалів та інших продуктів деструкції полімеру.

Були розглянуті полімерні матеріали на основі полімерних латексів, синтезованих сополімерних продуктів та порошкоподібних полімерів, для можливості використання у процесах механічної обробки металів. Після аналізу фізико-механічних та хімічних властивостей полімерів для першого етапу досліджень було обрано сополімер акрилату та акриламід у кабію. Позитивними властивостями цього полімеру є хороша термостабільність, що дозволяє використовувати його у різних процесах обробки, які пов'язані з високими температурами. Він

добре розчиняється у воді, що дозволяє легко використовувати його для приготування різноманітних розчинів та дисперсій.

Для визначення ефективності сополімеру в процесі шліфування розроблена методологія досліджень та відповідні пристосування. При цьому контролюється концентрація полімеру у складі МОТЗ, проводяться виміри температури в зоні різання, сили різання, шорсткість поверхні, корегуються режими різання, визначаються склад і перетворення полімерного МОТЗ.

Дослідження передбачено проводити на плоскошліфувальному верстаті 3Г71М. При цьому використовується комплекс приладів, а саме: динамометр, для проведення активного контролю двох складових сил різання ( $P_z$ ) ( $P_y$ ) з реєстрацією показників на комп'ютері, мультиметр із термопарою для визначення температури у зоні різання, профілометр для визначення шорсткості поверхні, мікрометр і штангенциркуль для вимірювання знятого шару металу з заготовки, мікроскопи для визначення стану обробленої поверхні та абразивних зерен шліфувального круга. В якості зразка передбачено використання заготовки розмірами 35x10x20 мм з сталі 40Х. У якості МОТЗ – водний розчин зшитого сополімеру акрилату та акриламід у калію.

Очікуваним результатом дослідження є підвищення продуктивності процесу обробки та якості оброблювальної поверхні вуглецевої сталі, визначення зміни характеру зношування шліфувального круга, зменшення енергетичних витрат на різання.

УДК 621.9

Штанкевич В.С.<sup>1</sup>, Афанасьєв Ю.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-222м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВПЛИВ МЕТОДУ ЗАТОЧУВАННЯ СВЕРДЛА НА ЙОГО ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ**

Оброблення отворів є найбільш трудомістким процесом серед процесів обробки різанням. Тому підвищення продуктивності та визначення ефективних умов свердління є невідкладним технологічним завданням.

При заточці свердла необхідно забезпечити потрібні величини кута при вершині  $2\phi$ , задні кути  $\alpha$ , кут нахилу поперечної різальної кромки  $\psi$ , симетричність головних ріжучих кромок та спад задніх поверхонь.

Величина заднього кута суттєво впливає на стійкість інструменту. Однією із причин зниження стійкості інструменту є неоптимальні величини геометричних параметрів різальної частини. Це можна виправити за рахунок переточування інструменту.

Методи заточування спіральних сверدل по задній поверхні суттєво впливають на їх стійкість та величину осьової сили. Задні поверхні можуть мати різну форму: частину конуса, сфери, циліндра [1].

Заточення свердл по конусу має перевагу в конструктивній простоті верстатів та пристроїв. Передні кути на поперечній різальній кромці досягають дуже великих від'ємних величин, що призводить до підвищених осьових зусиль. Конічне заточування використовується для заточування свердл із швидкорізальної сталі та твердого сплаву всіх діаметрів і може бути рекомендована для переточування свердл із швидкорізальної сталі діаметром від 1 до 15 мм з невеликим зносом.

Перевага гвинтового заточування полягає в універсальності його застосування для різних видів свердл. Методом гвинтового заточування здійснюється безперервне заточування п'я свердла, що забезпечує повну геометричну ідентичність їх заточування. Розподіл величин задніх кутів уздовж ріжучої кромки сприяє рівномірному завантаженню. Передні кути на поперечній різальній кромці від'ємні, але за величиною набагато менше, ніж при конічному заточуванні, що сприяє меншій інтенсивності зносу. Основним недоліком гвинтового заточування є складність кінематики формоутворюючих рухів та підвищений знос абразивного кругу.

Заточування по трьом площинам є найбільш загальним методом площинного заточування свердл, окремими випадками якого є дво- і одноплощинне заточування. Відсутність залежності між задніми кутами утвореними у нормальному перерізі на другій та третій площинах дозволяє отримати оптимальну геометрію поперечної кромки та збільшення кута ріжучого клину пера. Триплощинне заточування забезпечує високі експлуатаційні властивості свердл, більшу стійкість, підвищену точність свердління, меншу силу різання.

При одноплощиному заточуванні відбувається роздільне заточування п'я свердла, що не завжди забезпечує повну ідентичність їх заточування. Поперечна різальна кромка при такому методі заточування є прямолінійною з досить великими від'ємними передніми кутами на ній. У загальному випадку знос свердл заточених по одній площині відбувається досить рівномірно по всій довжині кромки, що дозволяє широко використовувати цей метод, особливо для свердл виготовлених із твердого сплаву.

Отже метод заточування свердла остаточно не впливає на його працездатність та може бути обраний залежно від умов виробництва та наявного устаткування. Але для забезпечення необхідної геометрії лез свердла потрібно варіювати параметрами кожного з цих методів.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Швець С. В. Металорізальні інструменти: навч. посібник / С. В. Швець. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 272 с.
2. Швець С. В. Влияние метода заточки спиральных сверл на их эксплуатационные характеристики / С. В. Швець // Перспективні технології та прилади. – 2016. – № 9. – С. 148–153.

УДК 621.9

Штанкевич В.С.<sup>1</sup>, Бублик О.А.<sup>2</sup>

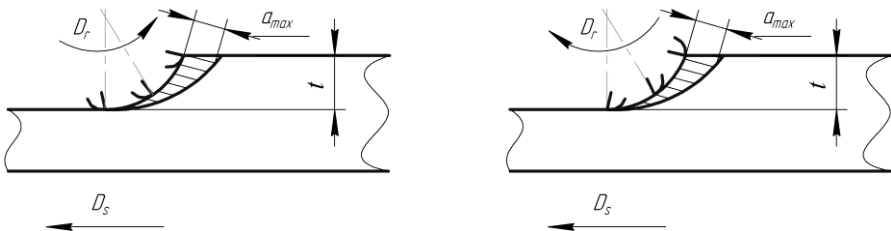
<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-222м НУ «Запорізька політехніка»

## ВПЛИВ СХЕМИ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

Фрезерування є одним з найпоширеніших методів обробки. За рівнем продуктивності фрезерування перевищує стругання і в умовах багатого серійного виробництва поступається лише зовнішньому протягуванню.

Залежно від напрямку обертання фрези та напрямку подачі розрізняють зустрічне фрезерування (коли заготовка подається назустріч обертанню фрези) і попутне (коли напрям обертання фрези та напрям подачі заготовки збігається). При зустрічному фрезеруванні товщина шару металу, що зрізується зубом фрези змінюється від 0 до  $a_{\max}$  (рис. 1 а). Поступове збільшення товщини зрізаемого шару сприяє плавній роботі фрези. Проте перш ніж врізатися в метал, що обробляється, зуб фрези внаслідок округлення різальної кромки деякий час ковзає по поверхні різання, зміцненій внаслідок пластичних деформацій під час різання попереднім зубом. Це приводить до значного спрацювання зубів фрези. Сили, які виникають при фрезеруванні цим методом, намагаються відірвати заготовку від столу, що може привести до вібрацій і погіршення чистоти поверхні [1].



а – зустрічне; б – попутне.

Рисунок 1 – Схеми фрезерування.

При попутному фрезеруванні в момент врізання зуба відбувається удар, оскільки знімається шар найбільшої товщини  $a_{\max}$ , який поступово зменшується до 0 (рис. 1 б). Зменшення товщини шару, який зрізається і те, що сила різання намагається притиснути заготовку, що обробляється, до столу верстату, сприяє підвищенню чистоти та точності обробленої поверхні.

Зустрічне фрезерування доцільно використовувати при чорновій обробці, особливо заготовок з коркою або окалиною, попутне при напівчистовій і чистовій обробці, коли вже знято корку та потрібна висока чистота обробленої поверхні.

Окрім схеми фрезерування на зниження якості обробленої поверхні можуть впливати наступні фактори: неправильне заточування фрези, биття фрези, великий знос або викришування різальних кромek зубів, неправильний вибір режимів різання та змашувально-охолоджувальної рідини, недостатня жорсткість закріплення заготовки, недостатньої жорсткості оправки, коливання тощо.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Пахаренко В. Л. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство : навч. посібник / В. Л. Пахаренко, М. М. Марчук, О. В. Пахаренко. – 2-е вид., перероб. і доп. – Рівне : НУВГП, 2018. – 252 с.

УДК 621.9

Штанкевич В.С.<sup>1</sup>, Радкевич С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-222м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРОТЯЖКИ ПРИ ПРОТЯГУВАННІ ФАСОННИХ ПОВЕРХОНЬ**

Протяжка – спеціальний інструмент, який проектують і виготовляють для оброблення однієї або декількох певних деталей. Це дорогий та складний для виготовлення і експлуатації інструмент. Тому найбільша рентабельність застосування протяжок спостерігається в масовому і багатосерійному типах виробництва.

Однак спостерігається висока ефективність протягування при обробці деталей, поверхні яких мають складний (фасонний) профіль. Це обумовлює доцільність застосування протяжок у дрібносерійному виробництві та у тих випадках, якщо необхідна точність оброблення деталі може бути отримана лише протягуванням.

Під час вибору оптимальної конструкції протяжки для обробки фасонних поверхонь намагаються знайти такі рішення, які покращать умови його створення та використання. Це призводить до того, що конструкція протяжки буде визначатися не тільки схемою зрізування припуску та методом утворення поверхні, а і винахідливістю проектувальника.

Важливою особливістю при проектуванні протяжок для обробки фасонних поверхонь є розподіл повного припуску між секціями для стабілізації сили протягування та забезпечення необхідної міцності зубців протяжки.

Розподіл припуску між секціями здійснює вплив на конструкцію секцій протяжки, їх довжину, продуктивність обробки та вартість. У загальному випадку припуск можливо розподіляти між вертикальними, горизонтальними, похилими та концентричними шарами і для зняття кожного такого шару проектується окрему секцію зубів.

Для конструкції протяжки характерне сполучення великої кількості різних елементів та їх параметрів: матеріалу різальної і хвостових частин, кроку і глибини западин зубів, числа зубів у секції, розподіл підйому зубів уздовж різальної частини і т. п.

У результаті при проектуванні можливо одержати кілька десятків варіантів конструкції. Порівняльну оцінку варіантів можна вести за заданими критеріями: мінімальній довжині, максимальному підйому на чорнових зубах, рівномірності завантаження протяжки виходячи із сили різання на різних групах зубів, найкращого розташування стружки й ін.

З усіх варіантів вибирається той, який дає мінімальну довжину протяжки, достатню плавність роботи, меншу трудомісткість виготовлення.

УДК 519.248: 005.6

Фролов М.В.<sup>1</sup>, Назарова К.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-211м НУ «Запорізька політехніка»

## **ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРУ ФОРМИ РОЗПОДІЛЕННЯ ВІДМОВ СПЕЦІАЛЬНИХ ПІДШИПНИКІВ ДЛЯ АВІАДВИГУНІВ ПРИ ПЛАНУВАННІ ВИПРОБУВАНЬ**

Підшипники встановлені в авіадвигунах відносяться до одних з найбільш навантажених елементів, що крім того працюють в екстремальних умовах, тому для цих цілей проектується та виготовляються спеціальні підшипники з жароміцних сплавів. Від їх надійності в значній ступені залежить надійність двигуна в цілому, тому особлива увага має приділятися проведенню їх випробувань. Одним з підходів є випробування з нульовими відмовами сутність якого полягає у визначенні об'єму вибірки та часу випробування на протязі якого ні один з елементів вибірки не має відмовити. При цьому обґрунтовано приймається підпорядкування розподілення відмов закону Вейбулла. Час випробування  $t$  в залежності від об'єму вибірки  $n$  визначається зі співвідношення [1] при цьому комбінація значень є предметом економічних міркувань:

$$t \geq L_L \left[ \frac{\ln(1-q)}{n \cdot \ln\left(1 - \frac{p}{100}\right)} \right]^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1)$$

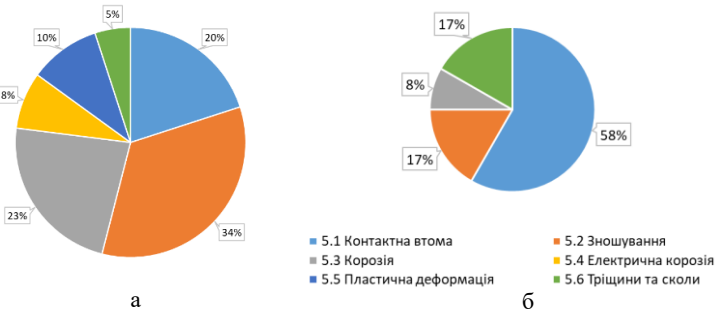


де  $L_L$  – нижня межа часу безвідмовної роботи з імовірністю відмови  $p$  в %;  $q$  – довірча імовірність, та вираз  $1 - q$  тут розглядається як ризик споживача;  $\alpha$  – параметр форми розподілення Вейбулла.

Параметр форми  $\alpha$  в повній мірі відображає фізичну природу факторів, що призводять до відмови будь якого технічного об'єкту [2] та його значення можна прогнозувати за наслідками дослідження причин відмов. Причини відмов підшипників класифікуються та деталізуються в стандарті ISO15243:2017. До них відносяться: контактна втома (5.1), зношування (5.2), корозія (5.3), електрична корозія (5.4), пластична деформація (5.5), тріщини та сколювання (5.6). Така класифікація дає можливість уніфікувати причини відмов підшипників та порівнювати їх за різних умов експлуатації.

Один з провідних виробників підшипників загального користування, компанія SKF, збирає та узагальнює інформацію про відмови підшипників за допомогою хмарного програмного забезпечення BART (Bearing Analysis Reporting Tool) та наводить статистику відмов, представлену на Рис. 1а. З чого видно що основною причиною відмов є зношування (34%), що відповідає коефіцієнту форми  $\alpha = 1,5$  [2] – значенню широко відомому в інженерній практиці розрахунків підшипників.

Аналіз металургійних досліджень, проведених виробником авіадвигунів та відповідно спеціальних підшипників для них, свідчить, що в більшості випадків двигуни знімаються з експлуатації внаслідок появи стружки в маслосистемі двигуна джерелом якої є саме підшипники. Причини що призводять до зазначеного явища наведені на Рис. 1б з чого видно, що основною є руйнування елементів підшипника внаслідок контактної втоми (58%), особливо приймаючи до уваги, що втомне руйнування додатково зустрічається в комбінації зі зношуванням та руйнуванням внаслідок підвищених контактних навантажень.



а – підшипники загального призначення;  
 б – спеціальні підшипники для авіадвигунів.

Рисунок 1 – Причини відмов підшипників за ISO15243:2017.

Оскільки втомному руйнуванню відповідає параметр форми  $\alpha \approx 3$  [2], то з наведених міркувань можна прогнозувати, що саме таке значення параметру має бути використано при плануванні випробувань. Наведені теоретичні міркування разом з оцінкою часу безвідмовної роботи потребують експериментального уточнення при проведенні подальших досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Luko S. N. Weibull analysis with assumed Weibull slope where no failures are observed / S. N. Luko // International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition. – Milwaukee, WI : SAE International, 1998. – 9 p.
2. Weibull analysis handbook / R. B. Abernethy et all. – West Palm Beach, FL : Pratt & Whitney Aircraft, 1983. – 228 p.

УДК 62-97/-98

Танченко С.В.<sup>1</sup>, Фролов М.В.<sup>2</sup>, Нотченко Р.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> студ. гр. М-222м НУ «Запорізька політехніка»

## МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ВЕРСТАТА З ЧПК МОДЕЛІ АТПР800

Точність позиціонування є одним із основних показників точності верстатів з ЧПК. Під точністю позиціонування розуміють відхилення дійсного положення робочих органів верстата від запрограмованого у системі ЧПУ, при його багаторазовому позиціонуванні в різних точках на шляху переміщення однією з координатних осей. При контролі точності позиціонування застосовується статистичний метод оцінки точності за наслідками багаторазових повторних випробувань. При цьому визначаються їх статистичні показники. Застосування статистичного методу оцінки точності обумовлено тим, що позиціонування робочих органів верстата є випадковою величиною, що залежить від багатьох чинників. При цьому випадкові відхилення можна порівняти з систематичними.

Точність позиціонування є інтегральним показником точності функціонування механічної та електронної систем верстата з ЧПК і тому має високу інформативність. Цей показник забезпечує отримання інформації про наявність параметричної відмови у багатофункціональній системі, що складається з кількох вузлів без проведення контролю кожного з них окремо.

На точність позиціонування впливають, а отже і можуть контролюватися цим інтегральним показником наступні показники точності верстата: геометрична точність сполучених поверхонь та взаємне розташування базових деталей, точність встановлення шкал виміральної системи верстата та його технічний стан, а також стан електронної частини ЧПК, що керує переміщенням робочих органів.

Зі зміною у часі цих показників змінюються також параметри точності позиціонування. Якщо встановити ознаки, що вказують на зв'язок кожного з показників контрольованої системи з параметрами точності позиціонування, то можна без розбирання верстата визначити елемент верстата, в якому виникла параметрична відмова. На верстатах, що експлуатуються, умовою досягнення високої точності є компенсація систематичних похибок переміщення робітників органів.

Осі X та Z верстата АТПр800 оснащені електродвигунами Siemens з вбудованими інкрементальними енкодерами IC2048S/R. Максимально допустиме відхилення при позиціонуванні по осям X та Z складає 2 мкм.

Відхилення від програмного положення мають визначитися за допомогою індикатору часового типу з ціною поділки 0,001 мм. Визначені відхилення слугують вихідними даними для подальшої статистичної обробки результатів дослідження, а саме визначення: дисперсії; стандартного відхилення; довірчого інтервалу середнього відхилення; коефіцієнту варіації, а також оцінки теоретичного закону розподілення. Відмінність розподілення відхилень від нормального закону може вказати на джерело похибок з метою їх подальшого усунення за рахунок конструктивних рішень або відповідного регулювання.

УДК 62-97/-98

Танченко С.В.<sup>1</sup>, Фролов М.В.<sup>2</sup>, Сурков С.Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> студ. гр. М-222м НУ «Запорізька політехніка»

## **ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ВЕРСТАТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ**

Система технічного обслуговування та ремонту техніки (ТОіР): сукупність взаємозалежних засобів, документації технічного обслуговування та ремонту та виконавців, необхідних для підтримки та відновлення якості виробів, що входять до цієї системи.

При експлуатації технологічного обладнання розрізняють три основні стратегії управління його технічного обслуговування та ремонту:

- ремонт/технічне обслуговування за подією (РТОП);
- планово-попереджувальний ремонт (ППР);

– обслуговування фактичного стану (ОФС).

РТОП застосовуються при позапланових заходах, пов'язаних з подіями, що призводять до такого стану обладнання, коли воно може нормально виконувати свої функції. Сутність системи ППР полягає в тому, що після відпрацювання обладнанням певного часу проводяться профілактичні огляди та різні види планових ремонтів, періодичність та тривалість яких залежать від конструктивних та ремонтних особливостей обладнання та умов його експлуатації та зазвичай визначаються статистичними методами на підставі досвіду експлуатації даного типу обладнання. Сутність системи ОФС полягає в тому, що періодично на обладнанні проводиться контроль ключових параметрів на підставі яких робиться висновок про його стан і період до проведення необхідних профілактичних огледів і різних видів ремонтів, періодичність і тривалість яких залежать від конструктивних і ремонтних особливостей обладнання.

На сьогоднішній день підприємства намагаються поєднувати переваги всіх основних стратегій технічного обслуговування та ремонту шляхом використання суміщеного технічного обслуговування (СТО-підходу), спрямованого як на зниження загального обсягу технічного обслуговування, так і на максимізацію терміну служби обладнання та зниження рівня витрат, пов'язаних із збільшенням міжремонтних термінів та зниженням частоти застосування РТОП.

Так як проведення комплексу робіт з ТОіР завжди пов'язане з необхідністю зупинки обладнання, тобто виключення обладнання з виробничого циклу, оптимальний підхід СТО дозволяє знизити коефіцієнт використання обладнання без суттєвого збільшення витрат.

Ідея такого технічного обслуговування полягає в тому, що на кожному тимчасовому горизонті планування ТОіР використовуються свої технології (ППР, ОФС). Так, на довгостроковому горизонті планування ТОіР за основу беруться показники ППР. Такі показники розраховуються прямим методом.

На оперативних горизонтах планування показники ТОіР визначаються виходячи з статистичної обробки даних вимірювань стану устаткування ОФС, і на їх підставі формується фінансовий резерв. Відповідно до суміщеного технічного обслуговування в міру скорочення горизонту планування здійснюється послідовне уточнення планових показників ТОіР. Основою для такого уточнення є дані про фактичний стан обладнання, технологічні режими його роботи, а також виконання планів з технічного обслуговування та ремонту обладнання в попередніх періодах.

Контроль параметрів зміни стану обладнання пропонується виконувати для наступного обладнання: Daewoo Puma 450/500 та ZAYER 20 KSU 12000.

До контрольованих параметрів будуть відноситися – геометрична точність та віброконтроль обертових вузлів, дані для статистичної обробки будуть замітяться кожен тиждень та раз у квартал відповідно. Для виявлення спеціальних трендів параметрів, пропонується використовувати ДСТУ ISO 7870-2:2016.

## **СЕКЦІЯ «ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНІ, ДОРОЖНІ, БУДІВЕЛЬНІ, МЕЛІОРАТИВНІ МАШИНИ І ОБЛАДНАННЯ»**

УДК 621.873.13

Мартовичський Л.М.<sup>1</sup>, Глушко В.І.<sup>1</sup>, Шаніна З.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### **ЙМОВІРНІСНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОЧОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ВАЖКИХ КРАНІВ**

У сучасному світі дуже гостро постає питання економії ресурсів і насамперед матеріальних коштів. Ця проблема особливо стосується галузей промисловості, які використовують обладнання, що має велику вартість і працює в інтенсивних режимах, в першу чергу, до металургійної промисловості, де використовується багато складних машин та механізмів, що мають велику вартість, наприклад, рудних перевантажувачів.

Металоконструкції кранів, особливо таких, як рудні перевантажувачі, піддаються сильному зносу в процесі експлуатації. Це проявляється у вигляді корозійного та механічного руйнування, появи втомних тріщин, наднормативних прогинів, порушені болтових заклепкових з'єднань і т.п. З часом накопичення цих дефектів призводить до часткової або навіть повної відмови конструкції. Отже, для прецизійного проектування і діагностування стану металоконструкції точна оцінка впливу фактичної завантаженості важких кранів є актуальною темою.

Не точна оцінка завантаженості металоконструкції може призвести до невідповідності спроектованої конструкції крана фактичним експлуатаційним умовам, а також до неправильного прогнозування терміну експлуатації крана, а це, в свою чергу, з часом приведе до значних передчасних руйнувань і аварій. Великі металоконструкції рудних перевантажувачів мають нерівномірність завантаженості елементів вздовж прогону, що визначається однозначно циклограмами завантаженості у відповідності до чітко визначеного технологічного процесу роботи кожного крана.

З метою уникнення таких подій був проведений експеримент по дослідженню фактичної завантаженості металоконструкції мостових перевантажувачів заводу «Запоріжсталь». В експерименті досліджувались гістограми циклів навантажень для чотирьох перевантажувачів, що виконували різні технологічні завдання. Для кожного крана відповідні елементи вздовж прогону мали різні цикли завантаженості, що суттєво впливає на експлуатаційну втому кожного елемента. Як видно, ймовірність циклу є кореляційною залежністю від технологічного завдання для крана. Частота появи навантаження в кожній ділянці прогону крана дозволяє обчислити ймовірність попадання завантаженого візка у відповідну ділянку прогону.

При наявності експериментальних гістограм завантаженості крана або гістограм змодельованих на базі чіткого технологічного процесу роботи крана, можливо за допомогою теореми Бейєса побудувати багатокутники ймовірностей завантаженості кожної ділянки мосту перевантажувача, що важливо для точного прогнозування терміну роботи кожної ділянки, а значить, і всього крана.

УДК 621.865

Фролов Р.О.<sup>1</sup>, Сидоренко М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛАБОРАТОРНИХ СТЕНДІВ СУЧАСНИМИ КЕРУЮЧИМИ СИСТЕМАМИ**

Промисловий робот МП-9С складається із простого маніпулятора та електронної системи програмного управління ЭЦПУ – 6030. Простота та надійність маніпулятора зумовлює його широке використання у навчальному процесі у якості лабораторних стендів. Метою роботи була зміна системи управління на програмуємий мікроконтролер AVR АТmega328, для вивчення різних систем програмного управління.

Маніпулятор приводиться в рух за допомогою семи електропневматичних клапанів, за кожен рух відповідає окремий пневмоциліндр окрім замикання схвату. Замикання схвату маніпулятора відбувається за допомогою пружини. Для перемикання електроклапанів використовується постійний струм напругою 24 В, а живлення мікроконтролера 5 В. Тому для управління електроклапанами було використано блок із 7 електромагнітних реле низької напруги, керуючі сигнали від мікроконтролера по черзі вмикають відповідні електромагнітні реле що замикають ланцюг живлення від зовнішнього джерела на 24 В.

У якості мікроконтролеру було використана готова плата Arduino Nano на базі АТmega328. Для програмування мікроконтролеру використовується середовище розробки Arduino, після чого циклова програма завантажується з комп'ютера на мікроконтролер. Оскільки всі елементи керування під'єднані паралельно, а живлення електропневматичних клапанів береться із зовнішнього джерела, залишається можливим керування маніпулятора як від ЭЦПУ – 6030 так і від мікроконтролеру.

Запропонована нескладна модернізація робота МП-9С дозволяє ознайомити студентів з основними принципами складання циклових програм і програмування промислових роботів. Для модернізації залишається варіативність у виборі сімейства типу контролера (AVR, STM32, Raspberry pi), та виборі мови програмування для написання керуючої програми. Також данні типи контролерів можуть використовуватися для курування власних розроблених студентами механічних роботів або інших видів лабораторного обладнання із застарілими або несправними системами керування.

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДОРОЖНІХ МАШИН

Збільшення обсягів та темпів дорожнього будівництва, а також роботи по підтриманню у належному стані існуючої мережи доріг потребує координації в роботі будівельно-дорожньої техніки. Як показує закордонний досвід, проведення таких заходів неможливе без чіткої організації технічного обслуговування (ТО) та ремонту будівельно-дорожніх машин (БДМ). Наявність парку машин, що перебувають у робочому стані загалом визначає здатність до виконання робочого завдання на будівництві у зазначені терміни. На ТО та ремонти (у тому числі і планові) дорожньої техніки витрачається значна частина виробничого часу та матеріальних крштів. При сучасних технологіях, комплексно використовується спеціалізована дорожня техніка значної потужності та конструктивної складності. Очевидно, що така техніка вимагає і відповідного відношення до себе, що пов'язано з значними витратами на її утримання. Ця обставина характеризується зростанням ролі спеціальних служб ТО та ремонту машин та виділення їх у самостійний напрямок виробничої діяльності, а іноді і в окрему галузь.

Дослідження, проведені в закордонних організаціях показали, що навіть при виконанні всіх планових заходів щодо ТО та ремонту машин, безпосередньо на робочому місці неможливо усунути до 40% аварійних відмов. Сучасна дорожня техніка – це часто складні машини великої потужності оснащені автоматизованими системами керування, які потребують кваліфікованих спеціалістів і ремонтної бази. Крім того, основою системи ТО та ремонту є відповідність їй системи організації постачання оригінальними запчастинами та витратними матеріалами. Звичайно, більш рентабельними будуть закупки запчастин, що здійснюються узгоджено і крупними партіями. Тоді вартість постачання запчастин для ремонту в середньому становитиме 30–45 % від загальних витрат на ремонт. Таку роботу доцільно проводити в умовах спеціалізованих ремонтних баз. Система планово-попереджувального ремонту та обслуговування БДМ, яка існує в країні, не відповідає сучасним вимогам утримання технічного обладнання. Своєчасне та якісне виконання ТО та ремонту машин без порушення виробничого плану багато в чому залежить і від вибору місця проведення робіт. Переваги ремонтних робіт в умовах спеціалізованого цеху над роботами в польових умовах, визначаються крім більш комфортних умов, ще й зосередженням в одному управлінні ремонтної бази, парку транспортних засобів і резервного обладнання. Зрзу-

міло, що крім якості виконаних робіт така організація ТО і ремонту позначається на їх оперативності.

Для сучасних БДМ у вітчизняній практиці немає напрацьованого досвіду як їх експлуатації так і ремонту, що гальмує розвиток єдиної системи технічної готовності дорожньої техніки. Вирішення цих питань стримується недостатньою обізнаністю в причинах виникнення відмов у роботі БДМ, відсутністю зв'язків з виробниками техніки, а також відсутністю статистики напрацювання до відмови різних вузлів та комплексів машин.

З урахуванням викладеного, вдосконалення систем ТО та ремонту машин у дорожньому будівництві, вимагає розробки науково-обґрунтованих рекомендацій щодо зниження витрат та термінів ТО та ремонту, а також напрацювання бази даних щодо оцінки стану БДМ до виникнення відмов. Проводити оцінку необхідно з урахуванням обґрунтованої спеціалізації комплексів машин у дорожньому будівництві за їх функціональними групами, умовами утримання та ремонту.

За результатами необхідно виявляти найбільш значущі фактори, що визначають ефективність системи ТО та ремонту. Значною мірою це фактори які впливають на види ТО і ремонту, період і змінності роботи машин, враховують відірваність ремонтної бази від місця експлуатації техніки та ін.

Одним із результатів таких досліджень може бути визначення оптимальної виробничої потужності засобів обслуговування, зокрема кількості необхідних стаціонарних постів або рухомих майстерень. Оцінка цих об'єктів по трудоемкості робіт, дозволить визначитися з чисельністю і кваліфікацією необхідних спеціалістів задіяних в ТО і ремонті, а також з пропускнуою спроможністю ремонтних баз.

Організаційно, з метою більш оперативного управління при створенні таких ремонтних баз по обслуговування БДМ, слід зосередити парк технологічного і діагностичного обладнання, управління кадрами в єдиному підпорядкуванні. Проте для окремих видів ТО та ремонту (шини, гідро-, електроапаратура акумулятори тощо), можна зробити виключення, залучаючи невеликі спеціалізовані фірми.

Облік проведення ТО та ремонту слід ретельно документувати створюючи комп'ютерну базу даних. Спираючись на яку, слід намічати терміни планових робіт з урахуванням задіяності БДМ на об'єктах, робочих графіків, наявності резервних і транспортних машин.



## ЩОДО ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ БАШТОВИХ КРАНІВ

Модульні баштові крани, як видно з їх назви, збирають з уніфікованих елементів – модулів: ходової частини, опорно-поворотного пристрою, вежі, стріли та ін. залежно від запитів та умов роботи конкретних замовників. Виконання можуть відрізнятися вантажопідйомністю, висотою підйому крана, вильотом та типом стріли (наприклад, балкова та підйомна) та іншими параметрами. До того ж уніфікація здешевлює виробництво та зменшує витрати на ремонт кранів.

Іспанська компанія Comansa перша в 1977 р. розробила модульний баштовий кран без оголовка. Унікальна запатентована конструкція цих кранів викликала інтерес спеціалістів у всьому світі. Вона дозволяє проводити монтаж стріли крана секціями та суттєво економить вільний простір на будмайданчику, а при монтажі на одній ділянці кількох кранів за рахунок модульної безголової конструкції зменшується необхідна мінімальна відстань між ними, значно скорочується час монтажу. Висота вільного стояння кранів Comansa досягала 139 м, вони були здатні піднімати вантаж у 16,7 т на вильоті 46 м і 50 т при вильоті 17,6 м. Пройшли десятки років, перш ніж вантажопідйомність цих кранів змогли перевершити сучасні вдосконалені безголовні крани.

Нова серія Comansa LC2100 – це крани з конструкцією Flat-Top г/п від 12 до 48 т. Ця серія включає 5 моделей і призначена для роботи в гірничодобувній промисловості, промисловому та цивільному будівництві. Модульна конструкція дозволяє використовувати більшу частину елементів вежі та стріли на будь-яких кранах цієї серії, а також у моделях інших серій. За всіх цих переваг у нас модульні баштові крани почали освоювати лише недавно. У 2018 р. на ринку з'явилися модульні безголовні баштові крани однієї з найбільших турецьких кранобудівних компаній TGM KULE VINC але вони йдуть малими серіями. На сьогоднішній день за співвідношенням ціна/якість/надійність TGM, мабуть, найкращий виробник у світі. Цікаво те, що турецькі крани успішно експлуатуються в Сирії, Марокко, Лівані, Лівії, Азербайджані, Узбекистані, Україні, Грузії, Румунії, Кувейті, ОАЕ. Вантажопідйомність кранів лінійки TGM сягає 16 т. Розробили ці крани італійські інженери. Усі механізми кранів надходять від відомих європейських фірм: Leroy Somer, Schneider Electric, Telemecanica, Itowa, Autec, Hetrionic, Ikusi, Besozzi та ін.

Кабіна крана оснащена програмованим кондиціонером, керування виконується двома джойстиком, є екран, на якому кранівник бачить все, що відбувається внизу під краном. Кран обладнаний системою безпеки, що запо-

бігає силі вітру. Башта крана має модульну конструкцію, секції квадратного перерізу взаємозамінні: сумісність стандартних секцій значно знижує витрати та забезпечує максимальну рентабельність. Монтаж крана виконується просто, швидко та дешево, верхню частину крана можна зібрати та демонтувати по секціях. Старша в лінійці модель TGM GRT 7527 має максимальну г/п 16 т, висота підйому вантажу краном – 60 м, довжина стріли – 75 м, запасовка вантажного каната 2/4-кратна.

Піднімати більше і вище, як тенденція у розвитку баштових кранів.

Верхньоповоротні баштові крани без оголовка – останнє слово на ринку вантажопідйомної техніки. Нерухома вежа і повноповоротна стріла баштового крана дозволяють використовувати не тільки анкерну основу, але і кріплення баштового крана до об'єкта, що зводиться, завдяки чому висота будівлі, що будується, може досягати 240 м.

На баштових кранах високої вантажопідйомності з опцією «подовжена стріла» зазвичай пропонують два варіанти розташування противаги на контрстрілі на відстані від башти крана (рухлива противага). У баштових кранів класу 400-600 тм відзначається чітка тенденція переходу від звичайних кранів з балковою стрілою та оголовком до кранів безголової конструкції. Це допомагає скоротити витрати на транспортування та монтаж крана.

На ринку баштових кранів з'явився новий сегмент – крани високої вантажопідйомності із вантажним моментом понад 800 тм. Раніше цю ринкову нішу обслуговували головним чином великовантажні мобільні крани та баштові крани з підйомною (маховою) стрілою.

Незважаючи на те, що європейські компанії-виробники Liebherr, Kjøll, Potain, Wolff і Wilbert при створенні баштових кранів з найбільшою вантажопідйомністю, як і раніше, віддають перевагу кранам з оголовком і врівноваженою (молотоподібною) стрілою, вони випускають моделі безголових кранів все більшої вантажопідйомності. Так, компанія Kjøll у 2019 р. випустила свою найпотужнішу модель безголового крана K1230F г/п 48 т на вильоті 30,5 м та 30 т на вильоті 46,3 м. Незважаючи на висоту перерізу 3,8 м, прямокутні секції контрстріли та трикутні секції кранової стріли можуть транспортуватися або лежачи на боці (у цьому випадку їх висота становить 1,9 м, а ширина 3,8 м), або на низькорамний причеп (тоді висота їх буде 3,8 м, а ширина 1,9 м). У крана зі стрілою максимальної довжини 80 м секції стріли матимуть висоту перерізу всього 2,56 м, завдяки чому вони поміщаються у контейнер High Cube. Залежно від довжини стріли стандартна контрстріла може бути укорочена з 28,5 м до 22,5 м. Найважча частина – опорноповоротний механізм завширшки 3,3 м та висотою 1,8 м важить 23,6 т. Повідомляється, що в компанії вже ведеться попереднє опрацювання конструкції крана більшого типорозміру – мод. K1830F.

В останні десять років у світі набирає популярності технологія будівництва будівель із готових об'ємних конструкцій заводського виробництва (pre-fabricated pre-finished volumetric construction, PPVC – англ.). Технологія PPVC передбачає виготовлення модулів будинків (не плутати з «модульним будівництвом», що практикується в нашій країні) в заводських умовах, з внутрішнім оздобленням, підлогами і т. д. Цей метод дозволяє збільшити продуктивність будівельних робіт, а також до 50% зменшити потребу робочої сили та витрати робочого часу, зменшити кількість пилу та шуму при будівництві, підвищити якість та безпеку робіт. Тому немає сумніву, що невдовзі технологія будівництва PPVC прийде і в нашу країну. Сталеві модулі будівельних конструкцій важать близько 20 т, а переважно використовувані сьогодні готові конструкції із залізобетону – 30 т. До того ж модулі піднімають з використанням спеціальної охоплюючої сталеві захисної рами, щоб запобігти впливу на готову конструкцію навантажень від вантажних стропів, що діють під кутом. Таким чином, слід додати ще й вагу вантажопідйомного обладнання, і будівельні конструкції в сумі важитимуть від 25 до 40 т, при цьому виліт стріли крана повинен становити 35–40 м. Щоб позиціонувати модулі PPVC з точністю  $\pm 2$  мм, необхідно, щоб кранове обладнання працювало виключно плавно та повільно. Всі ці вимоги найкраще задовольняються при використанні потужних кранів безголових конструкції з укороченими стрілою і контрстрілою.

УДК 678.02:621.365

Задоя Н.О.

канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ІНЖЕНЕРНИХ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПРИ ЗАТВЕРДІННІ СКЛОПЛАСТИКІВ**

Розглянемо область застосування методик розрахунку з прикладу циліндра. Є два розв'язання задачі про поширення тепла в циліндрі, що опромінюється електронами: точне рішення, отримане методом поділу змінних та наближене рішення. Необхідно встановити, за яких значеннях фізико-геометричних параметрів дані рішення збігаються із заданою точністю, а за яких – ні. Оскільки число фізико-геометричних параметрів досить велике (більше 10), для спрощення поставленого завдання є сенс звернутися до теорії подоби.

Методи теорії подібності дають можливість на основі аналізу крайового завдання перейти від звичайних фізичних величин до безрозмірних величин – комплексів.

Визначимо ті безрозмірні величини, які відповідають випадку нестационарної теплопровідності за наявності внутрішніх джерел теплоти, тобто умов нагрівання циліндра гальмами електронами. Для цього, перш за все, необхідно призвести до безрозмірного вигляду основне диференціальне рівняння теплопровідності.

Оскільки в основне диференціальне рівняння температура входить лише під знаком похідної, відлік температури можна вести від будь-якої фіксованої для цього процесу температури  $T$ . Оскільки в нас задана початкова температура  $T_0$ , то цю температуру виберемо як  $T^*$ . Для переходу до безрозмірних параметрів необхідно встановити масштабну різницю температур  $v_0 = T^* - T_0$ , для чого необхідно мати крім фіксованої температури  $T^*$  ще іншу фіксовану температуру  $T_0$ . Температура довкілля як такий параметр не підходить, оскільки вона майже завжди приймається рівною  $T_0$ . Оскільки у постановці нашої задачі другої фіксованої температури немає, поставимо її штучно, поклавши  $T^* = T_0 + 100$ .

В рішення крім безрозмірної температури та безрозмірних просторових координат входять також безрозмірні статечні комплекси, складені з різнорідних фізичних величин. Такі комплекси – це критерії подібності. Введемо безрозмірні параметри:  $h = (r_2 - r_1) / r_1$  – безрозмірну товщину циліндра і  $h_p = r - r_1$  – безрозмірну товщину матеріалу, де потік електронів зменшується в  $e$  раз. Граничним умовам третього роду відповідає безрозмірний комплекс, який називається числом Біо. Оскільки  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  різні, необхідно ввести два числа Біо, одне для внутрішньої, а інше – для зовнішньої поверхні циліндра. Число Біо характеризує зв'язок між полем температури у твердому тілі та умовами тепловіддачі на його поверхні.

Для порівняння наближеного та точного рішень необхідно виробити критерії порівняння. Для порівняння двох функцій  $f(x)$  та  $\varphi(x)$  широко застосовуються два способи. Це порівняння за нормою Чебишева та порівняння за нормою Гільберта. Спочатку за формулами обчислюються наближені значення температури на стаціонарному процесі в моменти входу в ділянку опромінення та в момент виходу з нього. Потім визначається номер обороту циліндра, починаючи із якого процес можна вважати стаціонарним. Далі визначаються моменти часу, при яких на  $n$ -му обороті відбувається для заданої точки вхід у ділянку та вихід із ділянки опромінення та для цих моментів обчислюється точне рішення як функція температури товщини циліндра. Знаходиться середнє значення цієї функції, із якою порівнюється наближене рішення. Крім того, шляхом порівняння середнього значення та значень температури на зовнішній та внутрішній поверхнях циліндра визначається розмах коливань.

УДК 621.874

Руднев О.М.<sup>1</sup>, Василенко І.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-312М НУ «Запорізька політехніка»

## **ПЕРЕВАГИ ЗАМІНИ СТАЛЕВИХ КРАНОВИХ КАНАТІВ НА КАНАТИ ІЗ СИНТЕТИЧНОГО ВОЛОКНА**

На Заході ряд компаній ведуть дослідницькі роботи зі створення канатів із синтетичного волокна для підйомних кранів, і вони досягли певних успіхів. Використання канатів із синтетичного волокна замість сталевих канатів має низку переваг. Канат із синтетичних волокон важить у кілька разів менше сталевого, рівного за міцністю аналога. За рахунок використання легшого волоконного каната та гакової підвіски вантажопідйомність крана значно збільшується, особливо на максимальних вильотах стріли. Також не відбувається втрати вантажопідйомності через вагу каната при великій висоті підйому і збільшується висота вільного стояння крана. У ситуаціях, коли при перегинах нижні шари каната піддаються меншим напругам, що розтягують, порівняно з верхніми, волоконний канат здатний витримати вищі напруги, ніж сталевий. Синтетичні волокна, з яких свиті канати, не потребують мастила. Легкий та еластичний волоконний канат набагато простіше замінити, такі роботи можна виконувати без застосування спеціального обладнання, з меншою кількістю людей, швидше та безпечніше. Збирати кран після перевезення на нове місце також значно легше.

Оскільки і сердечник, і оболонка каната виконані з синтетичних волокон, робітники не зможуть поранитися дротиками, що стирчать з каната. Волоконний канат рівно намотується на барабан лебідки, подібно до сталевого каната. У процесі роботи сталеві канати ушкоджують шків та блоки на крані, волоконний канат м'якший, створює набагато менше тертя і не ушкоджує шків та блоки.

Декілька компаній у світі випустили волоконні канати для суднових підйомних кранів, а для будівельних кранів баштових розробила канат з синтетичного волокна нового типу, що володіє високою міцністю на розрив і розтяг, тільки одна компанія – Liebherr. У березні 2019 р. компанія Liebherr представила три нові моделі безголових баштових кранів серії ЕС-В г/п 10 та 12 т, оснащених канатами із синтетичного волокна. Волоконний канат Liebherr має високу зносостійкість і втомну міцність, здатний витримати безліч порізів і розривів волокон, зберігаючи при цьому свої робочі характеристики, а також витримує в 13 разів більше циклів перегину, і за рахунок цього (а також інших факторів) термін служби волоконного каната (при правильному використанні) у 4 рази більше, ніж у аналогічного сталевого, тобто близько 10 років. Це означає, що канат на баштовому крані доведеться

замінювати у 4 рази рідше з відповідною економією коштів та робочого часу. Сердечник волоконного каната Liebherr виконаний з синтетичних неволоконних волокон і має конструкцію, що перешкоджає проникненню води. Завдяки цьому унеможливується виникнення корозії всередині каната, яку зазвичай дуже складно виявити. Оболонка канату Liebherr виконує функцію індикації зношування. Вона складається з волокон, які зношуються із різною швидкістю. За рахунок цього в міру зносу каната його оболонка набуває все більш насиченого червоного кольору, добре видно здалеку і наочно вказує на необхідність заміни.

УДК 620.178.32

Козак Д.С.<sup>1</sup>, Шутов К.Р.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> асист. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-319 НУ «Запорізька політехніка»

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НА ОПІР ВТОМІ В УМОВАХ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ ЗРАЗКІВ З КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРУЖЕНЬ

Дослідження на опір втомі в умовах асиметрії циклу полягає в тому, що на симетричний цикл накладається постійне середнє навантаження  $\sigma_m$ :

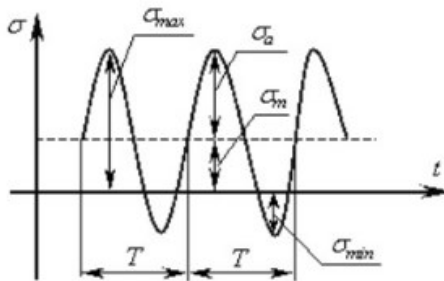


Рисунок 1 – Цикли навантаження:

$\sigma_m$  – середнє навантаження циклу;  $\sigma_a$  – амплітуда циклу;  $\sigma_{max}$  – максимальне навантаження циклу;  $\sigma_{min}$  – мінімальне навантаження циклу.

Випробування матеріалів на опір втомі здійснюється експериментальним шляхом на зразках, в яких виконаний концентратор напружень, на машинах повторнозмінного навантаження [1].

В даному випадку дослідження проводяться на установці побудованій в Національному Університеті «Запорізька Політехніка», яка дає змогу відтворити навантаження з будь-яким потрібним коефіцієнтом асиметрії циклу[2].

Здійснюється випробування з метою отримання даних про довговічність при заданих параметрах циклу навантаження і вплив концентрації напружень на опір втоми.

Експериментальні дослідження на витривалість мають на меті побудувати криву втоми при постійному середньому навантаженні на яке накладається амплітуда.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сочава А. І. Вплив асиметрії циклу на величину ефективного коефіцієнта концентрації напружень / А. І. Сочава, Л. М. Мартовицький, В. І. Глушко, Є. С. Кримов, Р. О. Фролов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – №1. – С. 70–76.

2. Стенд для випробувань металів при осьових навантаженнях в умовах асиметрії цикла : Реферативна інформація про законні науково-дослідні роботи у вузах УРСР / П. А. Михайлов, А. І. Сочава. – К. : Вища школа, 1974. – Вып.13.

УДК 621.833

Мартовицький Л.М.<sup>1</sup>, Цой В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-319 НУ «Запорізька політехніка»

## СПОСІБ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ЗУБЧАСТО-РОЛИКОВИМ ЗАЧЕПЛЕННЯМ

Відомі способи передачі крутного моменту (енергії) евольвентним зубчастим зачепленням або зачепленням з круговим профілем зубців. Існуючі зубчасті зачеплення мають недоліки: підвищені вимоги до точності виготовлення та підвищене ковзання в контактній зоні під час роботи, необхідна висока точність по міжосьовій відстані.

Задача удосконалення способу передачі енергії від зубців ведучої шестерні до зубців веденого колеса вирішується тим, що процес відбувається за допомогою роликів, які розміщуються між зубцями шестерні або колеса та передають послідовно енергію від увігнутого профілю зубців шестерні, випуклого ролика та увігнутого профілю зубців колеса. Використання роликів, які рівномірно розміщені у впадинах між зубцями колеса або шестерні, та які

надійно кріпляться за допомогою втулково-роликового ланцюга, забезпечує стабільну передачу енергії від ведучої шестерні до веденого колеса.

Використання роликів, покритих гумою, дозволяє повністю позбавити передачу від вібрацій, шуму та динамічних навантажень, а також додатково замінити тертя ковзання в контактній зоні на тертя кочення, що значно ефективніше. Крім того, контактні напруження знижуються за рахунок збільшення контактної площі. При цьому зубці шестерні та колеса не контактують між собою та мають однаковий увігнутий профіль та радіус кривизни.

УДК 621.874

Фролов Р.О.<sup>1</sup>, Вечеря Е.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-312м НУ «Запорізька політехніка»

## **ЗАСТОСУВАННЯ ПРУЖНИХ ВСТАВОК У КРАНОВИХ КОЛЕСАХ МОСТОВИХ КРАНІВ**

Ударні навантаження, що виникають при проходженні місцевих нерівностей колії (стиків рейки, вибоїн та інших), мають істотне значення для сучасних кранів, особливо для тих які переміщуються зі значною швидкістю та навантаженням. Найбільш істотний вплив вони здійснюють на мостові крани, які на відміну від вагонів мають жорстку безресорну ходову частину. Найчастіше пошкодження ходової частини та металоконструкцій мостових кранів виникають у кінцевих балках, особливо в місцях кріплення вузлів кранових коліс.

Причина появи тріщин втоми кінцевих балок є високий рівень ударних динамічних навантажень, які діють на кранові колеса, а через них на кінцеві балки при проходженні краном нерівностей колії. Внаслідок цього так само спостерігається передчасний вихід з ладу підшипників і пошкодження механізмів пересування мостових кранів.

Проблеми гасіння енергії ударів є актуальними як для рейкового транспорту так і для кранів. Наприклад, ослаблення і розсіювання енергії при зіткненні залізничних вагонів виконують поглинаючі апарати автотзчеплення. Вони призначені для зменшення дії поздовжніх сил на вагон за рахунок перетворення кінетичної енергії ударів вагонів в роботу сил тертя і потенційну енергію деформації пружних елементів апарату. На залізницях намітилася тенденція до збільшення мас і швидкостей руху поїздів, а також інтенсифікації маневрових операцій. Правилами технічної експлуатації передбачені швидкості зіткнення вагонів, що не більше 5 км/год, однак фактичні швидкості зіткнення як правило значно вище. Як наслідок цього збільшується надходження вантажних вагонів і цистерн в ремонт. Велику шкоду отримують



при ударах вантажі, що транспортуються. Характер деформацій та перевантаження металоконструкцій залежить від форми нерівності колії, жорсткості, пластичності конструкції, маси вантажу, рейок та підкранової балки з закріпленням, маси колеса і зв'язаних з ним частин, характеру нерівності, швидкості проходження колесом нерівності колії і ряду інших величин.

Використання пружних вставок з полімерів з низьким модулем Юнга має за мету зменшення перевантаження ходових коліс на нерівностях шляху та при проходженні ними стику колії. Є приклади використання коліс з пружними вставками в вагонах. Чималий досвід зменшення ударів при застосуванні ходових коліс з гумовими прокладками накопичений в пасажирському рейковому транспорті (потяг, трамвай, метро). Метою таких розробок були не тільки надійність, а безшумність та комфортність перевезень. Застосування цього накопиченого досвіду у кранобудуванні на нашу думку має призвести до значного збільшення часу роботи металоконструкцій та підвищити загальну надійність машини.

Використання прокладок з еластомерів на мостових кранах, полімерів з низьким модулем Юнга має зменшити перевантаження кранових коліс на нерівностях шляху при проходженні ними стику колії. Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що розроблені конструкції коліс мостового крана, які дозволяють зменшити динамічні удари при проходженні стиків рейок, тобто зменшити коефіцієнт поштовхів, що в свою чергу зменшить ремонтні простої кранів та збільшить термін їх експлуатації.

УДК 678.02:621.365

Задоя Н.О.<sup>1</sup>, Костюк А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-322м НУ «Запорізька політехніка»

## **РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ У ЦИЛІНДРІ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ РІЗНИЦЬ**

Для поліпшення властивостей композиційних матеріалів використовують комбіновані методи обробки, до яких належить радіаційно-термічне модифікування. Відзначимо, що відомий метод комбінованого затвердіння, що включає попереднє радіаційне затвердіння прискореними електронами при низьких дозах опромінення (20, 40 Мрад) та подальшу термічну операцію, результатом застосування якого є зниження дози опромінення та скорочення часу затвердіння. Однак затвердіння за даним методом не забезпечує достатніх значень міжшарової міцності для склопластиків, оскільки на початковій стадії процесу погіршуються умови видалення летких речовин. Зміна порядку операцій у технології комбінованого затвердіння сприяє на стадії

попереднього термозатвердіння поліпшення адгезійного зв'язку між наповнювачем, а наступне радіаційне дозатвердження сполучного забезпечує монологічність матеріалу. Тому викликає інтерес вивчення температурного поля, що виникає у процесі затвердіння.

Існують аналітичні та чисельні методи вирішення поставлених завдань теплопровідності.

Аналітичне рішення має певні вади. Основний недолік цього рішення в тому, що воно призначене для досить вузького класу задач і будь-яке ускладнення умов завдання, як правило, призводить до кардинального перегляду рішення. Чисельні методи, порівняно з аналітичними, мають незрівнянно більшу гнучкість. Але їм притаманні свої недоліки. Один із них пов'язаний із тим, що, як правило, залишається відкритим питання про точність отриманого рішення. Тому, є доцільною наступна методика розв'язання задачі. Будуються як аналітичне так і чисельне вирішення завдання. Обидва рішення доповнюють одне одного, підвищуючи достовірність того й іншого. Для відповіді на прості питання є аналітичне рішення, а чисельне – для перевірки.

Ідея методу кінцевих різниць (методу сіток) полягає у наступному. Область безперервної зміни аргументів замінюють розрахунковою сіткою – дискретним безліччю точок (вузлів). Замість функції безперервних аргументів запроваджують функції дискретних аргументів – сіткові функції, визначені в вузлах сітки. Приватні похідні, що входять у диференціальне рівняння та граничні умови, замінюють (апроксимують) різницевиими співвідношеннями. Внаслідок такої заміни крайове завдання з приватними похідними зводиться до системи різницевих (алгебраїчних) рівнянь.

Розглянемо завдання у наступній постановці. Нескінченний циліндр із склопластику обертається з циліндричною оправкою з внутрішнім радіусом  $r_0$ . Для вирішення задачі область перерізу циліндра, що є кільцем у часі, покриваємо регулярною сіткою. Пропонується використовувати ітераційний метод Гауса-Зейделя. Цей метод легко програмується. Він добре підходить для вирішення задач нестационарної теплопровідності з кроком за часом, тому що за початкове наближення рішення на черговому кроці за часом можна приймати рішення, отримане на попередньому кроці.

Для цього крок за часом ділиться на два або кілька підкроків; на кожному з підкроків вирішується обмежена задача з тридіагональною матрицею. При цьому відбувається постійна перебудова рішення вектору. Метод Гауса-Зейделя не є критичним до кількості ненульових діагоналей у матриці системи рівнянь, тому не вимагає використання методів факторизації. Відомо, що найбільшу стійкість має неявна схема методу кінцевих різниць, при якій при переході від тимчасового шару  $k$  до тимчасового шару  $k+1$ , дискретизація для змінних просторових здійснюється для шару  $k+1$ .

Область циліндра, що піддається тепловій дії електронів, займає ділянку, яка визначається кутом  $\psi$ . Після дискретизації до цієї області потрапляє певна кількість вузлів, у яких слід задати  $q$ . За такого підходу загальна теплова енергія, отримана дискретизованим тілом, виявляється меншою, ніж отримана безперервним тілом. Вузли, що примикають до ділянки, що опромінюється, отримують залишок енергії.

Чисельний розрахунок проводили для циліндричного склопластику товщиною від 0,5 мм до 10 мм з кроком 0,1 мм при зміні часу через інтервал 10 с наступних вихідних даних:  $b=0,08$  м;  $\omega=0,7$  с<sup>-1</sup>;  $\lambda=0,271$  Вт/мК;  $c=1,08$  кДж/кгК;  $\rho=1950$  кг/м<sup>2</sup>;  $\epsilon=0,65$ ;  $\alpha_{k1}=40$  Вт/мК;  $\alpha_{k2}=22$  Вт/м К;  $E=1,1$  МэВ;  $I=7$  мА.;  $\epsilon_{ps}=1 \cdot 10^{-5}$ . Параметри дискретизації прийнято:  $N=15$ ;  $M=40$ ;  $L=100$ .

Дослідження показали, що зміна температури по товщині відбувається стрибкоподібно.

УДК 691.62

Волков Г.П.<sup>1</sup>, Вініченко В.С.<sup>1</sup>, Подковиров Д.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-310 НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗШИРЕННЯ СИРОВИННОЇ БАЗИ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Роль сировинної бази у будівельній промисловості є визначальною. Наявність доступної сировини в необхідних обсягах визначає види та технології виробництва будівельних матеріалів. Часто питання про сировинні запаси з часом вимагають серйозної переоцінки. Це стосується не лише якихось рідкісних, а й донедавна цілком звичайних для нас матеріалів. Прикладом може бути річковий кварцевий пісок. Кварцевий пісок займає дуже важливе місце в будівельній індустрії, оскільки є одним із найголовніших складових для всіх будівельних сумішей, розчинів та субстанцій. Крім того, безпосередньо може становити насипну основу опорних споруд різноманітного призначення. Кварцовий пісок займає основне місце у складі сировини і у виробництві дорожнього бетону.

Однак за останні роки в світі спостерігається значний дефіцит кварцевого піску. Наприклад, пісок серед природних ресурсів став найбільшим дефіцитом (після прісної води) в європейських країнах. Видобувати його колишніми темпами зараз стало неможливо. Піщані кар'єри Європи майже вичерпали свій ресурс, а розробка нових пов'язана з великими труднощами. Причинами стали природоохоронні заходи рекреаційних зон, порушення підземних водоносних горизонтів, знищення сільгоспугідь, збереження комуни-

кацій та ін.). Видобуток піску знищує природний ландшафт зон відпочинку, особливо островів, скорочує пляжі і спотворює берегову лінію, забруднює русла річок. При розробці піщаних кар'єрів будівельні організації вимушені сплачувати значні податки на видобуток піску та проводити рекреаційні заходи навколишнього середовища. У низці країн світу видобуток природного піску взагалі заборонено. При цьому обійтись без піску у технологічних процесах неможливо.

Пісок є неодмінною складовою майже всіх будівельних матеріалів. Зростання темпів будівництва доріг, виробництва залізобетонних конструкцій зумовило зростання потреби у будівельному піску. При явному дефіциті природних запасів піску існують величезна кількість утворених при переробці гірських порід відвалів. Відсів дроблення кам'яних кар'єрів, часто належать до відходів виробництва і не використовується в повній мірі. Ці запаси можуть стати повноцінною товарною продукцією, яка знайде широке використання в будівельній індустрії. В подальшому, слід розглянути і технології цілеспрямованого одержання дрібних фракцій гірських порід, як повноцінної заміни природного піску.

Розміщення в кам'яних кар'єрах класифікуючих комплексів дозволяє одержувати крім дрібного щебеню також і будівельні піски. Основним обладнанням для отримання штучних фракціонованих пісків є багатопродуктовий повітряний каскадно-гравітаційний класифікатор, який дозволяє виділяти з відсівів дробарок фракцію піска. Аналіз показує, що відмінність між штучним і натуральним піском полягає лише в тому, що штучний пісок отримують шляхом дроблення різних гірських порід, а не в результаті природних фізико-хімічних процесів. При цьому його склад зовсім не відрізняється від натурального піску.

В даний час, отримані таким чином, штучні піски стали успішно застосовуватись у деяких виробництвах будівельних матеріалів. Є думка, що якість матеріалів на основі штучного піску може бути вищою, ніж якість аналогічних матеріалів на основі природного піску. Стверджують, що міцність при згинанні дрібнозернистого бетону на основі дробленого на відцентрову ударній дробарці піску на 36% перевищує аналогічний показник для бетону на основі річкового піску. При цьому бетон на основі піску, подрібненого в конусно-інерційній дробарці, має перевищення по міцності на 29%. Аналогічне співвідношення спостерігається і для показників міцності дрібнозернистих бетонів при стисканні.

Фракціонування порошку-заповнювача також є одним із перспективних напрямів підвищення якості будівельних матеріалів. Так для отримання одиниці міцності (1 МПа) бетону на подрібненому фракціонованому піску потрібно цементу на 19% менше у порівнянні з бетоном на річковому піску та на

17% менше у порівнянні з бетоном на подрібненому нефракціонованому штучному піску.

Технологія виробництва штучного кварцевого піску складається з наступних загальних етапів:

- видобуток гірської породи;
- очищення та переробка гірської породи;
- дроблення та виділення піску;
- сушіння піску;
- фракціонування піску, на дрібний та крупний пісок;
- дозування і фасування матеріалу.

Дана технологія, звичайно вимагає певних витрат на додаткове обладнання, проте при певних умовах є виправданою та потребує більш широкого застосування.

## СЕКЦІЯ «ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ»

УДК 621

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Приходько С.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Мз-812м НУ «Запорізька політехніка»

### ВИБІР ТИПУ ПРИВОДУ ДЛЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПРЕСІВ

Тип приводу має значний вплив на схему і дію гідропресових установок. Гідропресове устаткування можна розділити на дві основні групи: з помпувальним приводом; з мультиплікаторним приводом.

До мультиплікаторного приводу належать приводи, в яких живлення пресу під час робочого ходу здійснюється мультиплікатором. До помпувально-акумуляторного приводу пресів належать приводи, що здійснюють живлення пресу робочою рідиною під час робочого ходу одночасно від помпувача й акумулятора. При помпувальному безакумуляторному приводі живлення пресу здійснюється безпосередньо від помпувачів.

Останніми роками широкого поширення як привід для гідравлічних пресів, що виконують найрізноманітніші технологічні процеси, набув безакумуляторний помпувальний привід. Цей привід є найбільш економічним і гнучким в управлінні.

У гідравлічних пресових установках із помпувально-акумуляторним приводом тиск робочої рідини, що витрачається з акумулятора, є практично постійним (змінюється в межах 7-15%). Тиск робочої рідини в гідросистемі пресів із безакумуляторним помпувальним приводом змінний і залежить від корисного опору, який долає плунжер пресу.

Коефіцієнт корисної дії пресів із помпувально-акумуляторним приводом, що визначається відношенням тиску робочої рідини в циліндрі пресу до тиску в акумуляторі, буде для цих пресів низьким, якщо не застосовувати спеціальних методів стабілізації або підвищення ККД, за яких підтримується постійно високий тиск у робочому циліндрі. За помпувально - безакумуляторного приводу робота приводу відповідає корисній роботі, яку виробляє прес. Це забезпечує гідравлічним пресовим устаткуванням з помпувальним безакумуляторним приводом високий ККД, який досягає при робочому ході 07–09.

Схема управління пресом за умови помпувального безакумуляторного приводу найпростіша. У принципі вона складається з клапана накопичення, клапана робочого ходу, клапана підйомних циліндрів, розміщеного в розподільнику, і трубопроводів, що з'єднують розподільник із баком, насосом і циліндрами пресу. Клапани і вся система управління перебуває під тиском лише в період робочого і зворотного ходів пресу.

У пресових устаткуваннях з помпувальним безакумуляторним приводом можна легко здійснювати електричний контроль і управління апарату-рою, а також гнучке управління пресом. Тиск у гідросистемі легко і досить точно можна контролювати. Під час помпувального безакумуляторного при-воду немає акумуляторів рідини і складної системи контролю та управління акумуляторною станцією, таким чином, цей тип приводу простий в обслуго-вуванні. Габарити пресових устаткувань з помпувальним безакумуляторним приводом менші і вартість їх нижча, ніж пресів з акумуляторним приводом.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Падафет О.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ БРАКУ ПРИ ПРОКАТУВАННІ**

Вітчизняний і зарубіжний досвід свідчить, що точність, якість поверхні та властивості холоднокатаного прокату, а також техніко-економічні показ-ники роботи станів холодного прокатування залежать насамперед від відпо-відних параметрів гарячекатаного підкату. Наприклад, встановлено, що спо-творення (дефекти форми) поперечного профілю гарячекатаного підкату має вирішальний вплив на площинність холоднокатаних смуг і ефективність процесу холодної прокатки. Однак даних про точність і дефекти форми попе-речного профілю гарячекатаного підкату, причини виникнення та їхній вплив на площинність холоднокатаних смуг вкрай мало. Крім того, ці дані мають здебільшого якісний характер і не дають змоги сформулювати вимоги до точності поперечного профілю гарячекатаного підкату, які б забезпечували одержання холоднокатаних смуг з гарною площинністю.

У чинних стандартах і технічних умовах на смуговий прокат, зокрема й на гарячекатаний підкат, за характеристику точності поперечного профілю прийнято поперечну різнотовщинність, яка визначається як різниця між най-більшим і найменшим значеннями товщини, вимірними в одному попереч-ному перерізі. При цьому зазвичай припускають, що поперечний профіль гарячекатаного підкату є двоопуклим і симетричним щодо поздовжньої вісі. У зв'язку з цим, про поперечну різнотовщинність підкату судять за результа-тами вимірювань товщини вздовж ширини в трьох, іноді в п'яти рівновідда-лених точках, за вираховуванням виточених прикромочних ділянок шириною по 40-50 мм з кожного боку.

У реальних умовах прокатування поперечний профіль гарячекатаного підкату формується як підсумок спільного впливу пружних деформацій вал-кового вузла, вихідної опуклості (увігнутості) утворень і зносу бочок робо-

чих і опорних валків, розподілу температури по довжині бочок робочих і опорних валків, форми поперечного перерізу слябу і температурного поля останнього, налаштування широкосмугового стану, зміщення поздовжньої вісі розкату (смуги) від вісі стану, розподілу напружень натягу і температури по ширині розкату (смуги) в лінії стану на профіль активних утворюючих робочих валків. Тому зміна товщини смуги в поперечному напрямку, тобто форма поперечного профілю гарячекатаного підкату має стохастичний характер і суттєво відрізняється від форми поперечного профілю.

Крім того, значною нестабільністю по ширині гарячекатаного підкату вирізняються хімічний склад, структура, механічні властивості та шорсткість поверхні. Зміна перерахованих параметрів має багато в чому також імовірнісний характер, хоча це питання потребує додаткового дослідження.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Андрєєв А.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **НЕОБХІДНІСТЬ КУВАННЯ ЗЛИТКІВ З МАЛОПЛАСТИЧНИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

На сьогоднішній день деталі відповідальних машин і механізмів виготовляють із кованого металу. Це викликано тим, що метал таких деталей повинен мати певну структуру і підвищені механічні властивості.

Метал злитка має серйозні дефекти: усадочна рихлість, укрупнена дендритна структура, ліквіаційні вади, нерівномірно розподілені макрораковини і мікропори. Обробка литого металу тиском покращує його структуру і значно підвищує механічні властивості. Однак, не всі сталі та сплави можна піддавати пластичній деформації за допомогою прокатування. У процесі прокатування металу виникають внутрішні поздовжні розтягувальні напруження, що викликає розвиток внутрішніх розривів заготовок, особливо в осьовій зоні. Прокатування високовуглецевих легованих сталей і особливо швидкорізальних, а також високолегованих малопластичних сталей і сплавів призводить до утворення мікропор, рихлостей, одиничних великих розривів та інших дефектів.

Під час кування злитків відбувається заварювання пустот, рихлостей і рванин, а також дроблення і подрібнення великих зерен, зміна їхньої форми та орієнтації в певному напрямку. Кування металу здійснюють на кувальних пресах, молотах і кувальних машинах.

На кувальних пресах кують (протягують) великі злитки й отримують заготовки перетином до 100 мм. Протягування на пресах заготовок меншого



перерізу недоцільне через інтенсивне охолодження заготовки, що викликається порівняно тривалим технологічним циклом.

Кування сталей і сплавів зниженої пластичності з ослабленими міжкристалітними зв'язками за температур гарячої пластичної деформації рекомендується здійснювати на молотах. Кування такого металу на пресах за порівняно тривалої витримки під навантаженням спричиняє поверхневі розриви на бічній поверхні від дії поверхневих розтягувальних напружень. Уникнути цього явища можна шляхом збільшення швидкості деформації і різкого скорочення часу дії зусилля деформування. Переведення кування з преса на молот дає в таких випадках позитивні результати - не з'являються на поверхні заготовки міжкристалітні розриви.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Кабаченко В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕРВАЛУ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ГАРЯЧОГО ПРОКАТУВАННЯ**

Мета нагріву злитку або заготовки перед прокатуванням - підготовка металу і його структури до прокатування, тобто під час нагріву, по-перше, метал переходить у пластичний стан, необхідний для деформації в процесі прокатування, а по-друге, змінюється його структура, унаслідок чого покращується деформованість під час прокатування та забезпечується отримання необхідних фізико-механічних властивостей готової продукції.

Під час нагрівання злитку або заготовки найбільшого значення набувають такі умови:

- спосіб посадки металу в колодязь;
- швидкість нагріву;
- тривалість нагрівання;
- температура видачі з колодязя.

Крім того, під час нагрівання металу знижується його опір деформації, що зумовлює зменшення витрат енергії на обробку металу тиском і застосування менш потужних прокатних станів. Таким чином, від правильно обраного режиму нагріву металу великою мірою залежить не тільки нормальна робота обладнання прокатного стану, а й якість отриманого прокату.

Інтервал температур для гарячого прокатування встановлюють на основі діаграми стану сплавів, діаграми пластичності сплаву і температурної кривої опору деформації. Температуру нагріву металу перед прокатуванням приймають на 200–250°C нижче за температуру початку плавлення. Така

висока температура нагріву необхідна як для поліпшення оброблюваності сталі, так і для отримання оптимальної температури кінця прокатування, яку здебільшого приймають на 20–30°C вищою за верхню критичну температуру. При цьому необхідно враховувати підвищення критичних температур під час обробки тиском тим більшою мірою, чим вища швидкість деформації. Під час призначення температурного режиму визначальною є температура кінця прокатування, оскільки від неї залежать структура і фізико-механічні властивості сталі. Однак необхідно зазначити, що температурний інтервал для сталей і сплавів одних і тих самих марок може мати деякі відхилення залежно від сортаменту прокату і типу нагрівальних засобів металургійного підприємства. Температура є одним з основних чинників, що впливають на опір деформації, тому особливо важливо встановити температурний інтервал (температуру початку і кінця прокатування) досліджуваних марок сталей і сплавів, відповідний реальному процесу їх прокатування.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Горбач Д.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ГЕРМЕТИЧНИХ З'ЄДНАНЬ**

Деталі герметичних з'єднань (штуцери, кутники, трійники, хрестовини) належать до поширених машинобудівних деталей, що мають широке застосування. Фітинги виготовляють із різних матеріалів, але переважно зі сталі, латуні, алюмінієвих і алюмінієво-магнієвих сплавів.

Існуюча технологія виготовлення цих деталей досить різноманітна. Так штуцери виготовляють здебільшого механообробкою з шестигранних прутків на токарних автоматах або обробних центрах. Недоліком цієї технології є низький коефіцієнт використання матеріалу (50-60%).

Кутники, трійники і хрестовини малих діаметрів (діаметр умовного проходу менше ніж 12-14 мм) виготовляють найчастіше литтям з подальшою механічною обробкою. При цьому отвори в деталях не виконуються. Недоліком такої технології є пористість деталі, внаслідок чого порушується їхня герметичність, особливо за тисків 200–400 кг/см<sup>2</sup>. Крім того, фітинги, виготовлені таким способом, мають великий брак за раковинами (близько 20%) і низький коефіцієнт використання матеріалу (50-60%).

Кутники, трійники і хрестовини великих діаметрів виготовляють переважно механічною обробкою з подальшою пайкою або зварюванням. До недоліків цього способу виготовлення можна віднести: низьку якість деталей;

низький коефіцієнт використання матеріалу; високу трудомісткість виготовлення. У зв'язку з тим, що останнім часом у гідравлічних системах дедалі ширше використовують високі тиски, зокрема 400 кг/см<sup>2</sup>, під час виготовлення фітінгів гостро постало питання про їхню якість, і насамперед, про герметичність.

Зазначені вище способи не забезпечують отримання належної герметичності. Тому їх намагаються замінити іншими процесами, зокрема процесами обробки тиском. Однак, практика показує, що традиційний спосіб штампування у відкритих штампах хоч і суттєво покращує якість деталі, але все ж таки не забезпечує необхідної герметичності за підвищених тисків. Особливо яскраво це проявляється під час використання деталей герметичних з'єднань для потреб авіаційної та суднобудівної галузей промисловості. Недостатня герметичність пояснюється тим, що під час облойного штампування внутрішньо забруднені неметалевими включеннями шари заготовки виходять на поверхню деталі, створюючи пори на її тілі.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Ковтун А.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **РОЗРАХУНОК ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЖИМУ ПРОКАТУВАННЯ**

Під час прокатування злитків на слябінгу здійснюють і висотну, і поперечну деформації на гладких валках. У цьому випадку визначення режимів обтиснень зводиться до розрахунків висотної деформації в горизонтальних валках і поперечної деформації у вертикальних валках. Абсолютні обтиснення в горизонтальних валках можна визначати за одним із застосовуваних методів. Найбільшого застосування набули розрахунок обтиснень за граничними умовами захоплення (у перших проходах), за міцністю прокатних валків (перевірка за максимальним тиском металу на валки) і потужністю електродвигуна.

Обтиснення у вертикальних валках незначні і призначені головним чином для обробки бічних сторін розкату. Ці обтиснення обмежуються потужністю приводу валків, вони не повинні бути меншими за розширення розкату в горизонтальних валках.

У деяких випадках на слябінгу перші два проходи під час прокатування злитків прямокутного перерізу здійснюють у горизонтальних валках у положенні на ребро. Мета таких обтисків – усунення конусності злитка, видалення окалини з його великих граней і отримання необхідної ширини розкату.

Схему обтиснень на слябінгу складають за розрахунковими величинами абсолютних обтиснень за проходами. Ширина розкату визначається поло-

женням вертикальних валків. Вертикальні валки на стані розташовані перед горизонтальними.

Під час визначення машинного часу і продуктивності блюмінгу або слябінгу необхідно знати довжину розкату за проходами. Розрахунок цієї довжини слід вести проти ходу прокатування, виходячи з маси злитка. Якщо під час розрахунків довжина розкату буде виходити меншою від початкової довжини злитка, за довжину розкату слід приймати початкову довжину злитка. Під час визначення ж довжини розкату за ходом прокатування може вийти розбіжність із дійсною довжиною через ущільнення литого металу і відсутність витяжки в перших проходах.

Отже, при розрахунку режиму обтиснення необхідно враховувати такі чинники:

- умови захоплення металу;
- міцність валків;
- потужність головного приводу;
- стійкість смуги після кантування;
- пластичність металу.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Пассікун Є.В.<sup>2</sup>, Кас'янова Д.В.<sup>2</sup>, Лайко Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ДО АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ**

До основної продукції АТ «Мотор-Січ» слід віднести:

- авіаційні двигуни (турбогвинтові, турбореактивні двоконтурні, турбогвинтовентиляторні, турбовальні);
- промислові установки (вітроелектростанція «Мотор Січ» ВЕС-3-175/5-48, газотурбінні приводи, газотурбінні електростанції);
- промислова продукція і товари народного споживання (двигуни внутрішнього згоряння і комплектуючі до них, агротехніка, човни, катери і силові установки, пили бензиномоторні та електромоторні, сепаратори, техніка для комунального господарства, техніка для автолюбителів, товари для дому, промислове обладнання, продукція медичного призначення, тощо).

Конкуренція, що дедалі зростає серед виробників авіаційних двигунів, вимагає від виробника виготовлення продукції в мінімальні терміни з максимальною якістю і мінімальною собівартістю виробу. Собівартість виробу значною мірою залежить від використання прогресивних технологічних процесів, застосування прогресивного технологічного обладнання та зменшення

тривалості виробничого циклу виготовлення деталі. Значною мірою скорочується тривалість циклу конструкторської та технологічної підготовки виробництва при використанні новітніх засобів автоматизованої підготовки виробництва. Якість створюваного виробу забезпечується на етапах підготовки та виробництва продукції і реалізується в процесі експлуатації. Важливою складовою забезпечення якісної продукції є контроль виробу, як під час виконання технологічного процесу, так і остаточний контроль деталі. Для забезпечення більшого відсотка контролюючих деталей і зменшення часу на контроль, зі збільшенням відсотка достовірності вимірювань необхідно застосувати контрольні пристосування з автоматичним і напівавтоматичним циклом роботи, за умови використання різних датчиків, а також систем, що обробляють і аналізують отриману інформацію.

В умовах ринкової економіки визначальне значення в становищі підприємства на ринку матиме застосування найпродуктивніших з найменшою собівартістю засобів праці, що забезпечують необхідну якість; виконання автоматизованих конструкторських і технологічних робіт зі складанням мережевої моделі роботи підприємства; застосування найефективніших засобів і методів контролю якості продукції.

Великого поширення набула в машинобудуванні обробка металів тиском, оскільки такий вид обробки має низку переваг:

- можливість отримання не тільки заданої форми, а й заданих механічних властивостей виробу;
- майже безвідходне виробництво;
- висока продуктивність.

Листове штампування є одним із видів обробки металів тиском, що виробляється з листового матеріалу за допомогою штампів. Воно являє собою процес виготовлення найрізноманітніших за формою, розмірами і призначенням деталей із листової заготовки в холодному стані і є одним із найпрогресивніших методів їхнього виготовлення, який легко піддається максимальній механізації та автоматизації процесів виробництва.

Процеси листового штампування завдяки своїй високій продуктивності та економічній ефективності широко застосовують у різних галузях промисловості: машинобудуванні, приладобудуванні, електротехніці, радіотехніці, електроніці, під час виробництва товарів народного споживання тощо.

У технічному відношенні листове штампування має низку переваг перед іншими видами обробки металів. Воно дає змогу отримувати взаємозамінні деталі з доволі високою точністю розмірів, що допускає складання машин і апаратів на конвеєрі. Деталі, виготовлені методами листового штампування, здебільшого не потребують подальшої механічної обробки. Складні операції листового штампування здійснюються простими ходами преса, в результаті виходять деталі вельми складних форм, виготовлення яких іншими методами

обробки або неможливо, або важко. При невеликій витраті матеріалу є можливим виготовляти міцні і жорсткі конструкції деталей з порівняно невеликою вагою.

Певні переваги перед іншими видами обробки металів має листове штампування і в економічному відношенні. Операції виконуються на високопродуктивному обладнанні, легко піддаються механізації та автоматизації виробничих процесів. При масовому і серійному випуску продукції досягається низька вартість виготовлення деталей. Листове штампування відрізняється також економічним використанням металу і порівняно низькими технологічними відходами.

Недоліком листового штампування є висока вартість технологічного оснащення – штампів. Вони завжди трудомісткі під час виготовлення і часто бувають досить металомісткими. Це зумовило застосування листового штампування лише в масовому і серійному виробництві. Однак останнім часом розроблено конструкції штампів, що дають змогу з успіхом застосовувати листове штампування не тільки в масовому і серійному виробництві, а й також у дрібносерійному, для чого використовують спрощені й універсальні штампи.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Широкобокова Н.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Мз-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **ЕНЕРГО-СИЛОВІ ТА ТЕМПЕРАТУРНІ ПАРАМЕТРИ НАПІВГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ В ПОРІВНЯННІ З ІСНУЮЧИМИ МЕТОДАМИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

Основними напрямками розвитку народного господарства передбачається підвищення ефективності використання металу з допомогою вдосконалення методів обробки. Одним із найбільш прогресивних способів є обробка тиском, яка широко застосовується при виготовленні виробів у металургії, машинобудуванні, приладобудуванні та інших галузях промисловості. Обробка тиском як процес формоутворення значно продуктивніша і дешевша, ніж інші процеси обробки металів. Крім того, в результаті пластичної деформації оброблюваної заготівлі не тільки надаються певна форма та розміри, а й забезпечується отримання необхідної величини показників механічних, фізико-хімічних та інших властивостей металу.

При обробці тиском необхідну форму виріб отримує із заготівлі, що знаходиться в холодному стані або попередньо нагрітої.

Залежно від температурно-швидкісних умов мають місце різні види деформації.

Гаряча деформація проводиться у сфері температур рекристалізації. Процес формозміни супроводжується як зміцненням, і рекристалізацією, яка встигає відбуватися під час деформації. При достатній мірі деформації та правильно вибраному температурно-швидкісному режимі деформований метал має повністю рекристалізовану рівноосну дрібнозернисту структуру без будь-яких слідів зміцнення. Підвищуються його властивості міцності, а також показники пластичності і в'язкості.

У разі неповної гарячої деформації мають місце одночасно часткова рекристалізація та зміцнення. Так як рекристалізація відбувається не повністю, то в структурі деформованого металу присутні як рекристалізовані рівноосні, так і нерекристалізовані витягнуті зерна. Неповна гаряча деформація може мати місце або при температурах деформації, що трохи перевищують температуру початку рекристалізації, або при великих швидкостях деформування і малій швидкості рекристалізації.

Неповна холодна деформація характеризується відсутністю процесу рекристалізації. Вона проводиться при температурах, які забезпечують перебіг явищ повернення. Завдяки цьому відбувається значне зменшення додаткових напруг, що веде до відповідного зниження залишкової напруги. Повернення сприяє також зменшенню ступеня зміцнення та покращенню пластичних властивостей деформованого металу. Після неповної холодної деформації метал має смужкову структуру без слідів рекристалізації, а за значної міри деформації – текстуру деформації.

Холодна деформація проводиться нижче за температуру початку повернення і тому холоднодеформований метал має всі ознаки зміцнення. Значно підвищуються показники властивостей міцності, і знижується пластичність металу. Одним із найважливіших наслідків холодної деформації є анізотропія властивостей.

Виникнення шлюбу при холодній деформації та гарячій деформації можна уникнути, якщо призводить обробку методом напівгарячого штампування. Крім цього при заміні процесу холодної штампової на напівгарячу знижуються питомі зусилля, підвищується довговічність інструменту.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.<sup>1</sup>, Ключев Д.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВПЛИВ СТУПЕНЯ ДЕФОРМАЦІЇ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ПРИ ВОЛОЧІННІ**

Волочіння дроту – це процес обробки металу тиском, що характеризується поступовим одноразовим або багаторазовим протягуванням заготовки через спеціальний волочильний інструмент, призначений для поетапного зменшення перерізу вихідної заготовки.

Якість готового дроту визначається властивостями обраного для волочіння металу, а також змінами його властивостей у процесі переробки. Процес волочіння супроводжується не тільки зміною геометричної форми і розмірів заготовки, а й істотними змінами фізико-механічних властивостей і структури металу, що обробляється.

Зміцнення металу, що виникає внаслідок пластичної деформації під час волочіння, називається наклепом, а структура волоченого металу у вигляді витягнутих за напрямком волочіння зерен - текстурою.

Ступінь впливу деформації під час волочіння на фізико-механічні властивості протягнутого металу багато в чому залежить від властивостей металу, величини цієї деформації та інших причин, але можна виділити загальні тенденції цього явища:

- підвищуються характеристики міцності (межа міцності, межа текучості, твердість);
- знижуються (нерівномірно) пластичні властивості (відносне звуження, відносне подовження, число перегинів і скручувань);
- щільність металу незначно підвищується (0,5–1,0 %);
- антикорозійна стійкість дещо знижується; зростає електричний опір (у аустенітної сталі зростання становить до 30 %);
- змінюються магнітні властивості металу.

Під час пластичної деформації при волочінні структура металу зазнає значних змін – зерна перліту витягуються у напрямку волочіння, зростає кількість дефектів структури (дислокацій, вакансій, міжвузлових атомів), що призводить до збільшення міцності, твердості та зниження пластичності. Ці явища називаються наклепом під час волочіння. Подальша деформація призводить до утворення мікротріщин, які ростуть і за перевищення певного ступеня обтиску призводять до обривів дроту.

Щоб мати можливість продовжити волочіння, необхідно зняти наклеп дроту методами термічної обробки. Для цього застосовують відпуск, нормалізацію або відпал залежно від умов і марки сталі.



Під час термічної обробки знижується кількість дефектів структури, під час подальшого нагрівання відбувається утворення з деформованих (витягнутих) невеликих рівновісних зерен із недеформованою структурою металу, які ростуть і поступово займають весь об'єм матеріалу. Це явище називається рекристалізацією. При цьому знижується міцність і твердість, збільшується пластичність.

УДК 621.771

Широкобоков В.В.<sup>1</sup>, Мороз В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБУ «НАСАДОК»**

Штампування є одним із видів обробки металів тиском, що виробляється за допомогою штампів на пресах.

Холодне штампування являє собою процес виготовлення деталей, різноманітних за призначенням, формою та розмірами. Широкий розвиток листового штампування обумовлено цілим рядом переваг.

Більшість деталей, які одержують методом холодного штампування, можуть бути виготовлені декількома способами. При цьому необхідні операції для штампування заданої деталі можуть проводитися у відповідних окремих штампах, суміщених або послідовних штампах.

Перед розглядом можливих варіантів технологічних процесів необхідно встановити які чинники визначають побудова процесу які з них найважливіші. А саме форма заготівлі, спосіб одержання базового конструктивного елемента деталі, спосіб формоутворення інших конструктивних елементів деталі, спосіб одержання заданих фізичних, механічних властивостей деталі та автоматизації процесу. Кожен із цих факторів має властиві особливі ознаки – форма та відносні розміри первинної заготівлі, спосіб виконання операції, конструктивні особливості штампів, режими обробки та інше. Комбінуючи ці ознаки та фактори, можна отримати різні рішення. У крупносерійному виробництві необхідно прагнути до мінімальних витрат матеріалу, до найменшої кількості штампувальних операцій за рахунок використання та впровадження у проєкт спільного та послідовного процесу штампування, для підвищення продуктивності та стійкості штампів.

За основними кількісними та якісними показниками (коефіцієнт використання металу, кількість операцій та обладнання, трудомісткість виготовлення, складність обладнання, стійкість робочого інструменту та інше), які отримуємо в результаті подальших розрахунків, зробимо на їх основі порів-

няння оптимальності запропонованих варіантів виготовлення. Результуючим показником є собівартість, а чи не трудомісткість виготовлення деталі. Оптимальний варіант технологічного процесу повинен забезпечувати надійне виготовлення деталі у повній відповідності до вимог креслення (якість деталі) за найменшої її вартості (ефективність виробництва).

Оптимальні результати та їх новизна – це модернізація технології виготовлення шляхом зміни обладнання, зміни методу виготовлення деталі, заміни вихідного матеріалу, що дає можливість збільшити коефіцієнт використання металу, зменшити час технологічних пауз. В результаті збільшується продуктивність за рахунок автоматизації та механізації технологічного процесу.

УДК 621.771

Широкобоков В.В.<sup>1</sup>, Бондаренко В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ОСНАЩЕННЯ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ «КРОНШТЕЙН УТРИМУВАЧА ЗАМКА ДВЕРІ» З МЕТОЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПЧАСТИН ДЛЯ АВТОМОБІЛЕЙ**

Процеси листового штампування завдяки своїй високій продуктивності та економічній ефективності широко застосовуються в різних галузях промисловості: машинобудуванні, приладобудуванні, електротехніці, радіотехніці, електроніці, при виробництві товарів народного споживання та ін.

Для виготовлення сучасного легкового автомобіля витрачається близько 1100–1600 кг прокату. У тому числі близько 70% холодно- та 10% гарячекатаного листа (рулону). У загальній вазі металу, який необхідний виготовлення вантажного автомобіля, міститься 20-30% холоднокатаного і 25-35% гарячекатаного листа. За нормативами, прийнятими в нашій країні, із загальної кількості прокату витрачається профільного прокату 44% на вантажний та 25% на легковий автомобіль, а листового 56% та 75% відповідно.

Сучасний автомобіль містить від 60 до 80% деталей, що виготовляються листовим штампуванням, а трудомісткість їх виготовлення становить 7-15%. Капітальні вкладення створення потужностей з виробництва 1 млн. т литих деталей становить 740 млн. грн., а виготовлення тих же деталей методом холодної штампування з листа – 420 млн. грн.

Сучасний автомобіль містить від 60 до 80% деталей, що виготовляються листовим штампуванням, а трудомісткість їх виготовлення становить 7-15%. Капітальні вкладення створення потужностей з виробництва 1 млн. т литих

деталей становить 740 млн. грн., а виготовлення тих самих деталей методом холодного штампування з листа – 420 млн. грн.

Оптимальні результати та їх новизна – можливість проектування оригінальної конструкції штампи суміщеної та послідовної дії для виготовлення «Кронштейн утримувача замка дверей», яка виготовляється на восьми штампах простої дії. Заготівля з листа подавалася у штамп вручну. У розробленому проекті кількість штампів доведена до шести і заготовки подаються клино-роликовою або пневматичною подачею. Зроблено заміну вихідної заготовки з листа на стрічку, що дозволило збільшити КВМ.

Рекомендації до застосування – результати розробленого проекту рекомендується використовувати на автомобільному заводі.

УДК 621.771

Широкобоков В.В.<sup>1</sup>, Євтушенко В.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ ПЛАСТМАС НА ПРИКЛАДІ ЗАГЛУШКИ ІЗОЛЯЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА**

Інтенсифікація економічного розвитку диктує впровадження нових досконаліших технологічних процесів, сучасних машин та систем.

Подальше підвищення економічності та надійності різноманітної апаратури, приладів для авіації нерозривно пов'язане з виробництвом деталей із пластмаси.

З застосування матеріалів з термореактивних і термопластичних пластмас досягається значна економія кольорових і чорних металів, підвищення стійкості деталей, що працюють в агресивних середовищах, зниження ваги апаратури та зменшення трудомісткості виготовлення деталей.

На сучасному етапі розвитку промисловості з переробки пластмас займає дедалі більше місце в авіації, машинобудуванні тощо. застосування пластмаси пов'язане з її унікальними властивостями за допомогою яких можна підвищити надійність деталей, теплостійкість, опір статичним та динамічним навантаженням. Цьому сприяло також розвиток виробництва з випуску пластмаси та переробки її у вироби та деталі, для чого необхідно було випускати вископродуктивне обладнання, розробляти та впроваджувати прогресивні технологічні процеси.

Необхідно розробити технологічний процес виготовлення заглушки, у свою чергу заглушка виготовлятиметься методом прямого пресування. Отже,

основним завданням проекту буде вивчення особливостей виготовлення деталей із термореактивних матеріалів та особливості прямого пресування.

Найбільш поширені такі методи пресування:

– компресійне пресування в гарячих прес-формах при високому тиску (гаряче пресування);

– прес-лиття (трансферне пресування).

Компресійне пресування в гарячих прес-формах при високому тиску засноване на здатності пресувальних матеріалів при нагріванні під тиском переходити в пластичний стан, заповнювати порожнину прес-форми, потім затвердіти.

Температура пресування встановлюється залежно від типу та марки матеріалу, форми виробу. Пресування при підвищених температурах дозволяє скоротити витримку під тиском та покращити якість виробу за фізико-хімічними показниками. Однак надмірне підвищення температури може призвести до розкладання смоли та інших органічних речовин, які містяться в прес-матеріалі.

Деталь, запропонована для детальної розробки застосовується, як ізоляція в електричних системах двигуна, тому до матеріалу деталі пред'являються певні вимоги щодо тепло та електроізоляції.

Матеріалом, що найбільше задовольняє вимоги, є ДСВ-2-О.

ДСВ-2-О є модифікованою формальдегідною смолою  $39\pm 2\%$ , скляні комплексні нитки з діаметром елементарного волокна до 11 мкм, номінальна довжина гранул 10 мм.

УДК 621.771

Широкобоков В.В.<sup>1</sup>, Коваленко С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ОСНАЩЕННЯ І ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З МЕТОЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА**

Загальновідомий прогресивний характер технології ковальсько-штампувального виробництва, заснованої на отриманні заданої форми деталей або заготовок у результаті раціонального перерозподілу металу, а не за рахунок видалення його у стружку.

Штампування є одним із видів обробки металів тиском, що виробляється за допомогою штампів на пресах.

Холодне штампування являє собою процес виготовлення деталей, різноманітних за призначенням, формою та розмірами. Широкий розвиток листового штампування обумовлено цілим рядом її переваг:

1. Можливість отримання досить міцних та жорстких, але легких за масою конструкцій деталей;

2. Взаємозамінність одержуваних холодним штампуванням деталей внаслідок їх великої точності та одноманітності;

3. Велика продуктивність і низька собівартість деталей, що штампуються;

4. Можливість застосування малокваліфікованої сили;

5. Сприятливі умови автоматизації.

Операції штампування здійснюються на кривошипних пресах. 90% парку кривошипних пресів становлять преса загального призначення.

Під технологічністю слід розуміти таку сукупність властивостей та конструктивних елементів, які забезпечують найбільш просте та економічне виготовлення деталей за дотримання технічних та експлуатаційних вимог до них.

Основними показниками технологічності листових холодноштампувальних деталей є:

1. найменша витрата матеріалу;

2. найменша кількість операцій та їх низька трудомісткість;

3. відсутність наступних механічних операцій;

4. найменша кількість необхідного обладнання та виробничих операцій;

5. найменша кількість оснащення при скороченні витрат та термінів підготовки виробництва;

6. збільшення продуктивності окремих операцій та цеху в цілому.

Загальним результативним показником технологічності є найменша собівартість деталей, що штампуються. Одним із найважливіших питань, що передують технологічним розрахункам, є виявлення здатності металу виконувати штампувальні операції або визначення його відносно штампування.

Під штампуємо розуміють здатність листового металу піддаватися різним операціям штампування. Штампування залежить від ряду показників: механічних властивостей, пластичності, модуля пружності, структури металу та хімічного складу.

Оптимальні результати та їх новизна – це модернізація технології виготовлення шляхом зміни обладнання, зміни методу виготовлення деталі, заміни вихідного матеріалу, що дозволило збільшити коефіцієнт використання металу, зменшити час технологічних пауз. В результаті збільшується продуктивність за рахунок автоматизації та механізації технологічного процесу.

УДК 621.771

Широкобоков В.В.<sup>1</sup>, Зінченко С.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБУ «КОРПУС ПОВІТРЯНОГО ФІЛЬТРА» В УМОВАХ ДІЮЧОГО ВИРОБНИЦТВА**

Обробка металів тиском (прокатка, кування, штампування) повсюдно застосовується практично у всіх галузях виробництва. Причиною цього є висока якість одержуваної продукції, продуктивність, продуктивність і економічність виробництва.

На даному етапі розвитку науково-технічного прогресу замінити холодне листове штампування на виробництві даного типу неможливо. ХЛШ має низку незаперечних переваг перед іншими типами виробництва (лиття, токарне виробництво).

Штампування є одним із видів обробки металів тиском, що виробляється за допомогою штампів на пресах.

Штампування може проводитися як з об'ємної заготовки - катаного, тягнутого, пресованого дроту або товстої смуги, так і з листового матеріалу. Перший процес називається об'ємним штампуванням, другий – листовим штампуванням.

Залежно від товщини листа (заготівлі) штампування умовно ділять на тонколистове (товщина листа менше 4 мм) і товстолістове, причому листовий метал товщиною понад 15-20 мм зазвичай штампують у гарячому стані.

Переваги листового штампування:

- 1) можливість отримання досить міцних та жорстких, на легких за масою конструкцій деталей при невеликій витраті матеріалу;
- 2) взаємозамінність одержуваних холодним листовим штампуванням деталей внаслідок їх великої точності та одноманітності;
- 3) велика продуктивність та низька вартість деталей;
- 4) порівняно невеликі втрати матеріалу;
- 5) сприятливі умови автоматизації.

Всі холодно штампувальні операції можуть бути розбиті на такі основні групи: розділові, формозмінювальні, комбіновані та штампозбірні операції. До розділових операцій, пов'язаних з відокремленням однієї частини матеріалу від іншої по замкнутому або незамкнутому контуру, відносяться: відрізка, вирубка, пробивання, обрізка, розрізка, чистова вирубка та просікання. До формозмінних операцій, в процесі яких плоска або порожниста заготовки перетворюються на просторову деталь необхідної форми без зміни товщини матеріалу, відносяться: згинання, витяжка, правка, рельєфне формування,

відборткування, обтиск, роздача і формування, а також витяжка з потоншенням матеріалу. Комбінована штампування є поєднанням кількох технологічно різних окремих операцій штампування в одну.

Залежно від способу суміщення операцій комбіноване штампування поділяють на суміщене, послідовне і суміщено-послідовне.

В результаті аналізу технології виготовлення деталі визначено можливість модернізації технологічного процесу шляхом застосування багатопозиційного штампу послідовної дії, а також штампування деталі «корпус повітряного фільтра» на пресі-автоматі. Також є можливість впровадити прогресивні системи автоматизації та механізації. В результаті запропонованих змін є можливість збільшити продуктивність та якість виробу, а також знизити собівартість.

УДК 621.771

Широкобоков В.В.<sup>1</sup>, Мороз В.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБУ «КОРПУС РЕСИВЕРА» В УМОВАХ ДІЮЧОГО ВИРОБНИЦТВА**

Процеси листового штампування отримали широке застосування виготовлення багатьох деталей у різних галузях. Вихідним матеріалом для листового штампування служить металопрокат у вигляді листів, рулонів, стрічок, смуги. Листове штампування застосовується для виготовлення найрізноманітніших деталей, у тому числі автокузовних. Виготовлення деталей у такий спосіб становить близько 75-80 %.

Наведені розробки що дозволяють зменшити собівартість виготовлення деталей, але це дуже важливо, так як через невеликих розмірів деталей, що виготовляються, доводиться брати іноді збільшені розміри перемичок при розкрої. А це призводить до збільшення використання матеріалу, вартість якого і становить більшу частину собівартості деталі.

Використання автоматизації та механізації дозволяє підняти показники з техніки безпеки та зменшити собівартість за рахунок зменшення трудомісткості виготовлення деталей, але через те, що виробництво серійне в основному використовують часткову автоматизацію.

Розроблені технології холодного штампування можуть проводитися на універсальних пресах будь-якого типу. Це полегшує процес вибору обладнання та виконання операцій на устаткуванні, яке вже є у цехах. Але через обмежену номенклатуру типів пресів, для виготовлення деталей можна вико-

ристовувати прес, номінальне зусилля якого в кілька разів більше технологічного зусилля.

Основні показники технологічності листових штампованих деталей:

- найменше використання матеріалів;
- найменша кількість та низька трудомісткість технологічних операцій;
- відсутність подальшої механічної обробки;
- найменша кількість обладнання та виробничих операцій;
- збільшення продуктивності окремих операцій.

Загальним результативним показником технологічності – це зменшення собівартості. Необхідно визначити відносну штампування використовуваного матеріалу. Штампування залежить від ряду показників: механічних властивостей, модуля пружності, пластичності, структури металу та хімічного складу.

Актуальність розробленої технології в тому, що є можливість підвищення коефіцієнта використання матеріалу під час виготовлення деталей автомобіля та розробка автоматизованого процесу подачі деталей.

УДК 621.77

Широкобоков В.В.<sup>1</sup>, Глеба А.А.<sup>2</sup>, Савостін А.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ОХОЛОДЖЕННЯ ШТАМПІВ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ**

При гарячому штампуванні охолодження дуже впливає на стійкість інструменту. Зазвичай вважають, що охолодження має бути настільки інтенсивним, щоб температура поверхні інструменту не перевищувала половини температури відпуску.

Занадто сильне або нерівномірне охолодження внаслідок виникнення температурних коливань призводить до появи напружень і, отже, замість сприятливого впливу сприяє виникненню тріщин і помітному зниженню стійкості. Значний розкид стійкостей, що спостерігається при застосуванні гарячого штампування, найчастіше пояснюється нераціональністю охолодження, яке проводиться або нерівномірно, або занадто різко і односторонньо.

Тому слід перевернути в кожному окремому випадку, чи достатньо охолодження стисненим повітрям замість звичайного водяного струменя. Досвід показав, що у багатьох випадках таке охолодження можливе, і при цьому стійкість інструменту несподівано зростає. Слід уникати водяного охолодження при застосуванні високолегованих сталей, дуже чутливих до різких коливань температури. Якщо відмовитися від водяного охолодження не можна, необхідно звернути увагу на рівномірну подачу води. Іноді можна забезпечити рівномірне розпилення води у всіх місцях простим пристроєм. В осо-



бливих випадках рекомендується охолоджувати штампи за допомогою водяних каналів, що охолоджують, влаштованих безпосередньо в тілі штампів. Такий захід рекомендується, наприклад, для армованих штампів для забезпечення рівномірної температури банджа.

Необхідно приділяти увагу і температурі води, що охолоджує. Як правило упускають з уваги, що охолоджувальний ефект великою мірою залежить від температури води і що відмінність у працездатності інструменту пояснюється коливаннями температури охолоджуючого середовища. Тому в першу чергу в холодну пору року необхідно брати до уваги можливість підігріву води, що охолоджує, з метою пом'якшення її охолоджувальної дії і, отже, зменшення небезпеки виникнення тріщин.

Такий захід легко виконати, якщо помістити шланг, що підводить воду, на печі або на її димарі.

Необхідно припиняти підведення води під час зупинок або перерв у роботі, щоб не переохолоджувати інструмент. В іншому випадку при відновленні роботи термічні напруження, що виникають внаслідок великого температурного перепаду, призведуть до передчасної появи тріщин.

Завдяки навантаженням, що прикладаються до штампів при роботі в ньому виникають додаткові напруження, які можуть бути настільки великими, що виведуть штамп з ладу. Тому бажано інструмент після закінчення певного часу експлуатації ще раз відпустити, щоб зняти це додаткове напруження. Цей захід рекомендується для всіх штампів з легованих і нелегованих сталей, якщо на поверхні інструменту ще не з'явилися тріщини, а також для гарячих штампів. Для нелегованих та низьколегованих матеріалів для зняття напружень достатньо багатогодинного виварювання у воді чи олії; для високолегованих сталей, тобто для інструменту з високою температурою відпуску, температура якого повинна бути приблизно на 50° нижче за температуру першого відпуску.

УДК 621.771

Обдул В.Д.<sup>1</sup>, Стешенко А.Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **РОЗРОБКА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ З ВУГЛЕЦЕВО-ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ**

Вуглецево-полімерні композиції (ВПК) відносяться до групи дисперсних структур або структурованих систем у відповідності з відомими гіпоте-

зами, коли частки пов'язані силами молекулярного або механічного зчеплення та складають єдиний каркас, який пронизує весь об'єм.

Утворення дисперсних структур та їх властивості обумовлені відповідною концентрацією дисперсної фази, її розвинутою поверхнею, а також конфігурацією дисперсних часток.

Для отримання деталей з ВПК необхідної форми, розмірів та механічних властивостей приготовлені вуглецево-полімерні композиції формують пресуванням в прес-формі, видавлюванням, гідростатичним пресуванням, вібропресуванням або вибухом. Деталі машинобудування, як правило, виготовляють, у більшості випадків, пресуванням в прес-формі з відносною витримкою в часі в залежності від об'єму деталі при температурі на 5...10 °С вище температури каплеутворення в'язучого (для фенол-формальдегідної смоли така температура знаходиться в межах 180... 185°С).

Механічні властивості отриманих деталей залежать від складу шихти та подальшого процесу термообробки, під час якої в'язуче (фенол-формальдегідна смола) перетворюється на графіт. Цей процес іноді називають процесом графітації виробів з ВПК.

Найпростішими за формою деталями є, наприклад, підшипники ковзаня з ВПК, вартість яких набагато нижча від кулькових або роликових підшипників і вони можуть працювати навіть в агресивних середовищах.

УДК 621.771

Обдул В.Д.<sup>1</sup>, Єпішкін О.В.<sup>2</sup>, Морозов К.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> асист. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **АНАЛІЗ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ УДАРІВ ГВИНТОВИХ ПРЕСІВ**

На довготривалість і надійність роботи гвинтових пресів значний вплив здійснюють технологічні фактори, які приводять до систематичного перевантаження преса і оснащення внаслідок перевищення рівня накопиченої енергії удару. Найбільш слабкою ланкою в цьому випадку є кінематична пара маховик-гвинтовий шпindel і місце посадки маховика на шпindel. Аналіз поломок гвинтових пресів свідчить, що поломки відбуваються в місцях кінематичного контакту та з'єднань де є найбільша концентрація напружень: різьба, шліци хвостовика шпинделя, шпоночці пази та ін. В більшості випадків ці поломки відбуваються на пресах, де виконуються операції чеканки, карбування або штампування низьких поковок, наприклад перо лопатки газових турбін і ін.

Для підвищення надійності вказаних пресів застосовують регулювання енергії ударів з врахуванням всіх важливих технологічних факторів, першу чергу відхилень по масі та температурі кування.

Як відомо, регулювання енергії можна здійснити, контролюючи момент інерції маховика, кутову швидкість його, як основного накопичувача енергії удару (90-95%) і масу частин поступально, які рухаються поступально.

Найбільш простим і розповсюдженим є спосіб регулювання енергії ударів за рахунок зміни кутової швидкості. Контроль за дозуванням енергії удару може здійснюватись або по ходу повзуна, або контролюючи величину кутової швидкості. Більш прийнятним є спосіб контролю і регулювання енергії ударів за допомогою відцентрованого регулятора або з використанням тахогенераторів. В останньому випадку доцільно використовувати систему тиристорний перетворювач-двигун. В такому випадку система може контролювати як відхилення маси та температури заготовки, так інші фактори, які можуть впливати на точність відштампованої заготовки і дозування енергії ударів.

УДК 621.771

Обдул В.Д.<sup>1</sup>, Безуглий Б.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **РОЗРОБКА ДВОГВИНТОВОГО ПРЕСА**

Як відомо, для успішного прецизійного штампування, використовують в першу чергу машини ударної дії – молоти повітряні або гвинтові преси. Як показала практика експлуатації гвинтових пресів, при їх використанні необхідно враховувати реактивний момент, який має місце при штампуванні на таких пресах, оскільки це може привести до фрикційного зношування станин в місцях контакту фундаментів з станиною, або появи протікань робочої рідини у випадку експлуатації гвинтових пресів з гідприводом, розташованим окрему (преси типу LVH).

Нівелювання реактивного моменту може здійснюватись за рахунок фундаменту з якорем або з використанням двогвинтової конструкції преса. Преси можуть бути виконані в двох варіантах: для об'ємного штампування і листового, які можуть відрізнятись лише максимальною величиною накопиченої енергії удару. Повзун приводиться в дію двома гвинтовими шпинделями, на консолях яких насаджено маховики-шестерні, які знаходяться в постійному зачепленні один з одним. Гвинти мають відповідно праву і ліву різьбу, а гайки які взаємодіють з гвинтами закріплені на повзуні. Приведення махо-

виків в дію може здійснюватись від муфти включення, встановлених на обох маховиках одна з яких також обертається вправо, а інша вліво.

Така конструкція приводу дозволяє рушійний момент, який виникає в гайках при штампуванні замикає в повзуні і він не передається на станину. При позацентровому прикладанні зусилля, яке виникає при багаторівняковому штампуванні, на станину діє рушійний момент, рівний різниці моментів на гвинтових шпинделях. Одна із муфт включення працює для здійснення ходу вниз, а інша – для ходу вгору.

УДК 620.91: 330.567.4

Обдул В.Д.<sup>1</sup>, Портнов Є.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД**

Постійно існуюча потреба в підвищенні ефективності авіаційних двигунів та зниженні трудомісткості їх виготовлення вимагає впровадження нових матеріалів, технологій їх виготовлення та обробки, а також вдосконалення вже існуючих технологічних процесів.

Лопатки компресора є одним з критичних компонентів двигуна, що впливають на його продуктивність, надійність та безпечність польотів. Важливим фактором, що впливає на вибір технології виготовлення, є велика кількість деталей, що йде на один виріб.

Одним з перспективних методів отримання точних заготовок лопаток є видавлювання на гідравлічному пресі. Через те, що в процесі деформації метал стискається з усіх боків, цей метод дозволяє отримувати заготовки з якісною структурою: волокна повторюють геометрію лопатки. Структура та механічні властивості сприятливо впливають на підвищення якості деталей.

Ще однією прогресивною технологією виготовлення лопаток компресору ГТД є використання на заготівельному етапі методів інтенсивної пластичної деформації (гвинтової екструзії). Це дозволяє збільшити граничний ступінь деформації на операціях прокатування і штампування до 2,5 разів та знизити температуру деформування, що зменшує ресурсоемність і, як наслідок, вартість виготовлення лопаток.

Окремим напрямком розвитку технології виготовлення лопаток є використання композитних матеріалів замість традиційних титанових та жароміцних сплавів. Використання алюмініду титану у якості матеріалу заготовок лопаток дозволяє знизити вагу, рівень шуму та підвищити економію палива двигуном. Деталі виготовляються використовуючи ізотермічне штампування

на гідравлічному пресі в інтервалі температур 1100...1250°C при швидкості штампування менше 0,1 мм/с. Велика енергоємність процесу поки що є обмеженням для масового використання даної технології.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Павленко Д. В. Прогресивна технологія виготовлення лопаток компресору ГТД з використанням інтенсивної пластичної деформації та устаткування для її реалізації / Д. В. Павленко, О. Ф. Тарасов, С. В. Лоскутов, М. О. Щетініна, В. Ю. Коцюба // XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта», Том 2, м. Київ, 19-22 червня 2018 р. : матеріали конференції. – Київ : 2018. – С. 22–25.

2. Тітов В. А. Аналіз можливості отримання титанових заготовок робочих лопаток компресора видавлюванням на гідравлічному пресі / В. А. Тітов, А. М. Бень // XX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта», м. Київ, 10-13 вересня 2019 р. : матеріали конференції. – Київ : 2019. – С. 161–163.

3. Janschek P. Wrought TiAl blades / P. Janschek // *Materials today: Proceeding*. – 2015. – Vol. 2. – P. 92–97.

УДК 621.771

Обдул В.Д.<sup>1</sup>, Олефіренко С.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КУВАННЯ НЕРЖАВІЮЧИХ МАРОК СТАЛЕЙ

На сьогоднішній день кування злитків нержавіючих марок сталей в більшості випадків здійснюється на гідравлічних пресах різного зусилля, в залежності від замовлень.

Сам процес кування включає нагрівання злитка в методичних печах або колодязях, кування безпосередньо на пресі за декілька виносів, білетіровку, забивання кутів та прогладжування. Останні операції – прогладжування, забивання кутів займають лівову частку тривалості кування (до 40%) з використанням потужності преса на 10÷20%. Однак це не зменшує тривалість обдирання на ад'юстажі (до 12÷16 годин і більше).

Причиною цьому є нерівна поверхня поковки пов'язана з умовами роботи преса.

Такі перепади розмірів поковки по довжині вимагають, крім того, назначити припуски на обдирання, виходячи з мінімальних розмірів перетину.

Це приводить до зайвих витрат дорогого металу в стружку (до 10÷15%), а іноді і більше і збільшення тривалості обдирання.

Пропонується з технологічного процесу кування вилучити операції шліхтовки – прогладжування та забивання кутів і передати ці операції на прокатну кліть. Така технологія дозволяє отримати штанги з рівною гладенькою поверхнею зменшеними припусками на обдирання. Такі штанги з рівною поверхнею дозволяють скоротити час обдирання і підвищити продуктивність технології кування як нержавіючих марок сталей, так і інших високолегованих сталей і сплавів.

УДК 621.771

Обдул В.Д.<sup>1</sup>, Дзева В.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ШТОКІВ ПОВІТРЯНИХ МОЛОТІВ**

Відомі методи підвищення довговічності штоків можуть бути розділені на три групи:

Покращення умов експлуатації штоків;

Вибір матеріалу штоків;

Покращення конструкції штока та способи з'єднання його з бабою.

До першої групи слід віднести різного роду експлуатаційні заходи, а саме:

підігрівання нижньої частини штока до 200÷3000С;

підвищення вимог до регулювання направляючих та встановлення штампів з необхідністю жорсткого центрування їх відносно головної вісі молота;

розташування рівчаків таким чином, щоб штампування в рівчаках, яке вимагає значних зусиль, виконувалась при мінімальному ексцентриситеті прикладання зусилля;

примусова заміна латунної прокладки в конусному з'єднанні штока з бабою в момент, коли деформація прокладки закінчується;

переточка конуса штока й ін..

Друга група методів тривалий час була основним напрямом пошукових і дослідних робіт по підвищенню довговічності штоків. Вони включали:

– вибір матеріалу штоків і його термообробки;

– поверхнєве гартування за рахунок обробки дробом обкатки роликками, гартування і т.п.

До третьої групи методів підвищення стійкості штоків відносяться:

застосування штоків з потовщеним нижнім кінцем, запресованим в бабу та шток-баб;

використання штоків з труб;

використання податливих з'єднань штоків з бабою з демпфуючими можливостями для розвантаження з'єднання штока з бабою від виникаючих знакозмінних напружень. Останнім методам приділялась значна увага. На сьогоднішній день проведені частково або повністю дослідження таких з'єднань. Отримані позитивні результати.

УДК 621.771

Бень А.М.<sup>1</sup>, Широкобоков О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА РЕВОЛЬВЕРНОЇ ПОДАЧІ ДЛЯ РОБОТИ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ РЕЖИМІ**

Основними технологічними операціями порошкової металургії є такі: приготування порошків, отримання порошкової шихти, пресування з шихти заготовок, спікання для надання міцності та необхідних фізико-хімічних властивостей виробам та деякі види додаткової обробки (калібрування, цементація, азотування, загартування, просочення та ін.) . Технологія виробництва виробів із металевих порошків подібна до технології керамічного виробництва. Методами порошкової металургії можна одержувати вироби майже з усіх відомих металів та сплавів із великим техніко-економічним ефектом.

Важливою особливістю є отримання металевих виробів з особливими властивостями, що не зустрічаються в природі: пористих (з об'ємом до 50%), так званих «псевдосплавів» – нерівноважних систем, які не можуть бути отримані іншими відомими в металургії способами, комбінацій металів з неметалами. Особливого розвитку порошкова металургія набула у другій половині поточного століття під час виробництва виробів із тугоплавких металів.

Залежно від методу виготовлення частинки металевого порошку можуть мати розміри від часток мікрона до часток міліметра. Тому в 1см<sup>3</sup> міститься від кількох мільйонів до кількох тисяч частинок, а їхня питома поверхня - від часток квадратного метра до десятків квадратних метрів на один грам порошку.

Форма частинок залежить від способу виготовлення і може бути сферичної, краплеподібної, губчастої, тарілчастої, дендритної осколкової, волокнистої, пелюсткової і представляти комбінацію цих форм в одиниці об'єму.

Конструкція штампу повинна відповідати повністю вимогам технологічного процесу щодо отримання необхідної форми і точності деталі, що пресується, а також особливості автоматичної подачі.

Револьверні подачі використовуються для переміщення заготовок від механізму, що орієнтує, в зону дії інструменту і видалення напівфабрикатів або готових деталей з цієї зони. Вони застосовуються для різноманітних штампувальних та складальних операцій: таврування, пробивання, згинання, витяжки, запресування, карбування, складання тощо.

Револьверні подачі дають можливість збільшити продуктивність праці за рахунок зручної та спокійної роботи у безпечній зоні.

Для автоматичного транспортування заготовок із металевого порошку вибираємо револьверну подачу т.к. предмет захоплення плоский, маленький і деталь виходить за один перехід, не потрібно багато операцій, що перекладають. Конструкція револьверної подачі є прийнятною для пресового простору преса.

УДК 621.77

Бень А.М.<sup>1</sup>, Арцибашева М.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ

Термомеханічна обробка – це процес, при якому відбувається зміцнення сталі за рахунок зміни її структури і властивостей у поєднанні з пластичними деформаціями і термічною обробкою (гартуванням і відпусканням).

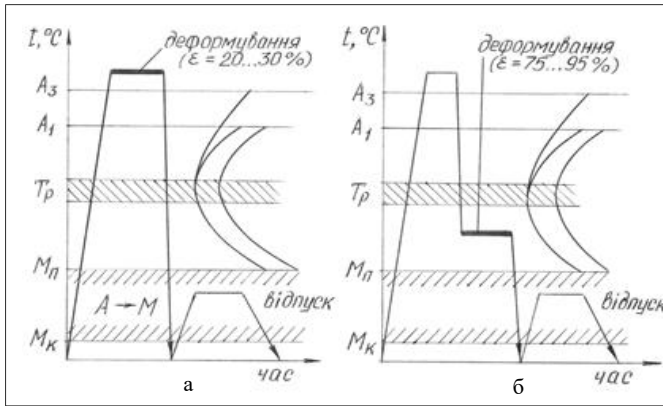
Сутність цієї обробки полягає в збільшенні міцності, підвищенні пластичності, усуненню крихкості та зменшенні здатності до утворення тріщин.

Залежно від температури розрізняють два основні способи термомеханічної обробки: високотемпературну та низькотемпературну.

Високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО) (рисунок 1, а) - сталь деформують при такій температурі, яка перевищує точку  $A_{c3}$ , при якій сталь перебуває в аустенітному стані. Ступінь деформації становить 20...30%. Після деформування проводять відразу гартування (швидке охолодження) для того, щоб запобігти розвитку процесу рекристалізації.

Низькотемпературна термомеханічна обробка (НТМО) (рисунок 1, б) - сталь деформують у температурному інтервалі існування переохолодженого аустеніту в області його відносної стійкості (400...600 °С), при цьому температура, при якій здійснюється деформування, має бути вище точки  $M_n$ , але нижче за температуру рекристалізації. Ступінь деформації становить 75...95%. Гартування здійснюють швидким охолодженням відразу після деформування.





а – графіки ВТМО; б – графіки НТМО.  
Рисунок 1 – Графіки ВТМО та НТМО.

Після гартування для обох обробок проводять низькотемпературне відпускання з температурою нагрівання 100...300 °С.

НТМО забезпечує більш високий рівень зміцнення сталі ніж ВТМО, але цей спосіб обробки потребує більш високих ступенів деформації, тобто, потужного устаткування, тому його застосування пов'язано зі значними труднощами.

УДК 621.771

Обдул В.Д.<sup>1</sup>, Сауткін О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРОКАТУВАННЯ І ЇХ ВПЛИВ НА ПОЗДОВЖНЮ ТА ПОПЕРЕЧНУ РІЗНОТОВЩИННІСТЬ СМУГИ

Прокатування є процесом обробки металевої смуги, який може впливати на її поздовжню та поперечну різнотовщинність. Технологічні параметри прокатування, такі як температура, швидкість, тиснення, кут нахилу валків та їхній діаметр, є ключовими факторами, які визначають якість прокатування.

При процесі прокатування, поздовжня різнотовщинність смуги може бути викликана такими факторами, як нерівномірність тиску валків, нерівномірною товщиною вихідної заготовки, нерівномірний прогин смуги через нерівність тиску валків, а також нерівномірне охолодження після прокатування. Для зменшення поздовжньої різнотовщинності, технологічні параметри ма-

ють бути налаштовані таким чином, щоб забезпечити рівномірний тиск валків та рівномірне охолодження після прокатування.

Поперечна різнотовщинність може бути викликана нерівномірним тиском валків, нерівномірним розташуванням вихідної заготовки на валках, нерівномірними товщинами вихідної заготовки та нерівномірним натягом смуги між валками. Для зменшення поперечної різнотовщинності, технологічні параметри мають бути налаштовані таким чином, щоб забезпечити рівномірний тиск валків, рівномірне розташування вихідної заготовки на валках та рівномірний натяг смуги між валками.

Отже, правильна настройка технологічних параметрів прокатування може значно зменшити поздовжню та поперечну різнотовщинність смуги.

УДК 621.771

Обдул В.Д.<sup>1</sup>, Буторін О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОКАТУВАННЯ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ НА СТАНІ 1050/950**

Для розробки та впровадження нових деформаційно-швидкісних параметрів прокатування кругів діаметром 230-265 мм була проаналізована та вдосконалена калібровка валків обтискувальної кліті стану 1050.

Запропонована нова схема калі бровки валків кліті 1050. Прокатування відливків вагою 4,36 т на діаметр 265 мм здійснювалось з використанням передчистового радіусного овала за 19 пропусків.

Режим обтискувань відливка вагою 3,69 т на круг діаметром 265 мм з використанням передчистового радіусного овалу (3 калібр, прокат здійснювався за 15 проходів з п'ятьма кантуваннями). Кантування здійснювали спочатку через кожні два, а потім через чотири проходи з обтискуваннями 35-50 мм до отримання після восьмого проходу перетину розкату 320×535 мм. Потім режим обтискувань такий же, як і при прокатуванні відливка масою 4,36 т.

В заготівельній кліті 950 розташовують два додаткових калібра – передчистовий овал (5 калібр) і чистовий круг (6 калібр).

Параметри швидкісного режиму в клітях розраховувались за алгоритмом Медведєва В.С. з врахуванням типу стану, характеристик основного і допоміжного обладнання.

В основу алгоритму розрахунку оптимального режиму прокатування на реверсивній кліті закладені мінімально необхідні паузи між проходами, які визначаються швидкістю роботи кантувачів та штекерів. Швидкість захвату і

викиду розраховуються по паузі між проходами, а максимальна швидкість – з умови мінімуму машинного часу. Така методика дозволяє розраховувати мінімальний цикл зразу ж, а не шляхом поступового наближення.

В основу розрахунку енергосилових параметрів прокатування покладе-на методика А.І. Целікова та О.П. Чекмарьова. Виконані розрахунки по завантаженню обладнання при прокатуванні кругів діаметром 230÷265 мм показали, що перевантаження обладнання відсутнє.

Після прокатування на прес-ножицях від круглих розкатів відрізають передній і задній кінці, що приводить до сплюснення металу ножами на 25 мм, що приводить до збільшення ширини до 295 мм. При використанні таких розкатів, для подальшого перекату на кліті 950 на круг діаметром 230 мм по запропонованій технології ширину передчистового овалу необхідно збільшити до 300 мм.

УДК 621.77:620.1

Бень А.М.<sup>1</sup>, Растоваров Д.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВПЛИВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ І МІЦНІСТЬ МАТЕРІАЛУ**

Обробка металів тиском є широко використовуваним процесом в обробній промисловості для покращення механічних властивостей металів. Цей процес передбачає вплив на метал високого тиску та температури, що викликає пластичну деформацію металу та змінює його мікроструктуру. Вплив обробки металів тиском на довговічність і міцність матеріалу є значним.

Однією з головних переваг обробки металів тиском є підвищення довговічності матеріалу. Процес зменшує пористість металу, роблячи його більш стійким до втоми та розтріскування. Ця підвищена довговічність особливо важлива для металів, які використовуються у сферах застосування з високим навантаженням, таких як аерокосмічна, автомобільна та нафтогазова промисловість. Довговічність матеріалу також підвищується за рахунок зменшення внутрішніх напружень, усунення дефектів, що виникли в процесі виробництва.

Окрім підвищення довговічності, обробка металів тиском також підвищує міцність матеріалу. Високий тиск і температура, що застосовуються під час процесу, викликають пластичну деформацію металу, що призводить до більш однорідної та щільної мікроструктури. Матеріал стає твердішим, міцнішим і стійкішим до деформацій, що робить його придатним для використання в умовах високого навантаження. Процес також покращує межу текучості матеріалу, яка є рівнем напруги, при якому матеріал остаточно деформується.

Вплив обробки металів тиском на довговічність і міцність матеріалу додатково посилюється можливістю контролювати параметри процесу. Процес може бути налаштований відповідно до конкретних вимог застосування, дозволяючи налаштовувати властивості матеріалу. Можливість контролювати параметри процесу також забезпечує постійність і відтворюваність властивостей матеріалу, що важливо для виробництва великої кількості.

УДК 621.762:620.17

Бень А.М.<sup>1</sup>, Фуніков Т.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. каф. ОМТ НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ СКЛАДНИХ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ЗІ ЗБІЛЬШЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ**

У процесі гарячого пресування металу застосовується висока температура і тиск, що дозволяє розплавити матеріал і привести його до необхідної форми. Гаряче пресування забезпечує високу міцність та високу пластичність, що робить його особливо популярним для виробництва складних металевих виробів, таких як кований вал, поршні, турбіни та інші.

За допомогою гарячого пресування можна досягти значних покращень у фізико-механічних властивостях металів, в тому числі у міцності, твердості, тривкості та зносостійкості. Також цей метод дозволяє знизити витрати на виробництво і скоротити час виготовлення виробів порівняно з іншими методами обробки металів.

Досліджуючи мікроструктуру та механічні властивості титанового сплаву TC4, отриманого методом гарячого пресування порошків. Було вивчено вплив температури та часу на процес пресування, мікроструктуру та механічні властивості отриманих зразків. Встановлено, що гаряче пресування порошків TC4 при температурі 900-1000°C із застосуванням тиску 200 МПа протягом 60 хв дозволяє отримати високу щільність порошку, однорідну мікроструктуру та підвищені механічні властивості [1].

З чого можна зробити висновок, що метод гарячого пресування порошків є ефективним для отримання високоякісних зразків титанового сплаву TC4 зі збільшеними фізико-механічними властивостями.

Вплив параметрів процесу гарячого ізостатичного пресування на щільність і механічні властивості сплаву Inconel 718. Було вивчено вплив температури, тиску і часу на процес ущільнення сплаву. Дослідження показали, що оптимальні параметри гарячого ізостатичного пресування для досягнення максимальної щільності і мінімального порошкового забруднення включають

температуру 1100°C, тиск 200 МПа і час 3 год. Отримані зразки мали високу механічну міцність і витривалість після гарячого ізостатичного пресування [2].

Також було виявлено, що підвищення тиску та температури пресування підвищує щільність та механічні властивості сплаву. Однак, підвищення часу пресування не призводить до значущих змін. Крім того, наявність недоликів у вихідному матеріалі може значно впливати на якість та однорідність готового виробу.

Досліджуючи процес отримання масивних зразків нержавіючої сталі 316L з високою зернистістю за допомогою технології гарячого пресування з наступною обробкою. Використовуючи різні температури та тиски пресування, досліджено вплив цих параметрів на мікроструктуру та механічні властивості отриманих матеріалів [3]. В результаті було встановлено, що висока температура та низький тиск можуть привести до отримання зразків з нерівномірною структурою та низькою міцністю, тоді як оптимальні параметри пресування (висока температура і високий тиск) дозволяють отримати матеріали з нано та субмікрометровим зерном, високою міцністю та доброю пластичністю.

Дослідження показали, що вироби, отримані за допомогою цієї технології, мають більшу міцність та зносостійкість порівняно з виробами, отриманими іншими методами, а також мають високу щільність матеріалу і покращенні його фізико-механічні властивості. Гаряче пресування дозволяє створювати комплексні геометричні форми з високою точністю та повторюваністю, що робить його дуже ефективним для виготовлення виробів зі складною геометрією та високою точністю.

Покращення фізико-механічних властивостей відбувається за рахунок зміни параметрів, таких, як температура, тиск та час, що не потребує значного вкладання коштів в модернізацію обладнання і дорогий та складний інструмент. Крім того, гаряче пресування дозволяє виготовляти вироби з мінімальним рівнем втрат матеріалу. Все це дозволяє зробити висновок, що ця технологія окрім покращення фізико-механічних властивостей складних металевих виробів є більш економічно вигідною у порівнянні з іншими методами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang S. Research on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy by hot pressing sintering / S. Zhang, L. Zhao, Y. Yang, X. Chen, X. Liu // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 771. – P. 435–442.
2. Djavanroodi F. Hot isostatic pressing of Inconel 718: Effect of processing parameters on densification and mechanical properties / F. Djavanroodi, M. H. Parsa, E. I. Meletis // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 656. – P. 252–263.
3. Ma D. Preparation and characterization of bulk ultrafine-grained 316L stainless steel by hot pressing sintering / D. Ma, L. Wang, Q. Liu, Z. Zheng, B. Zhang // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 606. – P. 260–266.

УДК 621.73(075.8)

Бень А.М.<sup>1</sup>, Шолох О.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ ГОЛОВНИХ ВАЛІВ

Головні вали кривошипних пресів класифікуються, як кривошипні, колінчаті, ексцентрикові чи вали шестірня-ексцентрикового привода з бугельною віссю.

Невеликі та середні вали кривошипних пресів виконують зі сталі 45, для валів великих і унікальних пресів використовують сталь 40Х, 40ХН, 40ХНМ. Вали обов'язково піддаються поліпшенню, а саме загартуванню з низькотемпературним відпуском.

Розрахунок міцності головного валу кривошипного преса – досить складна задача. Опори валів кривошипних пресів не є абсолютно жорсткими, та мають витримувати пружні деформації, які залежать від того, які на вал діють навантаження і від властивостей самої опори.

Можна зробити висновок, що силовий розрахунок валів без розрахунку пружності опор не має достатньої точності.

Один з основоположників теорії кривошипних пресів по розрахунку головних вузлів та систем розробив методику розрахунку головних валів, яка бере до уваги пружну взаємодію валу з опорами. Але, вона є достатньо громіздкою, тому рекомендується лише для розрахунку валів оригінальних і унікальних пресів.

Щоб розрахувати двохопорні вали, застосовують схожі формули, але вони не враховують пружність опор, приймаючи, що для колінчатого валу реакція розташована на відстані  $l_0/8$  від кінця опори, зверненого до шатуну, а для ексцентрикового валу ця відстань  $l_0/3 - l_0/4$ , де  $l_0$  – значення довжини опор. Передбачено, що навантаження прикладені зосередженими, і точки додатка рівнодіючих розташовуються на одній горизонталі. Зазори в підшипниках дають змогу валу безперешкодно згинатись.

Навантаження на головному валу преса змінюється. Сила і крутний момент зростають від нуля до максимуму, потім спадають, знов до значення нуля. Якщо такі операції повторюються багато разів, це може приводити до пульсації та збільшення внутрішніх сил напруги у матеріалах валів. Тому головні вали кривошипних пресів на втомну міцність треба розраховувати при пульсуючому навантаженні.

Зазвичай в перерізах головних валів діють такі силові параметри: згинаючі і крутні моменти, поперечні сили, що перерізують. Перші з них призводить до виникнення в металі нормальних напружень, другі і треті – догичних напружень. Зусилля, яке припускається на повзуні по міцності головного

валу, беручи до уваги обмеження коефіцієнту запасу міцності  $n$  (при пульсуючому циклі навантаження), визначається за наступною формулою:

$$P_{дон} = \frac{0,1d_0^3\sigma_{-lu}}{nk_3\sqrt{U_w^2\Phi_\sigma + \Phi_\tau(0,5U_k + 0,17d_0U_Q)^2}},$$

де  $d_0$  – діаметр розрахункового перетину;

$n$  – коефіцієнт запасу міцності;

$k_3$  – коефіцієнт еквівалентного навантаження;

$\sigma_{-lu}$  – межа витривалості при симетричному циклі;

$U_w, U_k, U_Q$  – відповідно, приведені плече згинаючого моменту, приведені плече моменту, що крутить, і коефіцієнт поперечних сил;

$\Phi_\sigma, \Phi_\tau$  – коефіцієнти, що характеризують механічні властивості матеріалу валу по нормальним та дотичним напруженням.

Значення коефіцієнтів обираються, залежно від конструкції головного валу і схеми приводу ГВМу.

Через те, що крутні та згинаючі моменти - перемінні і залежні від кута повороту вала, допустиме зусилля на повзуні теж буде перемінним, залежно від положення вала.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Явтушенко О. В. Проектування та розрахунок кривошипних пресів. Курсове проектування : навч. посібник / О. В. Явтушенко, А. В. Глебенко, Т. О. Васильченко. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – 436 с.

УДК 621.77

Бень А.М.<sup>1</sup>, Солдатенко В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## ХОЛОДНА ТА ГАРЯЧА ТА НАПІВГАРЯЧА ДЕФОРМАЦІЯ

Залежно від співвідношення температур деформації та плавлення розрізняють холодну та гарячу деформацію.

При холодній деформації температура нагрівання не перевищує температури рекристалізації, тому холодна деформація супроводжується зміцненням за рахунок утворення наклепаної структури.

Деформація, при якій у всьому обсязі тіла, що деформується, встигають пройти процеси рекристалізації, називається гарячою деформацією, або деформацією з повним розміцненням.

При гарячій деформації пластичність металів значно вища, ніж при холодній, а характеристики міцності приблизно в 8-10 разів нижче. При цьому деформовані зерна зберігають свою форму, тобто при гарячій обробці металів тиском деформований метал набуває волокнистої макроструктури. Ця макроструктура зберігається і при подальшій термічній обробці та при подальшій обробці тиском. Волокниста макроструктура веде до анізотропії механічних властивостей. Міцність при розтягуванні та стисканні у напрямку волокна більша, ніж уперек волокна. Опір зрізу вперек волокна більший, ніж уздовж. Показники пластичності (відносне подовження, ударна в'язкість і т. д.) вздовж волокон вище, ніж уперек.

Однак у процесі нагрівання металу до температур гарячої обробки може відбуватися інтенсивне вигорання легуючих компонентів з верхніх шарів заготовки, але в поверхні утворюється значний по товщині шар окисленого металу – окалини. Як наслідок, зовнішні шари заготовки мають знижені механічні характеристики, знижується точність, погіршується якість поверхні та доводиться призначати значні припуски на подальшу механічну обробку.

При нагріванні вихідної заготовки до температури гарячої деформації; в матеріалі, що деформується, можливе протікання зміцнювальних процесів обох видів. Особливо це характерно для деформування заготовок з великою швидкістю, внаслідок того, що більшість роботи пластичної деформації переходить у теплову енергію, підвищуючи загальну температуру металу на кілька сотень градусів. Така деформація називається напівгарячою. При нагріванні металу до температури напівгарячої обробки опір деформації знижується у кілька разів у порівнянні з холодною, а пластичність дещо вищою. Окислення поверхні заготовки незначне, що дозволяє знизити припуски на подальшу механічну обробку в кілька разів порівняно з гарячою обробкою.

Обробку тиском у режимі напівгарячої деформації застосовують для сплавів, схильних до інтенсивного окиснення при нагріванні та характеризуються низькою пластичністю при холодній деформації (сплави на основі молібдену, вольфраму та титану). Також напівгаряча деформація застосовується при виготовленні заготовок із конструкційної сталі та латуні з метою підвищення точності та якості поверхні порівняно із заготовками, отриманими методами гарячої деформації. При напівгарячій обробці використовують мінімально можливі температури нагрівання матеріалу та максимально можливі швидкості деформування, що з одного боку виключає місцеве перегрів металу за рахунок тепловиділення в процесі пластичного деформування, а з іншого боку виключає передчасне охолодження заготовки.



УДК 621.771

Ленок А.А.<sup>1</sup>, Строколіс А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812М НУ «Запорізька політехніка»

## **ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ МЕТОДУ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ШТАМПУВАННЯ (МІОМ)**

Магнітно-імпульсна обробка металів (МІОМ) характеризується тим, що тиск на деформовану металеву заготовку створюється безпосереднім впливом імпульсного магнітного поля без участі проміжних твердих, рідких або газоподібних середовищ.

Технологічні операції МІОМ виконуються за трьома основними схемами: обтиснення, роздавання та плоске штампування. За першими двома ведеться обробка трубчастих заготовок, за останньою – штампування трубчастих деталей великого діаметра (правка, прошивання отворів та ін.) та обробка листових заготовок.

За результати досліджень та досвіду впровадження методу МІОМ виявлено низку переваг у порівнянні з іншими способами обробки металів тиском:

- невеликі початкові капіталовкладення;

- значне зниження металоємності застосовуваного оснащення за рахунок використання при операціях формування або однієї матриці або однієї оправлення, що істотно знижує терміни підготовки виробництва;

- можливість точного та плавного регулювання тиску та часу його впливу;

- висока точність і стабільність повторення виконуваних операцій, що дозволяє використовувати процес та обладнання у серійному та масовому виробництвах відповідальних деталей;

- легка вбудовуваність обладнання в потоково-механізовані та автоматичні лінії з досить високою продуктивністю;

- відсутність поверхневого контакту заготовки з інструментом дозволяє вести обробку полірованих заготовок, заготовок з покриттями тощо;

- підвищення показників штампування для цілого класу матеріалів порівняно зі статичним деформуванням;

- простота здійснення концентрації тиску на окремих ділянках та отримання потрібної епюри тиску;

- простота обслуговування магнітно-імпульсних установок та висока культура виробництва.

До недоліків методу МІОМ можна віднести наступні:

- не всі метали та їх сплави можуть деформуватися без застосування допоміжних вкладок (прокладок з матеріалу з високою електропровідністю);

наявність високих інерційних сил дозволяє обробляти заготовки товщиною до 3...5 мм для важких металів (міді, латуні, сталі) та до 10 мм – для легких металів та сплавів;

низька стійкість індукторів під час деформування високоміцних матеріалів.

УДК 621.771

Ленок А.А.<sup>1</sup>, Штапура С.С.<sup>2</sup>

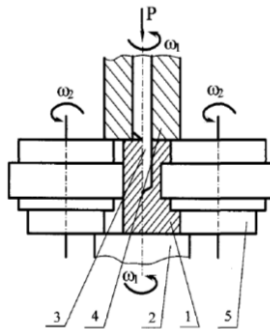
<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

### ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДУ ВАЛКОВОГО ШТАМПУВАННЯ

Валкове штампування – формозмінююча операція обробки металів тиском, представляє собою отримання вісесиметричних деталей з циліндричної заготовки за рахунок одночасного прикладення до неї осьових та радіальних навантажень. Осьове навантаження заготовки при валковому штампуванні створюється за рахунок переміщення пуансону, а радіальне – за рахунок обкатки її бічної поверхні роликів чи валків.

Таким чином, валкове штампування являє собою метод комплексного локального деформування, в якому в одному технологічному процесі відбувається поєднання однієї з основних ковальських операцій – прошивання або осаджування (висаджування) з поперечним прокатуванням або обкатуванням (рисунок 1).



1 – заготовка; 2 – упор; 3 – пуансон; 4 – знімач; 5 – роликів;  $\omega_1$  – кутова швидкість заготовки;  $\omega_2$  – кутова швидкість роликів.

Рисунок 1 – Схема процесу валкового штампування.

Метод валкового штампування дозволяє виготовляти круглі в плані суцільні та порожнисті деталі, тонкостінні та товстостінні вироби малих розмі-

рів, що застосовуються в приладобудуванні, а також великогабаритні деталі з високою точністю та якістю при технологічній силі на порядок меншою, ніж для традиційних методів об'ємного штампування.

Комплексне навантаження осередку пластичної деформації локальним періодичним впливом з одночасним впливом через зону, що постійно фіксується, дозволяє отримати новий технологічний ефект, недосяжний іншими методами деформування.

Валкове штампування сприяє поліпшенню фізико-механічних властивостей металу, що обробляється, забезпечує необхідне розташування його волокон, що підвищує експлуатаційні властивості одержуваних деталей. Відносно низька вартість оснащення, незначний час підготовки виробництва, можливість швидкого переналагодження на інший типорозмір деталі, використання обладнання невеликої потужності дозволяють застосовувати валкове штампування як у великосерійному, так і в середньо- та дрібносерійному виробництвах.

УДК 621.771

Ленок А.А.<sup>1</sup>, Улінець А.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **ВПЛИВ АНІЗОТРОПІЇ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

Штампувальний листовий матеріал, як правило, має початкову анізотропією механічних властивостей, зумовленою маркою матеріалу, технологічними режимами його отримання, яка може надавати як позитивний, так і негативний вплив на стійке протікання технологічних процесів обробки металів тиском.

Граничні можливості формозміни при пластичному деформуванні ізотропних матеріалів, як правило, оцінюються за максимальною величиною розтягувального напруження на виході з осередку пластичної деформації, а також за феноменологічними критеріями руйнування, які пов'язані з накопиченням мікроушкоджень (за мірою використання ресурсу пластичності).

Анізотропія листового матеріалу є наслідком утворення текстури переважного орієнтування кристалографічних осей у зернах оброблюваного матеріалу, характеру розподілу та орієнтування фаз дефектів металу та залишкових напружень, що виникають внаслідок неоднорідності пластичної деформації при прокатуванні. При деформації заготовки зерна та включення набувають витягнутої форми, яка після відпалу переходить у рядкову структуру,

внаслідок чого властивості, у тому числі й механічні, вздовж і поперек напрямку прокатування можуть різко відрізнятись.

Анізотропія листового матеріалу залежить від режимів прокатування та подальшої термічної обробки.

Вивчення кінетики розвитку текстури при холодному прокатуванні показало, що анізотропія у загальному випадку зростає зі збільшенням деформації до певної межі, після якої вона мало змінюється.

Анізотропія механічних властивостей металів проявляється у відмінності меж плинності  $\sigma_{0,2}$ , тимчасового опору розривання  $\sigma_b$ , відносного подовження  $\delta$  та інших параметрів у різних напрямках площини листа. Для характеристики анізотропії використовують різноманітні показники.

Для оцінки анізотропії механічних властивостей листового матеріалу найчастіше застосовуються коефіцієнти анізотропії  $R_\alpha$ , які являють собою відношення логарифмічних деформацій по ширині  $\epsilon_b$  і товщині  $\epsilon_z$  зразків, вирізаних під кутами  $\alpha$  по відношенню до напрямку прокатування, при випробуванні на розтяг.

У разі ізотропного матеріалу це відношення дорівнює одиниці. Розрізняють:

трансверсально-ізотропне тіло, коли коефіцієнт анізотропії практично однаковий у різних напрямках по відношенню до напрямку прокатування листа, але відрізняється від одиниці,

площинну анізотропію, коли коефіцієнт анізотропії різний у різних напрямках щодо напрямку прокатування в площині листа.

УДК 621.771

Ленок А.А.<sup>1</sup>, Андронов Є.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗАКЛЕПУВАЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ В МАШИНОБУДУВАННІ

Заклепувальні з'єднання – це з'єднання, що створюються шляхом використання заклепок. Заклепки представляють собою елементи кріплення, які використовуються для з'єднання двох або більше пластин або компонентів. Вони зазвичай використовуються в місцях, де потрібне міцне та надійне з'єднання, особливо у металевих конструкціях.

Процес створення заклепувального з'єднання включає в себе перфорування отворів в матеріалах, що з'єднуються, вставку заклепки в отвір і подальше її закріплення. Заклепки можуть бути встановлені вручну або за допомогою спеціалізованих інструментів, таких як заклепувальний пістолет або прес.

Заклепувальні з'єднання мають ряд переваг, включаючи міцність, надійність та довговічність. Вони також можуть бути використані в умовах високих температур та вібрації. Однак вони можуть бути складні в установці та можуть вимагати спеціальних інструментів та досвідчених працівників для їх встановлення.

Дослідження деталей заклепувального з'єднання в машинобудуванні може проводитися з метою визначення характеристик міцності з'єднання, його жорсткості і стійкості до навантажень.

Одним із методів дослідження є випробування на розтягування чи стиснення. Для цього використовують спеціальне обладнання, яке дозволяє виміряти максимальне навантаження, яке може витримати з'єднання до руйнування.

Також проводять візуальний аналіз деталей заклепувальної сполуки з метою виявлення дефектів, таких як тріщини, корозія, забруднення. Для визначення якості з'єднання проводять контроль герметичності, який дозволяє встановити, чи не відбувається витік газів або рідин через з'єднання.

Іншим методом дослідження є метод кінцевих елементів, який дозволяє чисельно моделювати поведінку деталей заклепувальної сполуки при різних навантаженнях.

Дослідження деталей заклепувального з'єднання в машинобудуванні є важливими для забезпечення безпеки та надійності роботи механізмів та машин.

УДК 621.771

Ленок А.А.<sup>1</sup>, Бусько Д.В.<sup>2</sup>, Коробов О.О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **РЕГУЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ ШЛЯХОМ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ**

3D-моделювання – процес створення тривимірної моделі об'єкта, або об'єктів, як концептуального уявлення готової деталі, відтворення технологічного процесу з урахуванням визначених параметрів. Основне завдання 3D-моделювання – розробити зоровий об'ємний образ бажаного об'єкта.

Регулювання експериментальних процесів обробки металів з використанням 3D-моделювання тиску може бути досягнуто таким чином:

Створення 3D-моделі металевої заготовки та її навколишнього середовища. Для цього необхідно використовувати спеціалізовані програмні засоби, такі як AutoCAD, SolidWorks або інші аналогічні програми.

Встановлення параметрів обробки металу, таких як тиск, температура, швидкість і т.д. Ці параметри залежать від конкретного процесу обробки, наприклад екструзії, штампування, пресування, і т.д.

Імпортування 3D-моделі до спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання тиску, таке як Abaqus, ANSYS, LS-DYNA, і т.д.

Вибір матеріалу металу та визначення його механічних властивостей. Це може бути зроблено шляхом проведення тестів різних типів зразків металу або шляхом використання даних з літератури.

Створення сітки елементів на поверхні 3D-моделі, щоб визначити розподіл напружень та деформацій усередині металу. Це може бути зроблено автоматично або вручну, залежно від програмного забезпечення.

Встановлення граничних умов для моделювання, такі як обмеження переміщення, сили або температури на певних поверхнях металу.

Запуск моделювання та аналіз результатів, таких як розподіл напружень, деформацій, температури тощо. Якщо результати не відповідають заданим параметрам обробки, параметри можуть бути змінені і моделювання має бути повторено.

Використання отриманих результатів для оптимізації експериментального процесу обробки металу тиском, таких як зміна параметрів процесу використання різних матеріалів і т.д.

Отже, 3D-моделювання може бути використане для регулювання експериментальних процесів обробки металів, що дозволяє оптимізувати процес та досягти кращих результатів у кінцевому підсумку.

УДК 621.771

Ленок А.А.<sup>1</sup>, Жуков О.А.<sup>2</sup>, Кубарєв Д.О.<sup>3</sup>, Ольховський В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **СУЧАСНІ ФОРМУВАЛЬНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

Сучасні формувальні методи обробки металів тиском охоплюють широкий спектр технологій, що дозволяють здійснювати різноманітні операції з металом, такі як гідроформування, гальванічне покриття, лиття під тиском, екструзія, газодинамічне ущільнення формувальних матеріалів та інші.

До найбільш поширених сучасних формувальних методів обробки металів тиском відносять:

- Гідроформування – це метод формування металевих деталей шляхом застосування високого тиску води або іншої рідини. В цьому процесі металевий лист змінює форму, коли він піддається тисковій від гідравлічного преса.

Гідроформування може бути використано для виготовлення складних деталей зі складними викривленнями, низькою шорсткістю поверхні та без швів.

- Електроштампування – це метод формування металевих деталей шляхом застосування високої електричної напруги до металевого листа, який перетворюється в форму, встановлену на матриці. Електроштампування може бути використано для виготовлення деталей зі складними геометричними формами з високою точністю.

- Термічне формування – це метод формування металевих деталей шляхом нагрівання металевого листа до високої температури, після чого він змінює форму, коли піддається тискові від гідравлічного преса. Термічне формування може бути використано для виготовлення деталей з високою точністю та складною геометричною формою.

- Лиття під тиском – це процес виробництва деталей з металу, в якому розплавлений метал зливається в форму, в якій вже є пустоти та порожнини. Під високим тиском цей метал здатний заповнити всі порожнини та деталі форми, що дозволяє виготовляти деталі з високою точністю та повнотою.
- Екструзія – це метод формування металу, при якому його примушують пройти через формуючий інструмент зі спеціальними отворами або отворами у формі профілю. Цей метод використовується для створення деталей з різноманітними профілями, таких як металеві труби, профілі для вікон та дверей, алюмінієві рамки та інші.
- Газодинамічне ущільнення формувальних матеріалів – це технологія обробки порошкових матеріалів, що дозволяє отримувати високоякісні деталі з високою щільністю та стійкістю.
- Гальванічне формування – це процес формування металевих деталей за допомогою електрохімічних процесів. Цей метод дозволяє створювати складні деталі з точністю до кількох мікрометрів.
- Алмазно-іскрове шліфування – це метод обробки поверхонь металевих деталей, який використовує комбінацію алмазної та іскрової обробки. Цей метод шліфування використовується для створення високоякісних та точних поверхонь деталей, зокрема для виготовлення форм та матриць.

Глибока тяга – це процес обробки листового металу, при якому плоский лист матеріалу перетворюється в тривимірну форму, яка має глибокий рельєф або вирізи. Цей процес використовується для виготовлення великої кількості деталей, включаючи місця для мікросхем, автомобільні кузови та кухонне обладнання.

УДК 621.77:620.1

Єпішкін О.В.<sup>1</sup>, Рудик Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>асист. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ГІДРОФОРМУВАННЯ**

Гідроформування – це процес формування металевих заготовок за допомогою гідравлічного тиску в спеціальних пресах. Під час гідроформування, металева заготовка поміщається в закритий прес і заповнюється рідиною (наприклад, водою або маслом) під тиском. Це дає змогу створити деталі зі складнішою формою та вищою точністю, ніж це можливо під час використання традиційних методів обробки металу. Гідроформування широко використовується в автомобільному та авіаційному виробництві, а також в інших галузях, де потрібні складні металеві деталі.

1. Гідроформування - це процес обробки металів тиском, який використовується для виробництва складних і точних форм металевих виробів.

2. Гідроформування є одним із найефективніших та економічно вигідних способів обробки металів, особливо для виробництва компонентів автомобільної та авіаційної промисловості.

3 Однак процес гідроформування може мати низку технічних і технологічних проблем, таких як деформація матеріалу, втома металу і складності в управлінні процесом.

4. Існує необхідність проведення подальших досліджень для оптимізації процесів гідроформування, таких як розробка нових матеріалів, поліпшення виробничих технологій і поліпшення точності та якості кінцевих виробів.

5. Отримані результати та висновки можуть бути використані у виробничій сфері, особливо в автомобільній та авіаційній промисловості, для поліпшення виробничих процесів і підвищення ефективності виробництва.

УДК 621.77:620.1

Єпішкін О.В.<sup>1</sup>, Коломоєць С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>асист. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. М-822м НУ «Запорізька політехніка»

## **АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВИРОБІВ МЕТОДОМ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ**

Гаряче об'ємне штампування – це прогресивний метод металообробної промисловості, який відноситься до галузі заготівельних виробництв. Проду-



кцію гарячого штампування називають поковками чи штампованими поковками. Використання процесів штампування дозволяє значно зменшити витрати матеріалів при виробництві деталей, а також підвищити їх якість на відміну від інших типів заготівельних виробництв.

Аналіз технологічного процесу гарячого штампування полягає у визначенні етапів виробництва та встановленні технічних параметрів для кожного етапу. Основні етапи включають підготовку сировини, підготовку матриці, нагрів матеріалу, штампування та охолодження виробу. Встановлення оптимальних параметрів для кожного з цих етапів може допомогти знизити витрати та підвищити якість виробів.

Для оптимізації технологічного процесу гарячого штампування можуть бути використані різні методи, такі як математичне моделювання, експериментальні дослідження та аналіз даних. Математичне моделювання може допомогти встановити оптимальні параметри для кожного етапу виробництва, враховуючи фізичні характеристики матеріалу та умови процесу. Експериментальні дослідження можуть бути проведені для перевірки та підтвердження результатів моделювання.

Гаряче штампування – це процес формування металевих виробів за допомогою пресування гарячого металу у форму.

Оптимізація технологічних процесів виробництва виробів методом гарячого штампування дозволяє покращити якість виробів, зменшити витрати та збільшити продуктивність.

Аналіз технологічних процесів гарячого штампування включає вивчення характеристик матеріалу, форми, тиску та температури, що дозволяє встановити оптимальні параметри для формування виробів.

Для оптимізації процесів гарячого штампування використовуються різноманітні техніки, включаючи моделювання, експериментальні дослідження, аналіз даних та оптимізацію параметрів процесу.

Розробка та використання автоматизованих систем контролю та управління процесом гарячого штампування може допомогти забезпечити стабільність та повторюваність виробництва високоякісних виробів.

Оптимізація технологічних процесів гарячого штампування має велике значення для виробництва високоякісних та конкурентоспроможних металевих виробів.

УДК 621.77:620.1

Єпішкін О.В.<sup>1</sup>, Мангаєв О.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>асист. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup>студ. гр. М-812м НУ «Запорізька політехніка»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ШТАМПУВАННЯ**

Метод високошвидкісного штампування (High-Speed Stamping) - це процес формування виробів за допомогою штампувального пресу, який працює з високою швидкістю. Цей процес зазвичай використовується для виробництва малогабаритних виробів з високою точністю та якістю.

Дослідження можливостей використання методу високошвидкісного штампування може включати вивчення характеристик матеріалу, швидкості та тиску, необхідних для формування виробів, а також встановлення оптимальних параметрів для кожного етапу процесу виробництва.

Одним із переваг методу високошвидкісного штампування є висока продуктивність, оскільки в процесі виробництва можуть бути використані преси з високою швидкістю, що дозволяє виготовляти велику кількість виробів за короткий час. Крім того, високошвидкісне штампування може забезпечити високу точність та якість виробів завдяки високій швидкості та точності руху штампа.

Метод високошвидкісного штампування використовується для виробництва малогабаритних виробів з високою точністю та якістю.

Дослідження можливостей використання методу високошвидкісного штампування включає вивчення характеристик матеріалу, швидкості та тиску, необхідних для формування виробів.

Оптимальні параметри для високошвидкісного штампування повинні встановлюватися для кожного етапу процесу виробництва.

Метод високошвидкісного штампування забезпечує високу продуктивність завдяки використанню пресів з високою швидкістю.

Для успішного застосування методу високошвидкісного штампування необхідно мати високоякісні матеріали, які здатні витримувати великі навантаження та високі температури.

Дослідження можливостей використання методу високошвидкісного штампування може допомогти визначити переваги та недоліки цього методу виробництва.

## СЕКЦІЯ «ВИЩА МАТЕМАТИКА»

УДК 517.9

Онуфрієнко В.М.<sup>1</sup>, Слюсарова Т.І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> асист. НУ «Запорізька політехніка»

### ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРОБІЙ ФРАКТАЛЬНОГО КАНАЛУ ПОЛЬОВОГО НАНОТРАНЗИСТОРА

Зменшення довжини каналу метало-діелектричних напівпровідникових транзисторів сприяє підвищенню питомої крутизни вольт-амперних характеристик та граничної частоти. Коли поздовжні розміри напівпровідних структур досягають значень 1-2 мкм, ці закономірності перестають виконуватись. При цьому, якщо дизайн і трактування електростатичних закономірностей мало змінились за останні десятиліття, то фізична природа і характер переносу електронів суттєво змінюється на фоні зменшення довжини каналу провідності нанотранзистора, спостерігається зміна і форма вольт-амперної характеристики [1], що відбувається також і при зменшенні інших топологічних розмірів. Значну роль у побудові теорії відіграє нефостеровість фрактальних елементів, що проявляється у їх здатності створювати від'ємні характеристики ємності або індуктивності у локальному масштабі [2] за рахунок виникнення негативного зворотного зв'язку.

Побудову фрактальної моделі імітації нефостерівського наношару окислу на межі метал-напівпровідник у просторі як функції множини здійснюємо вводом у розгляд основних положень теорії фрактального шару на межі розділу двох середовищ: визначення дробового диференціала

$d^\alpha x = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \cdot \frac{dx}{(t-x)^{1-\alpha}}$ , його зв'язку з дробовою похідною

$d^\alpha L(x) = {}_a D_{x_i}^\alpha L(x) d^\alpha x$ , де дробова похідна  ${}_a D_{x_i}^\alpha L(x)$  використовується у формі Рімана-Ліувілля. Для фрактально конфігурованого інверсійного шару з товщиною  $x_d$  у площині  $xOy$  та щільності струму  $j(x, y)$  моделюємо

струм стоку як  $I_D^{(\alpha)} = a \cdot \int_0^{x_d} j(x, y) d^\alpha x$ .

З урахуванням у моделі фрактальності по  $y$  маємо вираз для щільності

струму  $j^{(\alpha)}(x, y) = -e \cdot \mu_n \cdot n \cdot \frac{dV(y)}{dy}$ ,  $\int_0^{x_d} e \cdot \mu_n \cdot n \cdot d^\alpha x = \mu_n^* \cdot Q_n^{(\alpha)}(y)$ ,

$$I_D^{(\alpha)} = -\mu_n^* \cdot a \cdot Q_n^{(\alpha)}(y) \cdot \frac{dV(y)}{dy}. \quad (1).$$

Коли напруга стік-витік  $V_{DS}$  перевищує напругу перекриття  $V'_{DS}$ , приповерхневу область напівпровідника можна подати у вигляді зворотнозмщеного  $n^+ - p$ -переходу, до якого прикладено напругу  $V_{DS} - V'_{DS}$  [1]. Довжина області перекриття  $l_s$  та співвідношення між товщиною області просторового заряду  $l$  та ефективною довжиною каналу  $l_e$ :

$$l_s^\alpha = l^\alpha - l_e^\alpha \approx \sqrt{k_s \cdot (V'_{DS} - V_{DS})}, \quad k_s = 2 \cdot \varepsilon_s / (q \cdot N). \quad (2)$$

З урахуванням (2) та узагальненого принципу подібності для фрактально конфігурованих структур  $\frac{I^{(\alpha)}_D}{I_D} = \left(\frac{l}{l_e}\right)^\alpha$  зв'язок струму стоку

$I_D^{(\alpha)}$  зі струмом  $I'_D$ , що є відповідним напрузі перекриття  $V'_{DS}$ , отримуємо співвідношення

$$\frac{I_D}{I'_D} = \left(\frac{l}{l_e}\right)^\alpha, \quad I_D = I'_D \left( \frac{l}{l - \sqrt{k_s \cdot (V'_{DS} - V_{DS})}} \right)^\alpha. \quad (3)$$

Теоретично підтверджується сильний вплив скейлінгу каналу на перебіг стоккових характеристик транзистора, що пояснюється фрактальністю каналу і механізмами, що викликають швидке зростання струму за великих  $V_{DS}$ : лавинне розмноження носіїв у каналі за рахунок ударної іонізації і пробій переходу стік-підкладка. Помічено значний вплив на зсув порогових значень пробивної напруги  $V_B$  в умовах «м'якого» та «різкого» пробою, що мотивується фрактальною конфігурацією переходів стік-підкладка. Якщо довжина каналу мала, а підкладка має малий скейлінг фракталізації, то границя переходу стік-підкладка знаходиться поблизу витоку, у зв'язку з чим виникає пробій стік-витік («прокол»). При цьому порушується наближений лінійний зв'язок між вихідною провідністю і струмом стоку, що спостерігається і експериментально підтверджується для класичних польових транзисторів [1].

Теоретичні результати дослідження вказують на необхідність урахування виявлених фактів у впровадженнях розглянутої структури транзистора з

фрактальною конфігурацією каналу у складі напівпровідникових інтегральних мікро- і наносхем пристроїв дробового інтегродиференціювання в адаптивних системах, програмованих аналогових інтегральних схемах, фільтрах, розв'язувачах диференціальних рівнянь дробового порядку тощо.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cobbold R. Theory and Application of Field-effect Transistors / R. Cobbold. – Wiley-Interscience, 1970. – 534 p.
2. Onufrienko V. M. Modeling characteristics of field-effect fractal nanotransistor / V. M. Onufrienko, T. I. Slyusarova, L. M. Onufriyenko // IEEE: Proceedings 15th International Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2020. – P. 586–589.

УДК 539.3

Онуфрієнко В.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

### КОНТАКТНА ЗАДАЧА ГЕРЦА ПРО УДАРНУ ВЗАЄМОДІЮ ФРАКТАЛЬНО КОНФІГУРОВАНИХ ТІЛ

У розробленій теоретичній диферінтегральній моделі контактної задачі Герца узагальнюється фрактальний підхід до опису процесів різної природи, зокрема вільних та вимушених коливань нелінійних механічних систем. Порівняно з іншими відомими теоріями механічного удару [1] у запропонованому підході створюється можливість визначати максимальне значення сили удару фрактально конфігурованих тіл у просторових і часових координатах, тривалість такої ударної імпульсної взаємодії та інші так звані  $\alpha$  – характеристики [2], що використовуються для оцінки динамічної міцності тіл з фрактальною геометрією в умовах інтенсивного короткочасного навантаження.

Для постановки задачі Герца про контакту взаємодію двох твердих тіл, що заповнені суцільними середовищами з фрактальними властивостями в'язко-пружних границь, будується диферінтегральна модель з визначеною мірою Хаусдорфа та відповідною фрактальною розмірністю. Задача зводиться до визначення введених нами  $\alpha$  – характеристик фрактального шару, що є узагальненням простого та подвійного потенціалів.

Для розрахунку зближення  $x(t)$  центрів мас при ударі двох незакріплених фрактально конфігурованих твердих тіл з масами  $m_1$  і  $m_2$  розглядаємо нелінійне диференціальне рівняння

$$m \ddot{x} = -\kappa x^\alpha, \quad (1)$$

де  $m = (m_1 \cdot m_2)/(m_1 + m_2)$ ;  $\kappa$  – коефіцієнт для урахування форми і фрактальних властивостей тіл. Початкові умови:  $x(0) = 0$ ;  $\dot{x}(0) = v_0$ .

Розв’язок задачі Коші для рівняння (1) будемо з урахуванням перетворення  $\ddot{x} = \dot{x} \frac{d\dot{x}}{dx}$ . Отже,

$$m \dot{x} d\dot{x} = -\kappa x^\alpha dx. \quad (2)$$

Після інтегрування (2) з урахуванням початкових умов маємо

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \sqrt{v_0^2 - \frac{2}{m} \cdot \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1}},$$

звідки для визначення  $x(t)$  необхідно обчислити інтеграл

$$\int_0^x \frac{dy}{\sqrt{1 - \frac{2}{mv_0^2} \cdot \frac{y^{\alpha+1}}{\alpha+1}}} = v_0 t. \quad (1)$$

отримуємо у вигляді

$$x(t) = \gamma Sa(\alpha, 1, \frac{(1+\alpha)v_0 t}{2\gamma}). \quad (3)$$

У формулі (3) використано інтегральне подання Атеб-сінуса  $Sa$ ;  $\max x(t) = \gamma$ . Час досягнення максимального зближення центрів фрактально конфігурованих мас визначається рівнянням:

$$Sa(\alpha, 1, \frac{(1+\alpha)v_0 t}{2\gamma}) = 1.$$

Для  $\alpha = \frac{3}{2}$  маємо розв’язок задачі (1) у постановці [1] для розрахунку пружного удару двох незакріплених твердих тіл з урахуванням їх контактної деформації.

Розглянутий підхід можливий для використання у розрахунках коливань континуальних систем з фрактально конфігурованими метаматеріальними включеннями в балках, пластинах і оболонках, що піддаються в’язко-пружному удару.

Уможливлється обчислення не тільки переміщення, а й напруження у фрактальних тонкостінних елементах конструкцій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ольшанский В. П. АТЕБ-синус у розв'язку задачі Герца про удар / В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2018. – № 3 (1279). – С. 98–103.

2. Онуфрієнко В. М. Фрактальний шар зарядів у граничній задачі як узагальнення простого та подвійного шарів / В. М. Онуфрієнко, А. В. Куземко // XV Міжнародна наукова конференція ім. акад. Михайла Кравчука : матеріали, Київ, 15–17 травня 2014 р. (Т. 1. Диференціальні та інтегральні рівняння, їх застосування). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – С. 235.

УДК 539

Онуфрієнко В.М.<sup>1</sup>, Антоненко Н.М.<sup>2</sup>, Онуфрієнко О.В.<sup>3</sup>, Килимник І.М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> канд. юрид. наук, доц. докторант ДРІДУ НАДУ

<sup>4</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ДИФЕРЕНТЕГРАЛЬНА МОДЕЛЬ ГІСТЕРЕЗИСНИХ ТА РЕДИТАРНИХ РЕОЛОГІЧНИХ ФРАКТАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

Штучне створення фрактально конфігурованих метаматеріалів з притаманними екзотичними властивостями, спонукає дослідників зосереджувати зусилля на розробці теоретичних моделей для опису і прогнозування протікання процесів у таких середовищах.

В основу реологічного методу для опису механічних і електродинамічних процесів у фрактальному метаматеріальному середовищі покладаємо диферентегральну модель фрактальних елементів [1], що базується на введенні хаусдорфової метрики та міри фрактальних точкових зарядів у вигляді диферентегральної альфа-форми множин фізико-механічних елементів у метаматеріальному середовищі та, як наслідок, у вигляді дробового диференці-

ала  $d^\alpha x = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \frac{dx}{(t-x)^{1-\alpha}}$ , його зв'язку з дробовою похідною поля напруже-

ності  $d^\alpha E(x) = {}_a D_x^\alpha E(x) d^\alpha x$ , де дробова похідна  ${}_a D_x^\alpha E(x)$  використовується у формі Рімана-Ліувілья.

Швидкість руху частинки (заряду) фрактально конфігурованою траєкторією  $x(t)$  у момент часу  $t$ , таким чином, визначається як  $D_t^\alpha x(t)$ , що у деякій мірі знімає вимогу гладкості розглядуваних функцій фрактального процесу і надає змогу через варіацію скейлінгу розглядати проміжкові випадки між в'язкими і пружними процесами.

Застосування поняття фрактала в математичному моделюванні динамічних фізико-механічних систем наділяє їх властивостями, що характерні для складних нелінійних систем, наприклад, в ефектах просторового гістерезису та часової ередитарності, коли враховується не тільки теперішній стан системи або найближчий попередній стан (тобто початкові значення параметрів стану системи, деякі похідні за часом та просторовими координатами), але також і всі попередні стани, в яких перебувала дана система.

Гістерезис явища, процесу є емпірично-теоретичною концепцією, що приймається і набуває розвитку у природничих (а останнім часом і в історичних, соціокультурних) науках, застосовується для опису нелінійних механізмів розглядуваних процесів з гіпотетично можливими різноманітними траєкторіями розвитку системи та просторовими положеннями рівноваги, насиченості тощо.

Динамічну систему можна вважати гістерезисною, коли просторово-часові траєкторії деяких або всіх змінних виявляють зв'язок у залежності від швидкості перебігу явища з можливими передбаченнями наявності неергодичності.

Циклічна деформація фрактально конфігурованого тіла навіть за малих напруженостей супроводжується порушенням закону Гука, що проявляється у виникненні петлі гістерезису. Розміщена всередині петлі гістерезису площа діаграми визначає енергію, що розсіюється за один цикл коливань в одиниці об'єму матеріалу.

Відомо, що експериментально точну форму петлі гістерезису виявити важко. Це пов'язано з малою відстанню між вітками петлі. Для більшості конструкційних матеріалів площа петлі практично не залежить від темпу деформування (від частоти процесу), але залежить від амплітуди деформації.

Застосуванням реологічного підходу теоретично підтверджується, зокрема, сильний вплив скейлінгу (просторового і часового) на розсіювану за один цикл енергію, що залежить від скейлінгу частоти коливань та їх амплітуди для фрактально конфігурованого матеріалу.

Акцентується увага на використанні математичної реологічної концепції для аналізу й синтезу штучних метаматеріальних фрактальних елементів з необхідними механічними й електродинамічними характеристиками.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Онуфрієнко В. М. Диферінтегральні альфа-форми у хаусдорфовій метриці на фрактальних множинах / В. М. Онуфрієнко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – № 2 (8). – 2002. – С. 31–35.

УДК 539

Онуфрієнко В.М.<sup>1</sup>, Засовенко А.В.<sup>2</sup>, Онуфрієнко О.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>3</sup> канд. юрид. наук, доц., докторант ДРІДУ НАДУ

### МОДЕЛЮВАННЯ БУФЕРНОСТІ ЗВ'ЯЗАНИХ ФРАКТАЛЬНИХ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Розгляд феномену буферності актуалізується у зв'язку з моделюванням процесів пам'яті та створенням запам'ятовуючих комірок. Проектування стабільних автогенераторів пов'язане з необхідністю боротьби з буферністю як з паразитним фактором. Інтерес до вивчення зазначеного феномену пов'язаний з необхідністю теоретичного розгляду основних моделей відтворення явищ у просторі і часі.

Далі розглядаються фізико-математичні аспекти виникнення і опису феномену буферності коливальних процесів у моделях автогенераторів з елементами фрактального типу. Вимірюванням протяжності фрактальної частини контуру, що проектується на відрізок осі, визначається зв'язок між кількістю елементів покриття та їх розміром і що описується функціональним рівнянням у  $\alpha$  – характеристиках Коші, а довжина ланки ламаної лінії визначається за допомогою засобів інтегро-диференціального дробового числення з диферінтегралом  $({}_a ID_x^{\alpha(x)} f)(x)$ .

Як фрактальний об'єкт в задачах розглядається шар, що утворений  $2^\alpha$  - полями (для граничного значення  $\alpha = 1$ , маємо класичний диполь) з моментом

$$ID^\alpha \vec{p}(\vec{r}, t) = \vec{z}_0 p ID_r^{\alpha_1} \delta(\vec{r} - \vec{r}') ID_t^{\alpha_2} \delta(t - t'),$$

де  $\delta(u - u')$  - дельта-функція Дірака

$$ID_u^\beta \delta(u - u') = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(\beta)} \frac{1}{(u - u')^{1-\beta}}, & a < u' < u; \\ 0, & u < u'. \end{cases} \quad (1)$$

З (1) ми пов'язуємо означення функції Гріна  $G^{(\alpha)}(\vec{r}, \vec{r}'; t, t')$  та  $\alpha$  – характеристик компонент електричного і магнітного векторів напруженості. Сток-джерельна функція Гріна  $G^{(\alpha)}(\vec{r}, \vec{r}'; t, t')$  складається із просторової  $D_r^{\alpha_1} \delta(\vec{r} - \vec{r}')$  та часової  $D_t^{\alpha_2} \delta(t - t')$  частин, чим ураховано геометричну і часову фрактальність фізично реалізованих елементів.

Для дослідження буферності у випадку фрактально конфігурованої по координаті  $x$ ,  $0 \leq x \leq 1$ , лінії довжиною  $l$ , розглядаємо у вигляді ( $u$  та  $i$  – нормовані складові напруги й сили струму в лінії):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^\alpha u}{\partial t^\alpha} &= -\frac{\partial^{1+\beta} i}{\partial x^{1+\beta}}, & \frac{\partial^\alpha i}{\partial t^\alpha} &= -\frac{\partial^\beta u}{\partial x^\beta} - ri, \\ i|_{x=0} &= rk_1(u - u^3/3)|_{x=0}, & k_2 \frac{\partial^\beta i}{\partial x^\beta}|_{x=1} &+ i|_{x=1} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Фізичні характеристики фрактального автогенератора:  $r = lR\sqrt{C/L}$ ,  $k_2 = C_0/(Cl)$ ,  $k_1$  – коефіцієнт підсилення,  $\alpha$ ;  $\beta$  – скейлінгові показники фрактальності відповідно у часі і просторі.

У математичному плані виникає лінійна система диферінтегральних рівнянь (2) з нелінійністю в одній з граничних умов у лінії з просторовим скейлінгом.

Дослідженням впливу скейлінгу на явище буферності виявлено, що варіюванням параметрів можна гарантувати існування в системі Вітта будь якого скінченного числа стійких циклів, а положення точок біфуркаційного переходу від нестійкого до стійкого циклу залежать від величини  $\alpha$  та  $\beta$ ; цей факт стимулює подальші теоретичні дослідження ередитарних і гістерезисних процесів у системі.

Чисельне моделювання  $\alpha$  -характеристик за допомогою засобів MatLab демонструє можливість вивчення перебігу зазначених буферних процесів у схемі фрактального транзистора [2], що для нефрактальної моделі збігаються з відомими даними експериментальними і теоретичними даними.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Онуфрієнко В. М. Електромагнітні приповерхневі властивості фрактально структурованих металів / В. М. Онуфрієнко // Вісник ДНУ. – 2008. – Т. 16. – № 2/1. – С. 150–157.
2. Onufrienko V. M. Capacitance-voltage differintegral characteristics of fractal field-effect device / V. M. Onufrienko // Journal of Physics and Electronics. – 2020. – Vol. 28(2). – P. 57–62.

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНІ ЗУБЧАТОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ (ЗРО) ДЛЯ ОБРОБКИ ГРУНТУ

Завдання проектування ЗРО зводиться до вибору такої математичної моделі, яка б забезпечувала всі критерії, що пред'являються до робочого органу в технологічному та економічному плані з урахуванням фізико-механічних властивостей ґрунту.

Форма робочого органу виконана у вигляді блоку зубів. Кожен окремих зуб представляє собою в горизонтальній площині западину, виконану по логарифмічній спіралі, і виступ, що є параболою четвертого степеня. У горизонтально-проектювних площинах переріз зуба є сімейством логарифмічних спіралей виду:

$$r_{\theta} = r_0 \cdot e^{\theta \operatorname{tg} \varphi},$$

де  $r_{\theta}$  – змінний радіус-вектор;

$\operatorname{tg} \varphi$  – коефіцієнт внутрішнього тертя;

$r_0$  – початковий радіус-вектор;

$\theta$  – змінний кут радіус-вектора.

Геометрію поверхні ЗРО в загальному вигляді можна представити за допомогою матриці

$$A = \left( \begin{array}{ccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right),$$

де  $\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$  – матриця, яка описує обертання в тривимірному просторі,

торі,

$\begin{pmatrix} a_{14} & a_{24} & a_{34} \end{pmatrix}^T$  – складові поступального переміщення.

Обертання точок спіралі навколо осі  $Ox$  на кут  $\alpha = 90^\circ - \gamma$  ( $\gamma$  – кут розхилу лапи робочого органу) описується матрицею обертання:

$$A_{об} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Загальне переміщення точок твірної логарифмічної спіралі визначається за допомогою скалярного множення матриць

$$A = A_{п} \cdot A_{об},$$

де  $A_{п}$  – матриця переміщення:

$$A_{п} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_1 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_2 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta x_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

де  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  – складові вектора.

Рівняння поверхні ЗРО в матричному вигляді може бути представлено як

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & \Delta x_1 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & \Delta x_2 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta x_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{pmatrix}$$

де  $x_1, x_2, x_3$  – координати точок твірної спіралі;

$\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  – координати точок ріжучого леза.

Дане рівняння описує поверхню зуба на ділянці западин і виступів.

Математична модель опису поверхні дозволяє для різних умов отримати сімейство ЗРО, яке буде працездатним для конкретних умов.

## ОПИС ПРОЦЕСУ ПОДРІБЛЕННЯ ҐРУНТУ ПРИ ОБРОБЦІ ЙОГО ЗУБЧАТИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

Математична модель механіки подрібнення ґрунту при його обробці зубчастими робочими органами дозволяє цей процес представити в двох послідовних фазах. У першій фазі шар ґрунту руйнується при проходженні лобової поверхні зубчастого робочого органа, яка виконана по логарифмічній спіралі:

$$r_i = r_0 \cdot e^{\alpha \operatorname{tg} \phi},$$

де  $\alpha$  – поточний кут спіралі;

$\phi$  – кут внутрішнього тертя.

Руйнування ґрунтового пласта в першій фазі залежить від швидкості руху машини та від характерного кута логарифмічної спіралі лобової поверхні. Далі шар подрібнюється на хвилястій поверхні синусного циліндра.

Після подрібнення на лобовій поверхні зубчастого робочого органа ґрунт потрапляє на хвилясту поверхню вже значно розпушеним. При цьому пласт отримує деформації перегину на синусній поверхні, що додатково і більш якісно руйнує цілісність і подрібнює пласт ґрунту за рахунок почергових деформацій розтягування (розриву) та стиску, викликаних впадинами та виступами синусної поверхні робочого органа. При цьому на всій поверхні діє нерівномірно розподілене навантаження  $q(x)$ , поперечна сила  $Q(x)$  і згинальний момент  $M(x)$ , які є функціями від " $x$ " (довжина хвильової поверхні).

Поперечна сила  $Q(x)$  дорівнює рівнодійній розподіленого навантаження:

$$Q(x) = - \int_{x_1}^{x_2} q(x) dx.$$

Згинаючий момент обчислюється як:

$$M(x) = \pm Rq(x),$$

де  $R$  – радіус кривизни хвилястої поверхні.

Протягом хвилястої поверхні зубчастого робочого органа пласт ґрунту під дією знакозмінних навантажень руйнується деформаціями розриву і стиснення, а також під дією згинального моменту.

Неоднорідне поле деформацій сприяє високій якості подрібнення пласта ґрунту з мінімальними енергозатратами.

УДК 517.547.7

Nataliia Snizhko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PhD (Physics and Mathematics),

associate professor NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

### APPROXIMATION OF FUNCTIONS OF TWO VARIABLES ON LYAPUNOV SCELETONS

The approximative properties of interpolational Lagrange polynomials, Faber – Laurent series of functions of two variables which are defined at an arbitrary closed Lyapunov sceleton, is stated. For functions from generalized Hölder spaces  $H_\omega$  the estimations are conducted for norms of  $C$ ,  $H_\omega$ ,  $L_p$ ,  $p > 1$  spaces [1].

Let  $\gamma = \gamma_1 \times \gamma_2$  is sceleton which is formed by arbitrary simple closed Lyapunov contours  $\gamma_1$  and  $\gamma_2$  (origin is contained inside them). Let  $\omega(\delta_1, \delta_2)$  be the some modulus of continuity, and  $\Omega_1(\delta)$ ,  $\Omega_2(\delta)$  are the simple moduli of continuity, which respect to that one;  $\omega_{1,1}$  denotes the mixed modulus of continuity of the second order [2]. Let  $H_\omega$  denotes the space of continuous functions  $x(t, \tau)$  at  $\gamma_0$ , which satisfy the conditions:

$$H(x; \omega) = \sup_{\delta_1^2 + \delta_2^2 \neq 0} \frac{\omega(\delta_1, \delta_2; x)}{\omega(\delta_1, \delta_2)} \leq c_1, \quad H^{t\tau}(x; \omega) = \sup_{\delta_1^2 + \delta_2^2 \neq 0} \frac{\omega_{1,1}(\delta_1, \delta_2; x)}{\Omega_1(\delta_1)\Omega_2(\delta_2)} \leq c_2.$$

In the space  $H_\omega$  the norm is defined as:

$$\|x(t, \tau)\|_{H_\omega} = \|x(t, \tau)\|_C + H(x; \omega) + H^{t\tau}(x; \omega).$$

$$\text{Let } (L_{mn}x)(t, \tau) = \sum_{p=0}^{2m} \sum_{q=0}^{2n} x(t_p, \tau_q) \big|_p(t) \big|_q(\tau) = \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n \lambda_{kl} t^k \tau^l,$$

$$l_p(t) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq p}}^{2m} \frac{t-t_k}{t_p-t_k} \left(\frac{t_p}{t}\right)^m = \sum_{k=-m}^m \lambda_{1,k}^{(p)} t^k, \quad l_q(\tau) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq q}}^{2n} \frac{\tau-\tau_j}{\tau_q-\tau_j} \left(\frac{\tau_q}{\tau}\right)^n = \sum_{j=-n}^n \lambda_{2,j}^{(q)} \tau^j,$$

denotes interpolational Lagrange polynomial of the function  $x(t, \tau)$  with respect to the system of Fejér points  $(t_p; \tau_q)$ ,  $p=0, \dots, 2m$ ,  $q=0, \dots, 2n$  at the skeleton  $\mathcal{Y}$  [1]. Let us denote by  $F_{mn}$  the operator which assigns to any twice continuously differentiable function  $x(t, \tau)$  at skeleton  $\mathcal{Y}$  (whose partial derivatives  $\frac{\partial x}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial x}{\partial \tau}$ ,  $\frac{\partial^2 x}{\partial t \partial \tau}$  belong to the space  $H_\omega$ ) the  $mn$ -th partial sum of its double Faber – Laurent series.

**Theorem 1.** Let  $x(t, \tau) \in H_\omega$  (its partial derivatives  $\frac{\partial x}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial x}{\partial \tau}$ ,  $\frac{\partial^2 x}{\partial t \partial \tau}$  belong to the space  $H_\omega$ ), the points  $\{t_p\}_{p=0}^{2m}$ ,  $\{\tau_q\}_{q=0}^{2n}$  form the system of Fejér points at the skeleton  $\mathcal{Y}$  and  $(L_{mn}x)(t, \tau)$  is the interpolational Lagrange polynomial which is formed with respect to this system of points. Then the estimation is true:

$$\|x - L_{mn}x\|_C \leq c l n m l n n H(x; \omega) \omega\left(\frac{1}{m}, \frac{1}{n}\right)$$

$$\left(\|x - F_{mn}x\|_C \leq c(l n m + l n n) H(x; \omega) \omega\left(\frac{1}{m}, \frac{1}{n}\right)\right).$$

**Theorem 2.** Let  $x(t, \tau) \in H_{\omega^{(1)}}$  (its partial derivatives  $\frac{\partial x}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial x}{\partial \tau}$ ,  $\frac{\partial^2 x}{\partial t \partial \tau}$  belong to the space  $H_{\omega^{(1)}}$ );  $\omega^{(2)}(\delta_1, \delta_2)$  is such that  $H_{\omega^{(1)}} \subset H_{\omega^{(2)}}$  and  $\Omega_1^{(1)}(\delta)/\Omega_1^{(2)}(\delta)$ ,  $\Omega_2^{(1)}(\delta)/\Omega_2^{(2)}(\delta)$  are increasing functions. Then:

$$\|x - L_{mn}x\|_{H_{\omega^{(2)}}} \leq c l n m l n n \frac{\omega^{(1)}\left(\frac{1}{m}, \frac{1}{n}\right)}{\Omega_1^{(2)}\left(\frac{1}{m}\right) \Omega_2^{(2)}\left(\frac{1}{n}\right)} \|x\|_{H_{\omega^{(1)}}}$$

$$\left( \|x - F_{mn}x\|_{H_{\omega^{(2)}}} \leq c \ln mn \frac{\omega^{(1)}\left(\frac{1}{m}, \frac{1}{n}\right)}{\Omega_1^{(2)}\left(\frac{1}{m}\right)\Omega_2^{(2)}\left(\frac{1}{n}\right)} \|x\|_{H_{\omega^{(1)}}} \right).$$

**Theorem 3.** Let  $x(t, \tau) \in H_{\omega^{(1)}}$ ,  $\gamma \in C_{(2, \omega)}$  [1]. Then the estimation is fulfilled ( $p > 1$ ):

$$\|g - L_{mn}g\|_{L_p} \leq (1 + c(p))H(g; \omega^{(1)})\omega^{(1)}\left(\frac{1}{m}, \frac{1}{n}\right),$$

where  $\|L_{mn}\|_{C \rightarrow L_p} \leq c(p)$ .

### REFERENCES

1. Snizhko N. Approximation of functions of two variables at Lyapunov skeletons in generalized Hölder spaces [Електронний ресурс] / N. Snizhko // Information and its impact on social processes. Abstracts of XIII International Scientific and Practical Conference. Florence, Italy, 2023. – P. 230–234.
2. Timan A. F. Theory of Approximation of Functions of a Real Variable/ A. F. Timan. – Oxford-London-New York-Paris : Pergamon Press, 1963. – 655 p.

УДК 539.3

Данильченко Д.В.<sup>1</sup>, Засовенко А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. техн. наук, інж. ТОВ «Дата Х»

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

### МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ОБТІЧНИКА ПРИ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО РОЗПОДІЛЕНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Якісні закономірності поширення збурень у складених кусково-однорідних оболонкових конструкціях становлять інтерес при оцінці їхньої міцності, жорсткості та стійкості під дією динамічних навантажень.

При дослідженні нестационарних навантажень оболонкових конструкцій, найбільш зручно використовувати рівняння руху оболонок типу Тимошенко, оскільки ці рівняння враховують деформацію зсуву та інерцію обертання. Ці рівняння гіперболічного типу мають дійсні характеристики, і, отже, швидкості поширення хвиль навантаження в оболонці мають кінцеві значення.



Спираючись на теорію оболонок типу Тимошенко [1], у випадку нелінійної симетричної деформації геометричні співвідношення можна привести до системи рівнянь другого порядку виду:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} - \frac{1}{c_i^2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_{j=1}^n \left( \alpha_{ij} u_j + \beta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x} \right) \equiv F_i, (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

де  $c_i$  – швидкості поширення хвиль,  $\alpha_i, \beta_i$  – коефіцієнти, що включають геометричні та фізичні параметри складових.

До системи диференціальних рівнянь другого порядку (1) застосуємо так званий сітково-характеристичний метод [2].

Розглянуто задачу динамічного деформування оболонкової конструкції обтічника при дії зовнішнього розподіленого навантаження. Досліджувана конструкція є напівсферою радіусом  $R$ , яка з'єднана з циліндричною оболонкою довжини  $L$ . Край циліндричної оболонки жорстко зацемлений ( $u = w = \varphi = 0$ ).

Навантаження задане у вигляді:

$$P_3(t) = P_0 + \frac{P_1 - P_0}{t_1} t, (t \leq t_1)$$

$$P_3(t) = P_0, (t > t_1)$$

де  $P_0 = 0.216 * 10^5$  Па,  $P_1 = 0.132 * 10^5$  Па,  $t_1 = \frac{R}{c_0}$ ,  $c_0$  – швидкість звуку у повітрі.

Розрахунки проводилися за наступних геометричних та фізико-механічних параметрів:  $\frac{h}{R} = 0.02$ ,  $L = R = 0.5$  м,  $E = 7 * 10^{10}$  Па,  $\nu = 0.3$ .

Результати розрахунків, отримані за допомогою представленої в даній роботі методики, якісно узгоджуються з результатами, отриманими у [3] для величин прогинів  $u_3$  ( $w = u_3$ ) у момент часу  $t \approx 3t_1$ .

Запропонована чисельно-характеристична методика дозволяє єдиним методом отримувати розв'язання задач про поширення пружних хвиль у кусково-однорідних оболонкових конструкціях з різними геометричними та фізико-механічними параметрами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Воробьев Ю. С. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю. С. Воробьев, А. В. Колодяжный, В. И. Севрюков, Е. Г. Янютин. – Киев : Наукова думка, 1989. – 148 с.

2. Данильченко Д. В. Торцевой удар по оболочке с криволинейной осью / Д. В. Данильченко, А. В. Засовенко, Ю. В. Мастиновский // Вестник двигателестроения. – Запорожье. – 2013. – № 1. – С. 46–49.

3. Луговой П. З. Динамика составных подкреплённых оболочечных конструкций при нестационарных нагрузках / П. З. Луговой, В. Ф. Мейш, Б. П. Рыбакин, Г. В. Секриеру // Прикл. механика. – 2006. – 42, № 4. – С. 100–107.

УДК 621.318.132:621.3.012.7

Килимник І.М.

канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ГАРМОНІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОПИСУ ГІСТЕРЕЗИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СТАЛЕЙ**

Розширення області застосування методів польових розрахунків для проектування електричних машин і силових трансформаторів ставить питання підвищення точності та спрощення алгоритмів побудови математичних моделей гістерезисних характеристик електротехнічних сталей.

Для опису характеристик електротехнічних сталей велике поширення отримала модель Джилса-Атертона. Деякі дослідники висловлюють думку, що ця модель дозволяє з високою точністю відобразити основну криву намагнічування. Проте точність моделі Джилса-Атертона залежить, насамперед, від точності визначення її коефіцієнтів. Це у свою чергу стає досить складною задачею і потребує розробки спеціальних підходів, у тому числі, розробки складних алгоритмів іноді для окремих характеристик електротехнічних сталей.

Крім того у програмному забезпеченні польового моделювання із статусом freeware, до якого мають вільний доступ викладачі і студенти закладів вищої освіти, як правило, відсутня можливість застосування моделі Джилса-Атертона у розрахунках електромагнітних полів в електричних машинах і трансформаторах. Тому актуальною стає задача уточненого опису гістерезисних характеристик на основі відомих методів і засобів гармонічного аналізу.

В задачах польового моделювання електричних машин і силових трансформаторів з урахуванням гістерезисних характеристик електротехнічної сталі можливі два способи їх визначення. В першому випадку ці характеристики визначаються як залежність індукції магнітного поля від його напруженості, а в іншому випадку як залежність напруженості магнітного поля від його індукції.

Для апробації обчислювальної ефективності відображення гістерезисних характеристик, які представлені моделлю Джилса-Атертона з відомими вже визначеними коефіцієнтами, здійснювалися розрахунки за обома параметричними підходами, де параметром був поточний час.

У першому випадку була задана часова крива індукції магнітного поля, яка визначалася основною гармонікою з частотою 50 Гц і за моделлю Джилса-Атертона розраховувалася часова крива напруженості для заданих моментів часу на протязі одного періоду змінного струму.

У другому випадку першою гармонікою змінного струму описувалася напруженість магнітного поля, а часова крива індукції магнітного поля розраховувалася за тією ж моделлю Джилса-Атертона (розраховувалася для тих самих моментів часу на протязі того ж самого періоду змінного струму).

Для розрахованих масивів даних при несинусоїдних кривих індукції або напруженості магнітного поля будувалися функції кубічної сплайн-інтерполяції, що дозволяло отримати часові функціональні залежності з неперервними другими часовими похідними.

Отримані часові функції сплайн інтерполяції розкладалися у гармонічні ряди Фур'є із складовими для непарних гармонік. Верифікація обох параметричних підходів здійснювалася засобами Comsol Multiphysics з подальшою нормалізацією розрахованих значень індукції і напруженості магнітного поля, які обмежувалися інтервалом  $[-1;1]$ .

Числова ефективність кожного із параметричних способів математичного опису гістерезисних характеристик намагнічування на основі гармонічних рядів оцінювалася по кількості гармонік, які були необхідні для зменшення відносної похибки розрахунків до 1%.

Для гістерезисних характеристик, представлених залежністю напруженості магнітного поля від його індукції в феромагнітному матеріалі, для зменшення відносної похибки до 1% достатньо було обмежитися 11-ю гармонікою. Тобто гармонійний ряд мав 5 непарних гармонійних складових.

У випадку залежності індукції від напруженості магнітного поля для зменшення похибки до 1% необхідно було використовувати 41 гармоніку, а отже кількість непарних гармонік збільшувалася до 21, що відповідало розмірності вектора значень часу.

Порівняння обох підходів дозволило зробити висновок, що застосування методів гармонічного аналізу для опису гістерезисних характеристик електротехнічних сталей, дозволяє зробити висновок, що у разі завдання вихідних синусоїдних напруг живлення в задачах моделювання індукторів або силових трансформаторів параметричний метод опису гістерезисної характеристики намагнічування забезпечує точність і числову ефективність, яка відповідає точності та ефективності метода Джилса-Атертона.

За таких умов параметричний підхід забезпечує істотне спрощення числової реалізації польових моделей індукторів і силових трансформаторів, дозволяє зменшити витрати часу і ресурсів, використовувати програмне забезпечення із статусом freeware як у навчальному процесі, у наукових дослідженнях і для вирішення складних інженерних задач на практиці

УДК 378.147:51

Сніжко Н.В.

канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## **ПРИНЦИПИ ДОСЯГНЕННЯ РОЗУМІННЯ ПРИ ВИКЛАДАННІ ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ**

Перехід до «інформаційного суспільства», що відбувається зараз, несе для освіти не тільки позитивні можливості, а й негативні тенденції, що мало враховуються. В епоху інтенсивного розвитку мережевого простору цілісність знання порушується, для людей все більш характерна фрагментарно-кліпова свідомість, вони перестають відчувати необхідність відтворення цілісної картини світу. Стиль мислення сьгоднішніх студентів за рахунок їх постійного спілкування з мас-медіа стає образно-емоційним і все менше тяжіє до абстрактних побудов, що йде врозріз зі звичним вербальним стилем викладу навчального матеріалу та зі сформованими методами засвоєння змісту освіти. Знання, які отримують від викладача, з підручника, перекриваються потоком хаотичної, несистематизованої інформації, що йде з Інтернету та ЗМІ. Тим часом інформація є лише фундаментом знання, інформація переробляється, упорядковується, зберігається і лише після цього перетворюється на знання. При використанні інформаційних технологій у навчанні часто відбувається заміна діалогу викладача та студентів на пасивне сприйняття студентами презентацій чи відеолекцій. Все це призводить до загострення проблеми розуміння, зниження мотивації та далеко неоднозначних результатів, які викликають певну тривогу за якість навчання математики.

Хоча проблема розуміння матеріалу, що вивчається, досить давно стоїть у педагогіці, загальноприйнятого визначення терміну «розуміння» досі не вироблено. Ми дотримуємося наступного визначення: розуміння – надання об'єкту сенсу через відображення істотних властивостей та зв'язків об'єкта. Відповідно до цього визначення розуміння може бути досягнуто шляхом реалізації наступних основних принципів [1].

Принцип *генералізації* знань означає, що треба починати з виявлення істотних властивостей об'єкта і організовувати матеріал навчання у порядку логічного розгортання відповідних понять у міру їх конкретизацій у систему математичної науки. Генералізація знань дозволяє з основних понять, як на

стрижнях, побудувати скелет математики. Використовуючи цей принцип, можна сформувати не лише окремі знання, а й усю їхню систему, розкрити внутрішні зв'язки та відносини фундаментальних понять, показати їх прояви на конкретних фактах та явищах дійсності. Практично це положення містилося ще у навчанні Я.А. Коменського, згідно з яким у навчанні, з самого його початку, в розум дитини повинні бути вкладені деякі фундаментальні, базові «кореневі та стовбурові» загальнонаукові основи.

Принцип *поетапності* формування знань. Відповідно до цього принципу, процес навчання слід розглядати як багаторівневу систему з обов'язковою опорою на нижчележачі, більш конкретні рівні наукового пізнання. Весь досвід навчання математики показує істотні переваги спіральної структури знань, коли матеріал розташовується у вигляді спіралі, що розгортається, причому кожен виток спіралі (цикл) утворює внутрішньо цілісну тему. Без опори на попередні рівні пізнання навчання може стати формальним, що дає знання без розуміння; має бути присутньою достатня пропедевтика провідних понять з урахуванням вікових особливостей учнів. Такі узагальнюючі поняття, як функція, величина, число можуть з'являтися у навчанні не як вихідні пункти, але як підсумки вивчення, підведені в міру накопичення фактів і закономірностей, що дають привід до відповідних узагальнень.

Принцип *взаємопов'язаності* знань передбачає розгляд сукупності стійких зв'язків, що забезпечують цілісність об'єкта, що вивчається. Те, чого навчають, повинно мати багато зв'язків – цього вимагав ще Я.А. Коменський. Як зазначає Г. Фройденталь, «здоровим принципом є вивчати не ізольовані крихти, а узгоджені розділи. Те, що взаємопов'язано, легше вивчається та легше утримується» [2]. Цей принцип лежить в основі відомої теорії внутрішньо- та міжпредметних зв'язків. Він передбачає встановлення зв'язків всередині об'єкта і поза ним, встановлення значущості цих зв'язків, побудову цілісності об'єкта, що вивчається. Причому встановлення властивостей та зв'язків студент має виконати самостійно на основі створених умов, найчастіше у діалозі з викладачем чи однокурсниками.

При навчанні із застосуванням інформаційних технологій необхідно особливу увагу приділити тому, щоб у студентів при вивченні математики виникла потреба розуміти. Тим часом у них такої потреби часто не виникає. Як зазначають багато вчених, розуміння виникає тоді, коли є активне навчання, є діалог. Справа в тому, що будь-який прояв розуміння пов'язаний з двома особистісними факторами – мисленням та мовою. Особливу увагу треба приділити діалогу, оскільки сприйняття нового матеріалу, його розуміння виникає виключно у процесі спілкування (діалогу). При цьому не виключається і спілкування із самим собою. Мислення нерозривне від мови, й у цьому суть діалогічності розуміння. Тому, щоб націлити навчання на розуміння, потрібна певна організація навчального матеріалу. Забезпечити таку

націленість зовсім не просто, оскільки при використанні мережевих технологій зазвичай порушується лінійність процесу накопичення знань, сам процес стає більш об'ємним та трудомістким, з'являються параметри глибини тощо.

При реалізації процесу навчання, розрахованого на розуміння, може виникнути низка проблем: певні обмеження дають програма навчання, регламентований час, заплановані результати навчання; потрібні інші засоби навчання, форми організації процесу навчання тощо. Навчання із застосуванням комп'ютерних технологій створює всі умови для вирішення цих проблем, проте потрібно правильно скористатися ними.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сніжко Н. В. Інформаційні технології та принципи досягнення розуміння при викладанні вищої математики [Електронний ресурс] / Н. В. Сніжко // International scientific conference «Information Technology And Management In Higher Education And Science»: conference proceedings (November 28, 2022, Fergana, the Republic of Uzbekistan). – Part 3. – Riga, Latvia : “Baltija Publishing”. – 2022. – P. 136–139.

2. Freudenthal H. Mathematics as an Educational Task / H. Freudenthal. – D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1973. – 692 p.

УДК 539.312

Фасоляк А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>канд. фіз.-мат. наук, старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## НЕСТАЦІОНАРНА ДИНАМІКА ПРУЖНОГО НАПІВСЕРЕДОВИЩА З ЦИЛІНДРИЧНОЮ ПОРОЖНИНОЮ, ЯКА ПІДКРІПЛЕНА ТОНКОЮ ОБОЛОНКОЮ, ПРИ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

В роботі розглянуто однорідне пружне напівсередовище, яке обмежено площиною, вздовж якої розташована пружна плита. Середовище містить циліндричну порожнину, яка підкріплена тонкою пружною оболонкою. Припускається, що вісь порожнини, та площина, яка обмежує напівсередовище – перпендикулярні. Контакт між плитою, оболонкою та напівсередовищем припускається жорстким, а зв'язок – двостороннім. В моменти часу  $t < 0$  – механічна система вільна від напружень. Розглядається випадок, у якому моменти часу  $t = 0$  на поверхні плити прикладається осесиметричне нормальне навантаження яке постійно діє на ділянці  $0 \leq r \leq d$ . Функція навантаження задається у вигляді:

$$f(r, t) = F_0 H(d - r) H(t), \quad (1)$$

де  $F_0$  – інтенсивність прикладеної сили,  $H(x)$  – одинична функція Хевісайда.

Для розв'язку використано метод скінчених елементів. В роботі [1] показано, що без суттєвої втрати точності можна звести розглянуту необмежену область до відповідної скінченної області. Область рівномірно дискретизується трикутниками та застосовується осесиметричний трикутний елемент з лінійною апроксимацією. Для розв'язку диференціального матричного рівняння, яке моделює динамічну задачу, використано  $\theta$ –метод Вільсона.

В роботі досліджено нестационарний динамічний напружено-деформований стан розглянутої механічної системи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фасоляк А. В. Динаміка пружного напівпростору з циліндричною порожниною, яка підкріплена оболонкою, при вісесиметричних навантаженнях / А. В. Фасоляк, В. І. Пожуєв // Технічна механіка. – 2017. – № 1. – С. 91–99.

UDC 621

Igor Zinenko

assistant NU “Zaporizhzhia Polytechnic”

### MATHEMATICAL MODEL OF A FLANGED H-PLANE HORN WITH DIELECTRIC SLAB IN APERTURE

An H-plane sectoral horn with the rectangular waveguide feed is studied using the generalized scattering matrix (S-matrix) method and domain-product technique (DPT). The structure incorporates dielectric slab flush with the flanged aperture. The excitation mechanism involves the dominant mode. Calculated radiation characteristics have been presented for several configurations. A flanged radiator is efficient means for radiation of microwave energy used in phased arrays and flush-mounted antennas. Dielectric loading is usually applied to protect such a structure from the environment and to improve impedance matching. Radiators of this type have been investigated in the past by many authors using different techniques. Typical configurations considered are open-ended waveguides covered with dielectric slabs [1,2] or regular semi-infinite waveguides loaded by plugs with a rectangular outline [3,4].

The radiator is shown in Fig.1. The relative permittivity of the slab is  $\epsilon$ . The modeled structure is uniform along the  $z$ -axis. It is excited by  $TE_{10}$  mode with the electric field component  $U=E_z$ . The problem is to find  $U$  satisfying the Helmholtz equation and appropriate boundary conditions.

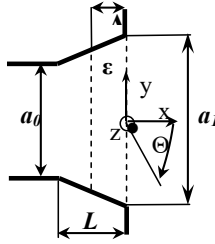


Figure 1 – Radiator

Using the method of the work [5], let us disjoin the structure into the autonomous multiangular blocks with homogeneous fillings. The decomposition scheme is presented in Fig.2. The blocks are shown separated by a finite distance  $d$ . The calculation formulas are obtained for  $d \rightarrow 0$ . It is assumed that the apertures of the blocks and opened waveguide have infinite planar flanges superposing for  $d=0$ .

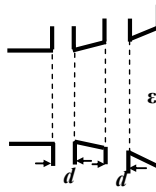


Figure 2 – Decomposition scheme

The block is formed by an interior region, bounded by a polygon, and attached half-planes. The total field in the half-plane consists of a possible incident wave, caused by the opposite building block, and waves propagating from the flanged aperture and obeying the radiation condition.

The scattering matrix of a separate block is determined as follows. Following the DPT, we represent  $U$  in the interior region as  $U = \sum u_j$ , with

$$u_j = \sum_{n=0}^{\infty} D_n^{(j)} \frac{Me_n^{(2)}(\xi_j, q_j)}{Me_n^{(2)}(0, q_j)} ce_n(\eta_j, q_j). \text{ Here, } (\xi_j, \eta_j) \text{ are local elliptic coordinates}$$

related to the  $j$ -th boundary segment,  $ce_n(\eta_j, q_j)$  are even angular Mathieu functions and  $Me_n^{(2)}(\xi_j, q_j)$  are relevant radial Mathieu functions. The known quantity  $q_j$  is expressed through the electrical length of the segment and parameters of the medium [5].

$\{D_n^{(j)}\}$  is a sequence of expansion coefficients. Half-planes, attached to the apertures, have separable geometry in elliptic coordinates and the sought-for function  $U_i$ , defined within the  $i$ -th half-plane, can be written in the form



$$U_i = \sum_{n=0}^{\infty} S_{np}^{ik} \frac{Me_n^{(2)}(\xi_i, q_i)}{Me_n^{(2)}(0, q_i)} ce_n(\eta_i, q_i) + \delta_{ik} (-1)^p \frac{Me_p^{(2)}(\xi_k, q_k)}{Me_p^{(2)}(0, q_k)} ce_p(\eta_k, q_k). \text{ Here, } S_{np}^{ik}$$

are elements of the scattering matrix, subject to definition. The second term represents an incident wave propagating from the opposite block. Next, using boundary conditions and orthogonal properties of the angular Mathieu functions, we get an infinite linear system with respect to  $\{D_n^{(j)}\}$  and  $\{S_{np}^{ik}\}$ . It is solved by means of a truncation procedure.

## REFERENCES

1. Wu C. P. Integral equation solutions for the radiation from a waveguide through a dielectric slab / C. P. Wu // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1969. – Vol. 17. – P. 733–739.
2. Tsalamengas J. L. Radiation properties of a flanged parallel-plate waveguide loaded with an  $\varepsilon$ - $\mu$  general anisotropic slab / J. L. Tsalamengas, N. K. Uzunoglu // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1990. – Vol. 38. – P. 369–379.
3. Wu C. P. Characteristics of coupling between parallel plate waveguides with and without dielectric plugs / C. P. Wu // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1970. – Vol. 18. – P. 188–194.
4. Gupta S. Analysis of an open-ended waveguide radiator with dielectric plug / S. Gupta, A. Bhattacharya, A. Chakraborty // IEE Proc.-Microw. Antennas Propag. – 1997. – Vol. 144. – P. 126–130.
5. Chumachenko V. P. Numerical analysis of complicated waveguide circuits on the basis of generalized scattering matrices and domain product technique / V. P. Chumachenko, V. P. Pyankov // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2000. – Vol. 48. – P. 305–308.

УДК 539.3

Антоненко Н.М.<sup>1</sup>, Шишкін І.Р.<sup>2</sup>, Дубінін Я.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Е-412а НУ «Запорізька політехніка»

## ОСЕСИМЕТРИЧНА СТАЦІОНАРНА ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ ДВОШАРОВОЇ ПЛИТИ З ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНОЮ НИЖНЬОЮ МЕЖЕЮ

Розглянемо двошарову плиту, що складається з двох шарів. Шари плити нумеруватимемо зверху донизу. В кожному шарі введемо локальну циліндричну систему координат  $O_i \rho z_i$ ,  $i = 1, 2$  з початком на верхніх межах шарів (рис. 1).

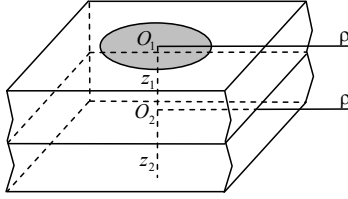


Рисунок 1 – Двошарова плита.

На верхній межі плити задано закон розподілу температури, а нижня межа теплоізолювана:

$$T_1(\rho, 0) = f(\rho), \quad \frac{\partial T}{\partial z}(\rho, h_2) = 0.$$

На межі шарів виконуються умови ідеального теплового контакту:

$$T_2(\rho, 0) = T_1(\rho, h_1), \quad k_{T2} \frac{\partial T_2}{\partial z}(\rho, 0) = k_{T1} \frac{\partial T_1}{\partial z}(\rho, h_1).$$

У просторі трансформант Ханкеля температуру в точках окремого шару можна подати у вигляді:

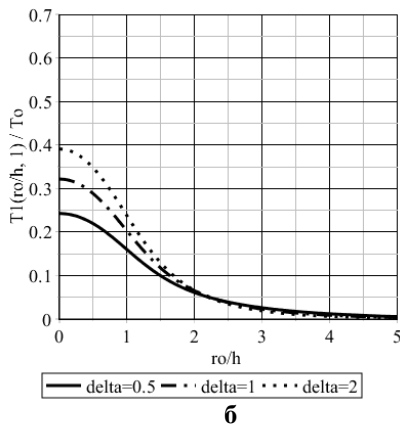
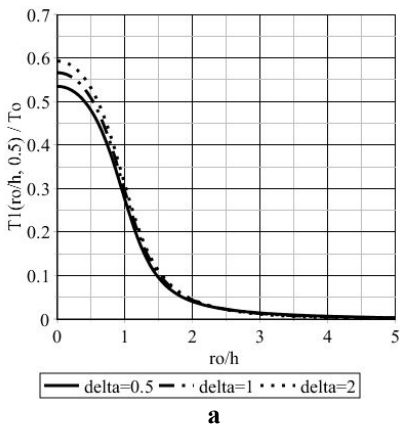
$$\bar{T}_i(\rho, z) = \text{ch } \rho z \eta_i + \text{sh } \rho z \varepsilon_i,$$

де  $\eta_i = \bar{T}_i(\rho, 0)$ ,  $\varepsilon_i = \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{T}_i}{dz}(\rho, 0)$  – допоміжні функції шару.

Записавши межові умови задачі та умови на стику шарів у просторі трансформант Ханкеля, отримаємо систему відносно  $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(\rho)$ ,  $\eta_2 = \eta_2(\rho)$ ,  $\varepsilon_2 = \varepsilon_2(\rho)$ . Знайдені з неї допоміжні функції підставляємо у вирази для трансформант температури та застосовуємо до них обернене перетворення Ханкеля.

Чисельні результати виконано для двошарової плити, що складається з шарів однакової товщини  $h_1 = h_2 = h$  при  $T(\rho, 0) = \begin{cases} T_0, & \rho \leq h, \\ 0, & \rho > h. \end{cases}$  На рис. 2 наве-

дено графіки, які ілюструють вплив коефіцієнтів теплопровідності шарів на розподіл температури на глибині  $h/2$  в точках верхнього шару плити (рис. 2а) та в точках спільної межі шарів (рис. 2б).



а – середина верхнього шару; б – нижня межа верхнього шару.  
 Рисунок 2 – Розподіли температури в точках  
 верхнього шару двошарової плити.

УДК 372.851

Антоненко Н.М.<sup>1</sup>, Кірюніна А.Є.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup> студ. гр. Е-612 НУ «Запорізька політехніка»

### ПРО ДЕЯКІ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ ФУНКЦІЙ В ОЛІМПІАДНИХ ЗАДАЧАХ

Розглянемо задачу. На дошці записано деяке число  $x$ . Олена праворуч від  $x$  записує число  $\frac{x-5}{x+3}$ , потім витирає число  $x$ . Після цього вона робить таку саму операцію з утвореним числом і так далі. Яке число буде написано на дошці після 2023 таких операцій, якщо  $x = 9$ ? Відповідь обґрунтуйте.

Розв'язання. Нехай на дошці написано число  $x$ . Після першої операції

на дошці буде написано  $\frac{x-5}{x+3}$ , після другої –  $\frac{\frac{x-5}{x+3}-5}{\frac{x-5}{x+3}+3} = -\frac{x+5}{x+1}$ , після третьої –  $-\frac{3x+5}{x-1}$ , після четвертої –  $x$  і т.д. Маємо ланцюжок:

$x \xrightarrow{1} \frac{x-5}{x+3} \xrightarrow{2} \frac{x+5}{x+1} \xrightarrow{3} \frac{3x+5}{x-1} \xrightarrow{4} x \rightarrow \dots$ , у якому числа циклічно повторюються через кожні чотири операції. Оскільки  $2023 = 4 \cdot 505 + 3$ , то після 2023 операцій ми одержимо число, яке отримано після третьої операції, тобто  $-\frac{3x+5}{x-1}$ . Якщо  $x = 9$ , то після 2023 операцій на дошці буде записано  $-\frac{3 \cdot 9 + 5}{9 - 1} = -4$ .

Постає питання: у чому особливість функції  $\frac{x-5}{x+3}$ ? Ця функція є циклічною функцією четвертого порядку. За означенням функція  $\varphi(x)$  називається циклічною функцією  $n$ -го порядку, якщо  $n$  – найменше натуральне число, для якого справджується тотожність  $\varphi(\varphi(\dots\varphi(x)\dots)) \equiv x$ , в лівій частині якої функція  $\varphi(x)$  фігурує  $n$  разів. У роботі [1] отримано умови, яким мають задовольняти коефіцієнти  $a, b, c, d$ , щоб функція  $\varphi(x) = \frac{ax+b}{cx+d}$  була циклічною першого-п'ятого порядків. Використовуючи ідею циклічності функцій, можна скласти серію задач подібних до розглянутої.

Іншим застосуванням циклічних функцій є їх використання при побудові деяких типів функціональних рівнянь. Якщо в ролі аргументу одного або кількох доданків рівняння виступає циклічна функція, то метод розв'язання також ґрунтуватиметься на підборі вдалої циклічної підстановки. Розглянемо, наприклад, функціональне рівняння  $2f\left(\frac{x-1}{x}\right) + f\left(-\frac{1}{x-1}\right) = 9x$ ,  $x \in R \setminus \{0; 1\}$ . Замінивши в заданому рівнянні  $x$  на  $\frac{x-1}{x}$ , а в отриманому рівнянні знову  $x$  на  $\frac{x-1}{x}$ , отримаємо систему:

$$\begin{cases} 2f\left(\frac{x-1}{x}\right) + f\left(-\frac{1}{x-1}\right) = 9x, \\ 2f\left(-\frac{1}{x-1}\right) + f(x) = \frac{9(x-1)}{x}, \\ 2f(x) + f\left(\frac{x-1}{x}\right) = -\frac{9}{x-1}. \end{cases}$$

Розв'язком системи є функція  $f(x) = -\frac{2x^3 - 3x^2 + 6x - 1}{x(x-1)}$ ,  $x \in \mathbb{R} \setminus \{0;1\}$ .

Доцільність зробленої підстановки базується на тому, що функція  $\varphi(x) = \frac{x-1}{x}$  є циклічною функцією третього порядку, тобто  $\varphi(\varphi(\varphi(x))) \equiv x$ , зокрема  $\varphi(\varphi(x)) = -\frac{1}{x-1}$ .

Якщо в якості аргументу буде виступати циклічна функція  $n$ -го порядку, то розв'язання функціонального рівняння зведеться до розв'язання системи  $n$  рівнянь.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Федак І. В. Функціональні рівняння : навч. посібник / І. В. Федак. – Івано-Франківськ : ПНУ, 2018. – 144 с.

Наукове електронне видання  
Можна використовувати в локальному та  
мережному режимах

**ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2023**  
**Машинобудівний факультет**

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM);  
супровідна документація.  
Тираж 100 прим. Зам. № 345

Видавець і виготовлювач  
Національний університет «Запорізька політехніка»  
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64  
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.