

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2026

Машинобудівний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців,
молодих учених і аспірантів
13–17 квітня 2026 року

Електронне видання на DVD-ROM

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2026

УДК 621(06)
Т39

*Рекомендовано до видання Вченою радою
Національного університету «Запорізька політехніка»
(Протокол № 13 від 26.06.2026 р.)*

Рецензенти: *Пожуєв А.В.*, канд. фіз. – мат. наук, професор каф. фундаментальної та прикладної математики ЗНУ;

Полянський П.М., канд. економ. наук, доцент, в.о. зав. каф. загально технічних дисциплін МНАУ.

Упорядник: *Ірина ПОЖУЄВА*, канд. техн. наук, доцент.

Редакційна колегія:

Вадим ШАЛОМЄЄВ, проректор з НР, д-р техн. наук, професор, (відпов. ред.) ;

Олексій КУЗЬКІН, д-р техн. наук, професор;

Василь ГЛУШКО, канд. техн. наук, доцент;

Євген ПАРАХНЄВИЧ, канд. техн. наук, доцент;

Микола АНТОНОВ, канд. техн. наук, доцент;

Ольга БАБЕНКО, канд. техн. наук, доцент;

Наталія ФУРМАНОВА, канд. техн. наук, доцент;

Марія ТЯГУНОВА, канд. техн. наук, доцент;

Тетяна ХІТРОВА, канд. філолог. наук, професор;

Світлана КОКАРЕВА, канд. наук з фіз. вих. і спорту, доцент;

Олена ВАСИЛЬЄВА, д-р економ. наук, професор;

Юрій ФІЛЕЙ, канд. юр. наук, професор;

Таїсія ГАЙВОРОНСЬКА, канд. філос. наук, доцент;

Наталя ВИСОЦЬКА, начальник ПІВ НДЧ;

Наталія САВЧУК, начальник РВВ;

Сніжана ВИЧУЖАНІНА, керівник ВНРС;

Ганна ОМОК, канд. пед. наук, доцент.

Т39

Тиждень науки-2026. Машинобудівний факультет: тези доповідей науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 13–17 квітня 2026 р.) [Електронне видання] / редкол. : Вадим ШАЛОМЄЄВ (відп. ред.). Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2026. 90 с. 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM).

ISBN 978-617-529-546-5

Зібрані тези доповідей, заслуханих на щорічній науково-практичній конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів. Збірка відображає широкий спектр тематики наукових досліджень, що проводяться на факультеті бізнес-технологій та економіки Національного університету «Запорізька політехніка». Збірка розрахована на широкий загал дослідників та науковців

УДК 621(06)

ISBN 978-617-529-546-5

© Національний університет
«Запорізька політехніка»
(НУ «Запорізька політехніка»), 2026

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ»

Є.В. Вишнєпольський

Застосування адитивних технологій та методів постобробки у виробництві деталей для двигунів з керованим ресурсом..... 7

Г.В. Пухальська, С.В. Пазюк

Адитивні технології в архітектурі та містобудуванні..... 8

С.І. Дядя, О.О. Крамаренко

Про роль фрагментів осцилограми для оцінки процесу різання кінцевими фрезами 10

П.Р. Тришин, Д.Ю. Антипов

Вплив стружкоутворення на збудження регенеративних автоколивань при точінні *П.Р. Тришин, Д.Ю. Антипов*..... 11

Є.В. Вишнєпольський, А.А. Бондарєв

Формування підходів до підвищення довговічності теплонавантажених елементів газотурбінних двигунів на основі комбінованих покриттів 12

СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ»

С.О. Уланов, О.Я. Качан

Застосування методу скінченних елементів для визначення параметрів динамічного демпфера лопаток компресора..... 14

О. Prikhodko, О. Babenko

Application of machine learning methods for modeling the quality and stability of the turning process 16

Ye. Sbrodov, R. Yuzefovych, Yu. Torba

Software-algorithmic complex for cascade PNRP decomposition of vibration signals in multi-rotor aircraft gas-turbine engines..... 18

А.С. Шаповал, Д.В. Павленко

Розробка і вдосконалення параметричних моделей типових компонентів газотурбінних двигунів для виконання проектувальних розрахунків..... 20

В.О. Таран, О.А. Глотка

Цифровізація довідникових даних та автоматизація вибору жароміцних сплавів для вузлів авіаційних двигунів 22

R. Gvozdyk, О. Babenko

Advancing the operational flexibility of D-336 gas turbine units for ancillary services through adaptive air bleed control systems..... 24

Д.В. Ярмошенко, О.Я. Качан

Забезпечення міжремонтного ресурсу корпусних деталей та збиральних одиниць головних редукторів вертольотів типу МІ-8 26

С.В. Собченко, С.О. Уланов

Передумови комплексної діагностики стану покриттів, що припрацьовуються, та лопаток направляючого апарату компресора на основі аналізу експлуатаційних даних	28
--	----

СЕКЦІЯ «МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ ТА СИСТЕМИ»

В.С. Штанкевич, М.В. Фролов

Номенклатура показників якості поверхонь деталей спеціальної техніки	30
--	----

В.В. Солоха

Визначення показників стабільного різання в умовах регенеративних коливань	32
--	----

Д.В. Первеев

Огляд застосування полімерних добавок у мастильно- охолоджувальних технологічних засобах для процесів шліфування та точіння	34
---	----

М. Frolov, S. Tanchenko, S. Bazhanov

The phase factor as a predictor of the initial con-ditions for the high-speed end milling of thin-walled parts	36
--	----

С.В. Танченко, Б.Д. Рясенко

Інтегрована технологія побудови розгортки листових конструкцій з використанням топологічних і графових методів	38
--	----

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

В.В. Кононов

Умови експлуатації деталей гту	40
--------------------------------------	----

Р.О. Фролов, Л.М. Мартовицький, В.І. Глушко

Подовження ресурсу прогінних кранових балок	41
---	----

Д.С. Козак, Р.О. Фролов

Обґрунтування вибору геометрії та розмірів зразка для дослідження впливу параметрів FDM-друку	43
---	----

В.В. Кононов, Ф.К. Махінов

Надійність експлуатації деталей гту з використанням захисних покриттів ...	44
--	----

Р.О. Фролов, А.М. Овсов

Впровадження технологій штучного інтелекту в роботі інженера-конструктора	46
---	----

М.В. Сидоренко, Д.А. Серова, Є.О. Кравченко

Удосконалення алгоритмів керування мостовим краном вантажопідйомністю 180/2×70 Т	48
--	----

СЕКЦІЯ «ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ»

<i>А.Ю. Матюхін, О.В. Малкіна</i>	
Аналіз технології гарячого об'ємного штампування	50
<i>А.Ю. Матюхін, В.В. Бабічин</i>	
Виробництво прутків великого діаметру методами сортового прокатування	51
<i>А.Ю. Матюхін, В.В. Задорожний</i>	
Дослідження технології вільного кування на гідравлічних пресах	53
<i>А.Ю. Матюхін, В.В. Чабаненко</i>	
Аналіз недоліків існуючої технології прокатування злитків на слябінгу	54
<i>А.М. Бень, Д.Д. Арцибашева</i>	
Моделювання та симуляція процесів гарячого штампування.....	55
<i>А.М. Бень, Д.В. Ледєньов</i>	
Аналіз методів точного відкритого та закритого гарячого штампування.....	56
<i>О.В. Єпішкін, А.П. Прохоренко</i>	
Аналіз напружено-деформованого стану при холодному видавлюванні високоміцного кріплення.....	57

СЕКЦІЯ «МАТЕМАТИКА»

<i>В.М. Онуфрієнко, І.М. Килимник, Т.І. Слюсарова</i>	
Диферінтегральні рівняння неперервності Пуассона у фрактальних моделях $P-N$ переходів.....	59
<i>В.М. Онуфрієнко, Н.М. Антоненко, А.В. Фасоляк</i>	
Фрактальний приповехневий шар: узагальнення класичного простого і подвійного шарів типу Гельмгольца, Гуї-Чепмена та Штерна	61
<i>В.М. Онуфрієнко, А.В. Засовенко, Т.І. Слюсарова</i>	
Диферінтегральні стоко-джерельні характеристики у рівняннях Чепмена-Колмогорова	63
<i>Н.М. Антоненко</i>	
Про один підхід до розв'язання двовимірної задачі термопружності для двохшарової основи з гладким контактом між шарами	66
<i>Д.І. Анпілогов</i>	
Інноваційні підходи до викладання вищої математики в технічному університеті: потенціал моделі FLIPPED CLASSROOM.....	68
<i>Т.І. Левицька, І.С. Пожуєва</i>	
Розробка нечіткої моделі асортиментної політики підприємства	70
<i>З.М. Шаніна, А.В. Засовенко</i>	
Проектування поверхні зубчастого робочого органу для обробки ґрунту	73
<i>А.В. Фасоляк, А.М. Єршов</i>	
Оцінка пружних та міцнісних характеристик пористих матеріалів за допомогою методу скінченних елементів.....	75

<i>О.В. Коротунова, Д.Р. Анненкова</i>	
Косинусна міра в алгоритмах рекомендаційних систем.....	76
<i>О.В. Коротунова, І.І. Гусак</i>	
Крива Лаффера: математична модель податкового оптимуму	79
<i>О.В. Коротунова, П.Л. Луканюк</i>	
Моделювання пропускну́ї здатності кас самообслуговування у ритейлі.....	82
<i>Н.В. Сніжко, Б.Р. Сясін</i>	
Методика застосування елементів теорії поля до розв'язання задач електростатики	84
<i>Н.В. Сніжко, В.С. Сижко</i>	
Методика розв'язування задач теплопровідності з використанням градієнта температури	86
<i>В.М. Онуфрієнко, В.С. Козак</i>	
Реологічні рівняння стану для нелінійної в'язко-пружної поведінки фрактально конфігурованих матеріалів: моделі Вагнера, Леонова, Маруччі.	87

СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ»

УДК 621.74:621.9.048:621.438

Вишнепольський Є.В.¹

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МЕТОДІВ ПОСТОБРОБКИ У ВИРОБНИЦТВІ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ДВИГУНІВ З КЕРОВАНИМ РЕСУРСОМ

Сучасний розвиток машинобудування характеризується активним впровадженням адитивних технологій, які дозволяють суттєво розширити можливості проектування та виготовлення складних деталей. Особливу актуальність це набуває при створенні компонентів двигунів нового покоління, де важливими є не лише механічні характеристики, але й можливість прогнозованого керування ресурсом експлуатації.

Адитивне виробництво, зокрема технології селективного лазерного плавлення (SLM) та електронно-променевого плавлення (EBM), забезпечує отримання виробів складної геометрії, що практично неможливо реалізувати традиційними методами обробки. Це відкриває можливість оптимізації конструкцій за критеріями маси, міцності та теплових характеристик. Разом з тим, структура матеріалу, сформована під час пошарового синтезу, має специфічні особливості, які впливають на експлуатаційні властивості деталей.

Одним із ключових аспектів є забезпечення необхідної якості поверхні та внутрішньої структури виробів після адитивного формування. Для цього застосовуються різні методи постобробки, такі як термічна обробка, гаряче ізостатичне пресування (HIP), механічна обробка та хіміко-механічне полірування. Дані процеси дозволяють знизити рівень залишкових напружень, зменшити пористість та покращити мікроструктуру матеріалу.

Особливу увагу слід приділити формуванню контрольованих властивостей матеріалу, що безпосередньо пов'язано з концепцією двигунів з керованим ресурсом. Такий підхід передбачає можливість прогнозування терміну служби елементів і їхньої заміни до настання критичних пошкоджень. Адитивні технології дозволяють локально змінювати властивості матеріалу в межах однієї деталі, що може бути використано для створення зон із заданою зносостійкістю або міцністю.

Крім того, використання цифрових моделей і симуляційних методів дає змогу ще на етапі проектування враховувати умови експлуатації та оптимізувати структуру деталі. Інтеграція адитивного виробництва з сучасними CAD/CAM/CAE системами забезпечує скорочення циклу розробки та підвищення точності виготовлення.

Важливим питанням залишається стандартизація процесів адитивного виробництва та постобробки. Наявність стабільних технологічних режимів є необхідною умовою для впровадження таких деталей у серійне виробництво двигунів. Також актуальною є проблема контролю якості, зокрема застосування неруйнівних методів контролю для виявлення внутрішніх дефектів.

Таким чином, поєднання адитивних технологій із сучасними методами постобробки створює передумови для виготовлення деталей із заданими експлуатаційними характеристиками. Це, у свою чергу, дозволяє реалізувати концепцію двигунів з керованим ресурсом, що є перспективним напрямом розвитку машинобудування.

У подальших дослідженнях доцільно зосередити увагу на оптимізації параметрів адитивного процесу, вдосконаленні методів постобробки та розробці підходів до прогнозування ресурсу деталей з урахуванням їхньої мікроструктури.

УДК 62-9

Пухальська Г.В.¹, Пазюк С.В.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-112 НУ «Запорізька політехніка»

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ В АРХІТЕКТУРІ ТА МІСТОБУДУВАННІ

У сучасному світі будівельна галузь переживає масштабну трансформацію завдяки впровадженню інноваційних методів виробництва, серед яких одним із найперспективніших є використання адитивних технологій, більш відомих як 3D-друк. Якщо раніше ці технології використовувалися переважно для створення невеликих макетів та прототипів, то сьогодні вони дозволяють зводити повноцінні житлові будинки, мости та елементи міської інфраструктури. В архітектурі адитивне виробництво базується на пошаровому екструдюванні будівельних сумішей - найчастіше спеціального бетону, геополімерів або переробленого пластику. Спеціальні великогабаритні 3D-принтери, такі як порталні системи або роботизовані маніпулятори, здатні «друкувати» стіни та несучі конструкції будинку безпосередньо на будівельному майданчику всього за кілька днів. Відомі компанії, такі як ICON або Apis Cor, вже успішно реалізували проекти друкованих будинків у США, Європі та на Близькому Сході. Важливою перевагою є те, що традиційне будівництво обмежує архітекторів прямими кутами та стандартними формами через складність створення опалубки, тоді як 3D-друк знімає ці обмеження, дозволяючи зводити будівлі з

криволінійними, біонічними та аеродинамічними фасадами без додаткових витрат.

У сфері містобудування, яка вимагає швидких, екологічних та стандартизованих рішень, 3D-друк також відкриває нові можливості. Зокрема, міські меблі та малі архітектурні форми, такі як лавки, зупинки громадського транспорту, урни та вуличні ліхтарі, все частіше друкують із переробленого пластику або бетону, що дозволяє швидко та економічно оновлювати міське середовище. Крім того, технологія активно застосовується для створення інфраструктурних об'єктів. Яскравими прикладами є перший у світі надрукований на 3D-принтері сталевий пішохідний міст від компанії MX3D в Амстердамі та бетонні велосипедні мости в Нідерландах. Урбаністичне планування також виграє від адитивних технологій, оскільки вони дозволяють швидко створювати точні 3D-макети цілих районів для візуалізації проєктів забудови, оцінки інсоляції, вітрових навантажень та логістики перед початком реального будівництва.

Впровадження цієї технології має низку беззаперечних переваг. Передусім, це екологічність та безвідходність: адитивні технології використовують рівно стільки матеріалу, скільки потрібно для об'єкта, що зводить кількість будівельного сміття майже до нуля. Також вражає швидкість процесу, адже зведення стін базового житлового будинку площею 50-100 квадратних метрів може займати від 24 до 48 годин чистого часу роботи принтера. Окрім цього, процес є максимально автоматизованим, що суттєво знижує потребу у великій кількості робітників на майданчику та підвищує загальну безпеку праці.

На сьогодні 3D-друк стає на 20–30% дешевшим за традиційне будівництво лише при зведенні об'єктів зі складною геометрією. Для типових "коробок" ціна поки що приблизно однакова через високу вартість амортизації принтерів та спеціальних сумішей. Найбільш рентабельним зараз вважається гібридний підхід: фундамент та перекриття роблять традиційним способом; вертикальні стіни зі складними внутрішніми каналами для ізоляції та інженерії друкуються. У масштабах містобудування це дозволяє реалізувати концепцію "Just-in-Time Construction" - коли елементи міської інфраструктури (містки, дренажні системи, зупинки) друкуються за потреби безпосередньо в районі забудови, що мінімізує транспортне навантаження на місто та вуглецевий слід.

Незважаючи на стрімкий розвиток та очевидні переваги, масове впровадження 3D-друку в будівництві стикається з низкою викликів. Головною перешкодою є відсутність єдиної нормативно-правової бази та державних будівельних норм для сертифікації та введення в експлуатацію надрукованих будівель. Також існують певні технологічні обмеження: процеси армування стін і прокладання комунікацій здебільшого все ще

потребують ручної праці, а висотне будівництво за допомогою 3D-друку поки що перебуває лише на стадії експериментів. Проте, незважаючи на ці труднощі, адитивні технології в архітектурі та містобудуванні - це не просто тимчасовий тренд, а реальний інструмент для вирішення глобальних проблем, від забезпечення доступним житлом до створення екологічної міської інфраструктури. З розвитком нових матеріалів та вдосконаленням законодавства у найближче десятиліття 3D-друк має всі шанси стати однією з базових та невід'ємних технологій у світовому будівництві.

УДК 621.9

Дядя С.І.¹, Крамаренко О.О.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-114сп НУ «Запорізька політехніка»

ПРО РОЛЬ ФРАГМЕНТІВ ОСЦИЛОГРАМИ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ

Забезпечення точності виготовлення складнопрофільних деталей на фрезерних верстатах з ЧПУ, на які припадає обробка більшості поверхонь, є актуальним завданням технологів авіабудівних підприємств. Для його вирішення необхідно знати, які причини призводять до похибок розмірів, форми, низької шорсткості. Серед них основними є систематичні та випадкові. До систематичних похибок відносять геометричні похибки верстата, пружні відтискання при різанні, теплові деформації та знос інструменту. Їх можна прорахувати до початку обробки та призначити заходи, що зменшать або усунуть їх дію. Складніша ситуація при визначенні випадкових похибок, які пов'язані з вібраціями при різанні і які важко передбачити. Щоб навчитися розуміти їх дію і своєчасно попереджувати негативний вплив використовують різноманітні датчики, серед яких найбільш поширені проксиметри та акселерометри. За їх допомогою записують осцилограми коливань деталі та інструменту. Вони є інформативним джерелом про те, що відбувається при різанні. Для кінцевого фрезування характерним є формування обробленої поверхні зі статків поверхні різання після переміщення деталі на величину подачі на зубець. За змінами форми поверхні різання можливо визначати, якою буде оброблена поверхня. Але поверхні різання зрізаються кожним зубом фрези, не залишаючи підстав для їх аналізу. Записана осцилограма, якщо її розділити на окремі фрагменти при різанні, як швидкісна камера, фіксує форму зрізаного поверхні різання, яка співпадає з рухом деталі при фрезуванні. Розмірність записаного сигналу через цифровізацію може бути переведена у лінійний розмір. Тоді за записаними фрагментами осцилограм при різанні можна

визначити довжину поверхні різання та глибину статків від неї, що утворюють оброблену поверхню.

Найбільш корисними є фрагменти осцилограм, що записані при фрезуванні з регенеративними коливаннями, бо саме хвилястість з поверхні різання, як спадковість, передається на оброблену поверхню. Взаємозв'язок між фрагментом осцилограми при різанні та обробленою поверхнею дозволяє кількісно оцінювати вплив режимів різання на коливання деталі і таким чином дозволяє передбачувати негативну дію випадкових похибок.

УДК 621.924

Тришин П.Р.¹, Антипов Д.Ю.²

¹ PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-113сп НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ НА ЗБУДЖЕННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ АВТОКОЛИВАНЬ ПРИ ТОЧІННІ

Процес різання є складною динамічною системою, у якій характер стружкоутворення суттєво впливає на стійкість інструмента, якість обробленої поверхні та рівень вібрацій. Залежно від фізико-механічних властивостей матеріалу та умов обробки формуються різні типи стружки: зливна, сегментна та стружка надлому. Кожен із цих типів по-різному взаємодіє з динамікою процесу різання, змінюючи силові характеристики та умови виникнення автоколивань. Тому дослідження впливу механізму стружкоутворення на динаміку процесу точіння є актуальною науково-практичною задачею.

Найбільш небезпечним видом динамічної нестійкості при точінні є регенеративні автоколивання, які призводять до значного погіршення якості обробленої поверхні, зниження стійкості різального інструмента та зростання динамічних навантажень на елементи технологічної системи. Їх виникнення зумовлене ефектом різання по вібраційному хвилястому сліду, коли хвиля, сформовані на попередньому обороті деталі, впливає на зміну товщини зрізуваного шару на поточному обороті деталі. У науковій літературі переважна більшість дослідників розглядає саме регенеративні автоколивання як основний механізм виникнення вібрацій при точінні, оскільки вони можуть самозбуджуватися навіть за відсутності зовнішніх збурень і визначають межі стійкості процесу різання.

У наукових роботах, присвячених динаміці процесу різання, встановлено, що характер стружкоутворення може впливати на як на збудження, так і на гасіння регенеративних автоколивань. Така неоднозначність в наявних дослідженнях, потребує уточнення із

застосуванням нової методики дослідження автоколивань за рахунок використання різця-осцилятора з одним ступенем свободи в напрямку зміни миттєвої товщини різізу.

Експериментальні дослідження проводилися при повздовжному безперервному точінні в умовах ортогонального невільного різання, що дозволило оцінити вплив типу стружкоутворення на динамічну поведінку системи при точінні різних матеріалів (сталь 45, чавун СЧ35, титановий сплав ВТ22). Обробку різних матеріалів проводили на однакових режимах різання: $v=100$ м/хв; $S=0,2$ мм/об; $t=1$ мм. При точінні використовували змащувально-охолоджувальне технологічне середовище. Площадку зносу на задній поверхні контролювали в діапазоні $0,1 \dots 0,2$ мм.

В результаті проведених досліджень встановлено, що для пластичних матеріалів, таких як сталь 45, характерне утворення зливної стружки, що сприяє розвитку стійких регенеративних автоколивань через безперервність процесу різання. У випадку обробки чавуну СЧ35 формується стружка надломлю, яка характеризується переривчастістю процесу різання та, як правило, суттєво знижує інтенсивність регенеративних автоколивань. Титанові сплави, зокрема ВТ22, утворюють сегментну стружку, яка поєднує ознаки безперервного та переривчастого процесів і може повністю демпфувати регенеративні автоколивання.

Процес стружкоутворення в динамічній схемі процесу різання виступає у ролі регулятора, який по прямому зв'язку може як розгойдувати осцилятор (деталь або заготовка), так і демпфувати його коливання. Демпфування коливань осцилятора по прямому зв'язку не дозволяє йому підтримувати автоколивальний процес по зворотному зв'язку, що руйнує автоколивальний процес, при цьому спостерігаються у випадкові коливання низької інтенсивності.

УДК 621.438:620.193/199:621.793.7

Вишнепольський Є.В.¹, Бондарев А.А.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² асп. гр. А-131.14 НУ «Запорізька політехніка»

ФОРМУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕПЛОАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ КОМБІНОВАНИХ ПОКРИТТІВ

У сучасному машинобудуванні спостерігається зростання вимог до надійності та ресурсу роботи відповідальних елементів газотурбінних двигунів. Особливо це стосується деталей гарячої частини, які працюють в умовах високих температур, значних швидкостей газового потоку та

агресивного середовища. У таких умовах класичні матеріали, навіть жароміцні сплави, не забезпечують необхідної тривалості експлуатації без додаткових технологічних рішень.

Аналіз умов роботи теплонавантажених деталей показує, що їх руйнування має комплексний характер. Вплив ерозійних процесів, високотемпературної корозії та циклічних термомеханічних навантажень призводить до поступового накопичення пошкоджень. Важливою особливістю є взаємне підсилення цих факторів, що ускладнює прогнозування ресурсу та вимагає системного підходу до захисту поверхні.

Одним із напрямів підвищення довговічності є використання функціональних покриттів, які дозволяють локально змінювати властивості поверхні без зміни базового матеріалу. При цьому застосування лише одного типу покриття не завжди забезпечує необхідний результат, оскільки між вимогами до теплозахисту та зносостійкості виникає суперечність. Пористі структури ефективні для зниження теплового потоку, але є вразливими до ерозійного впливу, тоді як щільні покриття краще протидіють механічному зношуванню, проте гірше виконують теплоізоляційну функцію.

Важливу роль у забезпеченні експлуатаційних характеристик відіграє не лише склад покриття, але й технологія його нанесення. Саме технологічні параметри визначають щільність структури, рівень пористості, адгезійну міцність та напружений стан у системі «покриття–основа». Це, у свою чергу, впливає на опір розвитку тріщин та загальну стійкість до руйнування.

Порівняння сучасних методів нанесення покриттів показує, що високошвидкісні енергетичні процеси мають суттєві переваги з точки зору формування структур із підвищеною щільністю та покращеними механічними характеристиками. Особливий інтерес становлять технології, які забезпечують формування сприятливого напруженого стану, здатного компенсувати експлуатаційні навантаження.

З урахуванням складної геометрії багатьох деталей газотурбінних двигунів виникають додаткові технологічні обмеження, пов'язані з рівномірністю нанесення покриття та доступністю окремих зон. Це потребує використання спеціалізованих підходів до організації процесу нанесення та контролю якості.

Таким чином, підвищення ресурсу теплонавантажених елементів є багатофакторною задачею, що включає вибір матеріалів, розробку структури покриття та оптимізацію технології його нанесення. Подальше дослідження в цьому напрямі має бути спрямоване на визначення оптимального поєднання матеріалів і технологічних параметрів, що забезпечують необхідний баланс між теплозахисними та зносостійкими властивостями.

СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ»

УДК 621.438

Уланов С.О.¹, Качан О.Я.²

¹ PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² д.т.н., проф. НУ «Запорізька політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОГО ДЕМПФЕРА ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА

Застосування демпфірування є одним із найперспективніших напрямків для зниження амплітуди деформацій та вібрацій під час механічної обробки деталей.

Ефективність демпфірування безпосередньо залежить від правильно розрахованих параметрів демпфера.

Метою роботи є визначення параметрів динамічного демпфера для зниження амплітуди коливань лопатки газотурбінного двигуна (ГТД) у процесі її фрезерування.

Розрахунки параметрів динамічного демпфера базуються на загальних закономірностях теорії вимушених коливань із демпфіруванням та методі скінчених елементів (МСЕ).

Модель процесу враховує масу лопатки (m_1), масу вантажу демпфера (m_2), їхні жорсткості (K_1 , K_2) та періодичну збудовуючу силу від фрези $P_i \cos \omega t$.

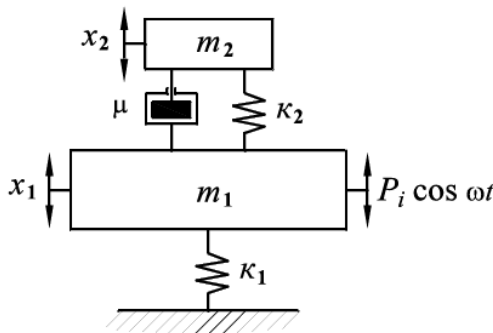


Рисунок 1 – Модель демпфірування коливань лопатки при її фрезеруванні.

Визначення сил та частот різання: рівнодіюча сила різання (P_i) та частота збурюючої сили (f) розраховуються на основі швидкості різання, подачі, кількості зубів фрези та експериментальних коефіцієнтів для титанових сплавів.

Кінцево-елементний аналіз (МСЕ): для розрахунку використовувалась твердотільна модель широкохордної робочої лопатки вентилятора двигуна Д436-148ФМ у програмному комплексі ANSYS

Матеріал лопатки – титановий сплав BT6, елемент сітки – Solid 186.

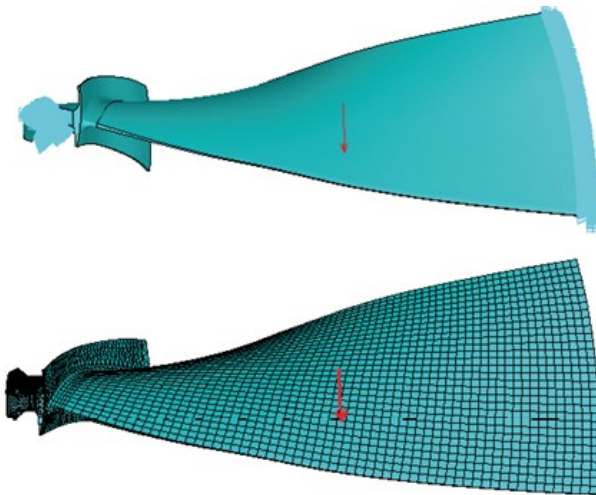


Рисунок 2 – Граничні умови: у вигляді закріплення та точки прикладання сили.

Статичний аналіз: Під дією сили $P_i = 40$ Н, прикладеної до спинки пера, максимальна статична деформація лопатки $\lambda_{ст}$ склала 0,026 мм.

Модальний аналіз: визначено перші три форми та частоти власних коливань лопатки.

Встановлено, що форми коливань практично не залежать від наявності прикладеної сили на спинку пера, а частота за першою формою з урахуванням сили становить 323,67 Гц.

Розрахунок параметрів демпфера: На основі знайденої власної частоти та статичної деформації визначаються маса демпфера (m_2) та коефіцієнт жорсткості пружини (K_2).

Для знаходження амплітуди коливань та маси використовується побудована графічна залежність відносних амплітуд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Березовский Е.К., Уланов С.А. Определение параметров динамического демпфера при фрезеровании лопаток ГТД. *Вестник двигателестроения*. 2017. № 2. С. 143–148.

2. Уланов С.О., Качан О.Я., Шаломєєв В.В., Шаломєєв А.В. Вплив умов деформування на поверхню пера лопаток компресора ГТД з титанових сплавів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2024. С. 113–114.

УДК 621.941:004.85

Prikhodko O.¹, Babenko O.²

¹ PhD, assistant professor of Lutsk National Technical University

² PhD, assistant professor of NU «Zaporizhzhia Polytechnic»

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR MODELING THE QUALITY AND STABILITY OF THE TURNING PROCESS

The reliability of aircraft engine components directly depends on the quality of their surfaces, which is determined during the machining stages. The application of modern machine learning (ML) methods complements time-tested traditional approaches by providing tools for finer tuning of cutting parameters and finding the optimal balance between quality and productivity. However, an analysis of scientific works [1–3] shows that most studies focus on predicting only the average roughness value, whereas for critical parts, process stability and repeatability are no less important.

The aim of this work is to develop a methodology that allows for the simultaneous modeling of two criteria: average roughness and process stability, characterized by the spread of roughness values. The study is based on the open dataset of the MaRoReS project [4], which contains the results of 68 experiments on the turning of high-strength 42CrMo4+QT steel. Two approaches were compared: an empirical power-law model based on linear regression and a Random Forest machine learning model.

As a result of the regression analysis, the following empirical formula was obtained for predicting the average surface roughness Ra :

$$Ra = 24.824 \cdot r^{-0.456} \cdot d^{-0.1811} \cdot v^{-0.5643} \cdot f^{0.7435}, \quad (1)$$

where r - tool nose radius; d - cutting depth; v - cutting speed; f - feed rate.

The machine learning model demonstrated better prediction accuracy ($R^2 = 0.590$ versus 0.531 for regression) and revealed the dominant influence of feed rate on average roughness, while cutting depth had a minimal effect.

Additionally, a model was developed to assess process stability, which allowed for the identification of unstable operating conditions. It was found that the process becomes unstable at low cutting speeds ($v < 95$ m/min) and extreme feed rates. It was also found that a larger tip radius $r = 0.8$ mm (versus 0.4 mm) reduces roughness variability by more than 60%.

The robustness of the proposed ML approach was further verified on an independent dataset [5]. Testing confirmed that the “RandomForest” model is capable of identifying useful patterns ($R^2 \approx 0.5$) even under conditions where classical regression models prove practically ineffective ($R^2 < 0.1$).

Conclusions. A methodology for predicting the quality and stability parameters of turning operations based on the “Random Forest” algorithm has been developed and validated. The superiority of machine learning models over classical regression methods in terms of prediction accuracy and the ability to identify hidden process patterns has been demonstrated. Factor analysis showed that feed rate is the main parameter determining surface roughness, while process stability depends primarily on cutting speed and tool geometry, particularly the radius of its tip.

REFERENCES

1. Sharma H., Sahay A., Kumari S., Dutt A.K. Prediction of surface roughness for CNC turning of AISI 1030 steel: A machine learning approach. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2021. Vol. 63, No. 1–2. P. 33–40. <https://jmms.nmlindia.org/wp-content/uploads/2023/01/JMMS-vol-63-issue-1-2-paper-04.pdf>
2. Samin R., Luqman N., Ismail M., Sulaiman M. Optimization of surface roughness in turning using statistical analysis and machine learning. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. 2025. Vol.17, No. 1. P. 70–84. DOI: 10.54684/ijmmt.2025.17.1.70
3. Reddy B. S., Padmanabhan G., Reddy K.V.K. Surface roughness prediction techniques for CNC turning. *Asian Journal of Scientific Research*. 2008. Vol.1, № 3. P. 256–264. DOI: 10.3923/ajsr.2008.256.264
4. Díaz-Salamanca D., Álvarez Á., Muñiz Calvente M. Machining, Roughness and Residual Stresses generated in turning of 42CrMo4+QT steel [Электронный ресурс] Mendeley Data. DOI: 10.17632/z9w23xvhbt.1 (11 Apr 2024).
5. Doniavi A., Eskandarzade M., Tahmasebian M. Empirical Modeling of Surface Roughness in Turning Process of 1060 Steel Using Factorial Design Methodology. *Journal of Applied Sciences*. 2007. Vol. 7, No. 17. P. 2509–2513. DOI: 10.3923/jas.2007.2509.2513

УДК 621.45.036

Sbrodov Ye.¹, Yuzefovych R.², Torba Yu.³

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² проф. Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України

³ доц. НУ «Запорізька політехніка»

**SOFTWARE-ALGORITHMIC COMPLEX FOR CASCADE PNRP
DECOMPOSITION OF VIBRATION SIGNALS IN MULTI-ROTOR
AIRCRAFT GAS-TURBINE ENGINES**

The vibration condition of the aviation gas-turbine engines (AGTEs) is formed under the influence of a superposition of many complex oscillatory processes. A key problem in the vibration diagnostics of multi-rotor systems is requirement to accurate separation of deterministic rotor harmonics and the stochastic component of vibrations under non-stationary operating conditions. An adequate mathematical model for describing such vibrations is the theory of periodically non-stationary random processes (PNRP), the fundamentals of which was developed by scientists of the Karpenko Physico-mechanical Institute of the NAS of Ukraine [1, 2].

The practical application of classical PNRP analysis methods is complex because of its algorithmic parameterization [3]. The purpose of this work is to create a specialized software tool, PNRP Analyzer, which integrates PNRP models into a user-friendly computational environment. The scientific novelty of the development consists in improving the polyharmonic least squares method by introducing an algorithm for adaptive parameterization and step by step separation of harmonics. Unlike existing solutions, the developed approach allows to:

- automatically synchronize the base frequency of the PNRP model with the data of the primary impulse tachometer;
- dynamically calculate the maximum allowable number of harmonics based on the Nyquist-Shannon theorem to eliminate the effect of spectral aliasing;
- step by step extract regular components from several kinematically uncoupled rotors (cascade method) with subsequent analysis of the “cleaned” stochastic noise.

The generalized structural scheme of the developed cascade decomposition algorithm is presented in Figure 1.

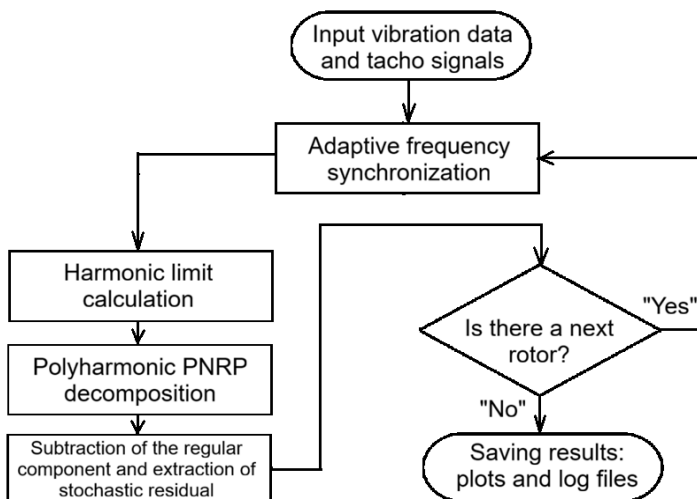


Figure 1 – Flowchart of the adaptive cascade PNRP decomposition algorithm for multi-rotor systems.

The implemented software complex automates knowledge-intensive processes of vibration signal processing. Translating complex theoretical decomposition algorithms into a cascade analysis format provides engineers with the ability to detect hidden structural nonlinearities of AGTE systems at the early stages of defect initiation.

REFERENCES

1. Javorskyj I.M. Mathematical models and analysis of stochastic oscillations. Lviv: Physical and Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2013.
2. Javorskyj I., Torba Yu., Yuzefovych R., Sbrodov Ye., Lychak O. Periodically Non-Stationary Properties of Vibrations in a Gas Turbine Engine with an Unbalanced Rotor. *Science and Innovation*. 2025. Vol. 21, no. 6. P. 38-48. doi: 10.15407/scine21.06.038.
3. Javorskyj I., Yuzefovych R., Lychak O., Torba Yu., Sbrodov Ye. Method for analysis of periodically non-stationary properties of vibrations for a gas-turbine engine with unbalanced rotor. *Welding and Related Technologies Proceedings of the 7th International Conference on Welding and Related Technologies (WRT-2024)*. 2025. P. 158–161.

РОЗРОБКА І ВДОСКОНАЛЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТИПОВИХ КОМПОНЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ПРОЕКТУВАЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ

Етап попереднього проектування газотурбінних двигунів (ГТД) є одним із найбільш складних і відповідальних, що зумовлено наявністю великої кількості змінних та взаємопов'язаних параметрів, які характеризують як окремі компоненти двигуна, так і систему в цілому [1]. Геометричні, газодинамічні та конструктивні параметри компонентів ГТД формують багатовимірний простір проектних рішень, у якому зміна одного параметра, як правило, призводить до зміни цілої групи інших характеристик. Це суттєво ускладнює пошук раціональних проектних рішень уже на початкових етапах розробки двигуна.

Для підвищення ефективності вирішення таких задач доцільним є застосування сучасних оптимізаційних комплексів, які дозволяють автоматизувати пошук оптимальних комбінацій параметрів [2]. Однак якість результатів, отриманих із використанням таких комплексів, значною мірою визначається коректністю постановки оптимізаційної задачі та якістю параметричних моделей компонентів ГТД. Надмірна кількість змінних параметрів, цільових функцій і обмежень, а також їх сильна взаємна залежність можуть призводити до появи «шуму» в роботі оптимізаційних алгоритмів і, як наслідок, до зниження достовірності отриманих результатів [3], [4]. Таким чином, актуальною є задача розробки параметричних моделей з мінімально необхідною кількістю змінних, цільових функцій і обмежень, які при цьому адекватно описують фізичні та геометричні властивості досліджуваних об'єктів.

У даній роботі розроблено універсальні параметричні моделі для типових компонентів газотурбінних двигунів, а саме: ступеня осьового вентилятора, ступеня осьового компресора, ступеня радіального компресора та ступеня осьової турбіни. Для кожного з зазначених компонентів сформовано базовий перелік параметрів, що дозволяє визначати радіальні розміри проточної частини, а також основні геометричні характеристики лопаткових вінців. Зокрема, для ступеня осьової турбіни до такого переліку ввійшли радіальні розміри на вході та виході соплового апарата і робочого колеса, кількість лопаток, хорди та лопаткові кути статора і ротора.

Окрему увагу приділено формуванню системи обмежуючих параметрів, які забезпечують фізичну та можливість конструктивної реалізації отриманих

комбінацій змінних під час виконання проєктних розрахунків. До таких обмежень, зокрема, належать співвідношення радіальних розмірів суміжних елементів проточної частини, що унеможливають появу зворотних уступів і нереалістичних геометричних конфігурацій.

Подальший аналіз отриманих параметричних моделей показав можливості їх вдосконалення шляхом скорочення кількості вхідних і обмежуючих параметрів. Це було досягнуто за рахунок заміни групи взаємопов'язаних геометричних параметрів одним більш універсальним узагальненим параметром, а також за рахунок усунення надлишкових обмежень, які не мають суттєвого впливу на результати проєктних розрахунків. Такий підхід дозволив зменшити розмірність параметричного простору без втрати інформативності моделей.

У результаті виконаної роботи суттєво скорочено необхідну кількість параметрів для опису кожного типового компонента ГТД та підвищено якість розроблених параметричних моделей. Запропоновані моделі осьових ступенів можуть використовуватися як для проєктних розрахунків окремих одноступеневих компонентів, так і в межах багатоступеневих модулів. При цьому для багатоступеневих компонентів досягнуто значного зменшення сумарної кількості параметрів, що створює передумови для їх застосування при проєктуванні складних модулів, зокрема багатоступеневих осьових компресорів із великою кількістю ступенів.

Розроблені та вдосконалені параметричні моделі можуть бути ефективно використані для виконання попередніх проєктних розрахунків у поєднанні з оптимізаційними комплексами і створюють основу для подальшого застосування в оптимізаційних задачах підвищеної складності, зокрема при одночасному проєктуванні та узгодженні кількох компонентів газотурбінного двигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Beatty R.F., Prueger G.H. Turbomachinery Design Process Improvements Produce More Robust Machine. AIAA 2000-3876, 36th Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2000.
2. Panchenko Y., Moustapha H., Mah S., Patel K. Dowhan Preliminary Multi-Disciplinary Optimization in Turbomachinery Design.
3. Reitenbach S., Schnoes M., Becker R.-G., Otten T. Optimization of Compressor Variable Geometry Settings Using Multi-Fidelity Simulation. ASME, 2015: GT2015-42832.
4. Sasaki S., Obayashi S. Adaptive Range Multi-objective Genetic Algorithm and Self Organizing Map for Multi-objective Optimization Problems. *Optimization Methods for Multicriteria/multidisciplinary Design Applications to Aeronautics and Turbomachinery*. 2004: VKI-LS-2004-7.

ЦИФРОВІЗАЦІЯ ДОВІДНИКОВИХ ДАНИХ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИБОРУ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ВУЗЛІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Сучасний стан розвитку авіаційного двигунобудування характеризується постійним підвищенням вимог до питомих характеристик та надійності вузлів, що працюють у гарячому тракті. Процес проектування таких складних систем нерозривно пов'язаний з необхідністю точного підбору матеріалів, здатних витримувати екстремальні термічні та механічні навантаження протягом тривалого часу експлуатації. Традиційно інженери-конструктори використовують для цього розгалужену систему паперових довідників та нормативної документації, де зафіксовані результати багаторічних випробувань різних марок сталей та сплавів. Однак такий підхід має суттєві обмеження: ручний пошук інформації в таблицях є надзвичайно тривалим, існує висока ймовірність припущення механічних помилок при перенесенні даних, а статичний характер довідників не дозволяє швидко проводити порівняльний аналіз великої кількості альтернативних варіантів за декількома критеріями одночасно.[2]

Цифровізація довідникових даних є першим і критично важливим кроком на шляху до автоматизації інженерної діяльності. У рамках проведеного дослідження було розроблено методика структурування розрізненої інформації про жароміцні матеріали, що дозволило перетворити статичні табличні дані у динамічну базу знань. Основою для формування цієї бази стали результати систематизації хімічного складу, механічних властивостей та фізичних констант матеріалів на нікелевій та залізонікелевій основах, які є базовими для виготовлення лопаток турбін та камер згоряння. На відміну від простих цифрових таблиць, створена база даних орієнтована на подальше використання алгоритмами машинного навчання, що висуває особливі вимоги до чистоти та однорідності вхідної інформації.

Особливу увагу в роботі приділено розширенню переліку вхідних ознак для моделювання. Практика показує, що лише інформація про вміст основних легуючих елементів часто є недостатньою для точного прогнозування поведінки матеріалу в реальних умовах. Саме тому до структури даних було інтегровано такі фізичні параметри, як щільність матеріалу та його теплопровідність. Це дозволило моделі враховувати не лише хімічний склад, а й фізичну природу сплавів, що є надзвичайно важливим для деталей гарячого тракту, де температурні градієнти та вага

деталей прямо впливають на їхній ресурс. Такий підхід забезпечує створення так званого “цифрового паспорту” матеріалу, який об’єднує в собі всі критично важливі параметри в єдиному цифровому векторі. [1]

Наступним етапом дослідження стало впровадження методів інтелектуального аналізу даних. Використання алгоритмів, зокрема методу випадкового лісу, дозволило виявити складні нелінійні закономірності між структурою сплаву та його міцністю за різних температур. Алгоритм навчається на оцифрованих даних, поступово формуючи внутрішні правила прийняття рішень, що імітують досвід кваліфікованого матеріалознавця. Важливою перевагою такого підходу є можливість оцінки значущості кожного фактора впливу. Математична верифікація результатів навчання продемонструвала високу збіжність прогнозних значень із експериментальними даними, що підтверджується відповідними статистичними показниками точності. Це свідчить про те, що система здатна не просто відтворювати закладені в неї дані, а й проводити інтерполяцію результатів для умов, які прямо не описані в таблицях.

Реалізація інтелектуальної системи у вигляді інтерактивного програмного прототипу в хмарному середовищі забезпечує конструктору зручний інструментарій для повсякденної роботи. Використання графічного інтерфейсу з візуальними елементами керування, такими як випадаючі списки для вибору типу деталі та слайдери для встановлення робочих температур, робить процес підбору матеріалу інтуїтивно зрозумілим. Користувач миттєво отримує не лише прогнозу міцність для заданих умов, а й конкретну рекомендацію щодо оптимальної марки сплаву з бази даних, супроводжену повним переліком її характеристик. Це перетворює систему з пасивного сховища даних на активного помічника, який значно прискорює етап попереднього вибору матеріалів при проектуванні двигуна.

Практична цінність автоматизації вибору жароміцних сплавів полягає у суттєвому зниженні ризику припущення помилок, викликаних людським фактором. Централізація верифікованих технічних даних в єдиній цифровій системі гарантує використання актуальної та достовірної інформації всіма учасниками процесу проектування. Крім того, такий підхід створює надійний фундамент для подальшого розвитку системи, зокрема через додавання можливостей оптимізації за вартістю, технологічністю або екологічними параметрами виробництва. Впровадження подібних технологій цифровізації є невід’ємною частиною сучасної концепції цифрового виробництва в авіаційній промисловості, що дозволяє підвищити загальну конкурентоспроможність розробок та скоротити шлях від ідеї до реального виробу.

Варто зазначити, що процес оцифрування включав не лише перенесення числових значень, а й інтелектуальну очистку даних. У багатьох випадках

довідникові дані містили розбіжності або були представлені в різних одиницях виміру, що потребувало попередньої нормалізації. Створена система демонструє здатність до ефективного розділення матеріалів за їх цільовим призначенням: наприклад, вона чітко розрізняє вимоги до матеріалів лопаток, де критичною є тривала міцність і опір повзучості, та матеріалів камер згоряння, де на перший план виходить жаростійкість і стабільність структури при нагріві. Математичні графіки кореляції, отримані під час тестування моделі, наочно ілюструють високу прогностичну здатність системи, що робить її надійним інструментом для інженерних розрахунків. Таким чином, перехід від паперових методів роботи до інтелектуальних цифрових систем є неминучим етапом розвитку сучасного авіаційного матеріалознавства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Леошенко С.Д., Субботін С.О., Олійник А.О., Нарівський О.Е. Впровадження системи індикаторів у моделювання складних технічних систем. *Радіоелектроніка, комп'ютерні науки, управління*. 2021. № 1. Р. 117–126. doi: 10.15588/1607-3274-2021-1-12.
2. Нарівський О. та ін. Математичне моделювання корозійної поведінки аустенітних сталей у свинець-вісмутовій евтектиці. *Євразійський хіміко-технологічний журнал*. 2022. № 24 (2). Р. 296–300. doi: 10.18321/estj1473.

УДК 621.438:621.515

Gvozdyk.R¹, Babenko O.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

ADVANCING THE OPERATIONAL FLEXIBILITY OF D-336 GAS TURBINE UNITS FOR ANCILLARY SERVICES THROUGH ADAPTIVE AIR BLEED CONTROL SYSTEMS

Abstract. The D-336 gas turbine engine, a cornerstone of the 6.3–8 MW power generation segment, traditionally operates in a rigid isochronous mode to maintain a constant 50 Hz grid frequency [1]. However, its potential for participating in the Ancillary Services Market (ASM) – specifically in Frequency Restoration Reserves (FRR) – is limited by its transient stability during abrupt load changes. A critical challenge is the 100% full load rejection, where a severe pneumatic-to-thermal imbalance leads to combustion flameout due to an excessive air-fuel ratio (AFR) [2].

The Problem of Transient Stability. Conventional non-controlled pneumatic air bleed valves (ABVs) exhibit a latency of 100–200 ms, failing to intercept the flameout development window of 80–150 ms. This technical bottleneck results in a 60–70% failure rate during full load rejection, leading to immediate unit trips and significant grid instability.

Proposed High-Speed Adaptive Control. This study proposes a high-speed modernization of the air bleed system, transforming existing ABVs into **Controlled Air Bleed Units**. The system integrates ultra-fast solenoid pilot valves (5–10 ms) and a predictive microprocessor-based control logic [3]. The core innovation lies in the **Pre-emptive Bleed Activation** – a proactive opening of the ABVs initiated 30 ms prior to the actual generator circuit breaker trip. This allows for controlled depressurization of the compressor discharge before the fuel control valve reaches its minimum stop.

Results and Performance Metrics. The implemented algorithm optimizes the entire operating envelope of the D-336 engine. Key performance indicators include:

- **response Time:** Valve actuation is achieved within ≈ 50 ms (2–4 times faster than the OEM system).
- **flameout Mitigation:** Probability of combustion extinction is reduced to $< 5\%$.
- **operational Range:** The unit gains the ability to execute seamless transitions across the full load spectrum, from 0% to 100%, without risking a total shutdown.

Strategic Impact on the Energy Market. By ensuring guaranteed 100% load rejection and rapid re-loading capabilities, the D-336 GTE can fully leverage its potential in the ancillary services market. This modernization facilitates:

- **grid Stability:** Enhanced contribution to primary and secondary frequency control.
- **economic Efficiency:** Reduced generation losses of 12–21 MWh/year and high ROI with a 2 – 6 years payback period.
- **asset Resilience:** Minimized thermal stress and mechanical fatigue during emergency trips.

Conclusion. The transition to solenoid-actuated, predictive air bleed control is a critical technological upgrade for the D-336 fleet. It transforms a standard power unit into a highly flexible grid asset. This modernization is not only economically viable but essential for the integration of gas turbine power plants into the modern, volatile energy landscape of Ukraine, ensuring both energy security and market competitiveness.

REFERENCES

1. Technical Description and Operating Instructions for the D-336-1 Gas Turbine Engine. Zaporizhzhia: JSC "Motor Sich", 2018. 286 p.
2. Borovskyi B.I., Maksutyn V.I., Kulyk, M.M. Specifics of gas turbine unit application in the energy sector of Ukraine. *Industrial Power Engineering*. 2019. № 4. P. 12–18.
3. Sigal O.I., Smyrnov O.V. Improving the reliability of gas turbine units during load rejection. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energy and Heat Engineering Processes and Equipment*. 2020. № 1. P. 45–52.

УДК 621.762:539.5

Ярмошенко Д.В.¹, Качан О.Я.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² проф. НУ «Запорізька політехніка»

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСУ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ ТА ЗБИРАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ ГОЛОВНИХ РЕДУКТОРІВ ВЕРТОЛЬОТІВ ТИПУ МІ-8

Корпусні деталі головних вертолітних редукторів вертольотів типу Мі-8 більшою мірою виготовляються з магнієвих сплавів можуть ефективно використовуватися в умовах високих навантажень і вібрацій, що робить їх особливо підходящими для застосування в авіаційних системах, де критично важлива надійність. Відливки із магнієвих сплавів у більшій ступені, ніж алюмінієві сплави, схильні до гарячих тріщин, що пов'язано з меншим (практично у 2 рази) коефіцієнтом теплопровідності (213 проти 131 Вт/(м·К)). Особливо це відноситься до відливок, виготовлених у металевих формах. Магнієві ливарні сплави сильніше, ніж алюмінієві сплави, схильні до насичення газами, особливо воднем. В алюмінієвих сплавах зміст H_2 складає 1...5 см³/100 г сплаву, а в магнієвих сплавах досягає 20...30 см³/100 г. Магнієві сплави чутливі також до вологого повітря, внаслідок цього відбувається набір вологості флюсу, під шаром якого в обов'язковому порядку відбувається плавлення.

Сплав МЛ5-Т6 по ГОСТ 2856-79 відноситься до категорії легких магнієвих сплавів з якого виробляються корпусні деталі головних редукторів вертольотів типу Ми-8, які мають високу міцність і гарну корозійну стійкість. Цей сплав виробляється з використанням термічної обробки, що дозволяє підвищити його характеристики, такі як твердість і пластичність. Процес термообробки включає нагрів до певної температури (біля 415 °С), витримку і наступне охолодження, що забезпечує перерозподіл елементів в залежності

від осей і міжосьових проміжків. Дослідження показують, що використання методів модифікації, таких як додавання вуглецевомісних матеріалів при фільтрації розплаву, призведе до значного подрібнення зерна металу і підвищенню механічних властивостей. Ці методи, у купі з захисними покриттями, надають нові можливості для розширення застосування магнієвих сплавів в різноманітних галузях, включно авіацію, де необхідні легкі і міцні матеріали. Однак, ці матеріали схильні до усадочної пористості. При виробництві відливки з магнієвих сплавів вражені усадочною пористістю, хоча усадочні раковини незначні. Тому відливки виготовляються з прибутками та піддаються просочуванню для підвищення герметичності. Внутрішня поверхня деталей відливок для усунення негерметичності підлягає нанесенню деяких шарів покриттів (вона покривається бакелітовим лаком ЛБС-1 по ГОСТ 901-78, лаком ЭП-075 по ТУ 6-10-927-75).

Лак ЛБС-1 має високі адгезійні властивості, що робить його ідеальним для утворення захисних шарів деталей з магнієвих сплавів, які використовуються у авіації і автомобільному будівництві, де особливо важливий їх захист від впливу зовнішньої середовища та утворення корозії. Він забезпечує надійний захист від вологи, хімічних речовин, механічних пошкоджень завдяки склеюванню і просочуванню елементів, що критично необхідно для їх довго тривалості.

Лак ЭП-075 призначений для покриття і захисту відливок із магнієвих сплавів. Його використання оправдане завдяки здатності протидіяти корозії і забезпечувати довго тривалість виробів, що особливо важливо для компонентів, працюючих в умовах підвищеної вологості і агресивного середовища. Даний лак використовується в якості напівфабрикату при виробництві епоксидної ґрунтовки ЭП-09Т, що дозволяє використовувати його в межах комплексної системи захисту магнієвих сплавів. Це особливо актуально в авіаційній промисловості, де магнієві сплави використовують завдяки їх легкості і міцності.

В наслідок можливого лущення наведених лаків на протязі часу в основну діючу робочу рідину - оливу «Eastman Turbo Oil», ЕТО 2380 MIL-PRF-23699F, MIL-Spec відбувається забиття робочих форсунок та жиклерів масляної системи головних вертолітних редукторів ВР-8А, ВР-14, яке призводить до недостатнього охолодження вольниць, зубчастих коліс, поверхонь тертя і як наслідок цього до непередбаченого виконання робіт по очищенню цих елементів від продуктів забиття або до виходу з ладу та знімання головних редукторів з вертольотів. Тому для усунення зазначеної проблеми і забезпечення їх довгої тривалості було вирішено використовувати антикорозійне покриття внутрішньої поверхні корпусних деталей головних редукторів вертольотів типу Ми-8 за допомогою нанесення гальванічного покриття Хим.Окс.хром по ГОСТ 9.301-86. Це покриття використовується

для захисту деталей, вироблених із магнієвих сплавів, з метою попередження корозії і забезпечує захист, формуючи на поверхні металевого виробу тонкий оксидний шар. Колір покриття може бути від молочного до сірого з можливими веселковими забарвленнями. Покриття Хім.Окс.хром може використовуватися для підвищення експлуатаційних характеристик виробів та зменшення вкладень у технічне обслуговування виробів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ГОСТ 901-78: Лаки бакелітові. Технічні умови
2. ТУ 6-10-927-75 Лак ЕП-075. Технічні умови
3. ГОСТ 9.301-86 Єдина система захисту від корозії та старіння. Покриття металеві та неметалеві неорганічні. Загальні вимоги.

УДК 621.438:620.179

Собченко С.В.¹, Уланов С.О.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПЕРЕДУМОВИ КОМПЛЕКСНОЇ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ПОКРИТТІВ, ЩО ПРИПРАЦЬОВУЮТЬСЯ, ТА ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЧОГО АПАРАТУ КОМПРЕСОРА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДАНИХ

Надійність роботи авіаційних двигунів значною мірою залежить від технічного стану компресора. Важливу роль при цьому відіграють покриття, що припрацьовуються, які забезпечують мінімальні зазори між лопатками та корпусом і впливають на ефективність роботи ступенів.

У процесі експлуатації такі покриття поступово зношуються. Це призводить до збільшення зазорів, погіршення газодинамічних характеристик компресора та зниження його ефективності. Одночасно можуть виникати пошкодження лопаток направляючого апарату, що додатково впливає на роботу двигуна.

На сьогодні стан покриттів і лопаток оцінюється переважно за допомогою візуального огляду через оглядові вікна. Однак такий підхід має обмеження, оскільки дозволяє контролювати лише окремі ділянки компресора і не дає повної картини їх стану.

Водночас у процесі експлуатації двигуна накопичуються значні обсяги даних про параметри його роботи (тиск, температура, витрати повітря тощо). Ці параметри можуть містити інформацію про зміну технічного стану компресора.

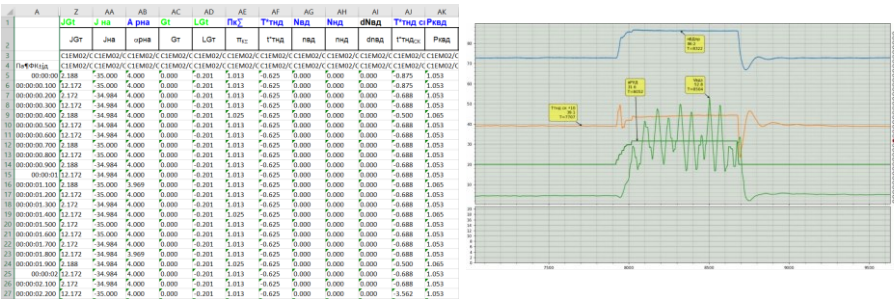
Передбачається, що знос покриттів, що припрацьовуються, який призводить до зміни зазорів, може впливати на параметри роботи двигуна. Відповідно, аналіз цих параметрів може бути використаний для непрямой оцінки стану покриттів і лопаток.

Аналіз наукових джерел показує, що окремо досліджуються процеси зносу покриттів та методи параметричної діагностики двигунів. Проте їх поєднання для оцінки стану компресора практично не розглядається.

У зв'язку з цим висувається припущення, що комплексне використання експлуатаційних даних двигуна та результатів візуального огляду дозволить підвищити достовірність оцінки технічного стану компресора.

Наукова новизна полягає у пропозиції використовувати експлуатаційні параметри двигуна як індикатори зносу покриття, що припрацьовуються, та пошкоджень лопаток направляючого апарату, а також у поєднанні параметричної діагностики з розширеним оглядом компресора.

Запропонований підхід може бути використаний для підвищення точності діагностики, своєчасного виявлення дефектів та удосконалення систем технічного обслуговування авіаційних двигунів.



а – база даних роботи авіаційного двигуна у текстовому вигляді; б – параметри роботи авіаційного двигуна в графічному вигляді.
Рисунок 1 – Приклад параметрів роботи авіаційних двигунів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kurzke J. Gas Turbine Performance: Performance and Health Monitoring. Springer, 2018. 329 p.
2. Boyle R.J. Tip Clearance Effects in Axial Compressors. NASA Technical Reports Server. 20 p.
3. The Jet Engine. Rolls-Royce plc. Derby, 2015. 281 p.

СЕКЦІЯ «МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ ТА СИСТЕМИ»

УДК 621.9.015

Штанкевич В.С.¹, Фролов М.В.²

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

НОМЕНКЛАТУРА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Якість обробленої поверхні є вагомим чинником, що безпосередньо впливає на надійність, довговічність та ефективність функціонування будь-яких машин та механізмів.

Одним із основних методів утворення поверхонь деталей є лезова обробка. Якість поверхонь після лезової обробки можливо оцінити за такими показниками: шорсткість та хвилястість поверхні, точність форми та розмірів, а також стан поверхневого шару матеріалу.

Для ефективного підвищення якості обробленої поверхні критично важливо точно визначити, які саме показники якості поверхонь є найбільш значущими для експлуатації деталей спеціальної техніки.

Провівши аналіз літературних джерел визначили наступну номенклатуру показників якості поверхонь деталей спеціальної техніки, що будуть визначати їх експлуатаційні властивості [1]:

R_a – середнє арифметичне відхилення профілю – найбільш поширений параметр, що являє собою середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини, мкм;

R_z – висота нерівностей профілю за десятьма точками – визначається як сума середніх значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини, мкм;

R_{max} – найбільша висота профілю – максимальна відстань між найвищою точкою профілю та найнижчою западиною в межах базової довжини, мкм;

S_m – середній крок нерівностей профілю – середня відстань між сусідніми виступами профілю в межах базової довжини, мм;

W_z – висота хвилястості – середнє арифметичне з п'яти її значень на ділянці вимірювання, мкм;

S_w – середній крок хвилястості – середнє арифметичне значення довжин відрізків середньої лінії між одноіменними сторонами хвиль, мм;

S – середній крок місцевих виступів профілю – середнє значення кроку місцевих виступів профілю в межах базової довжини, мм;

t_p – відносна опорна довжина профілю – відношення опорної довжини профілю до базової довжини, %;

$\pm\sigma_{зал.}$ – залишкові напруження – напруження, що залишаються в матеріалі після видалення зовнішнього навантаження. Виникають в наслідок нерівномірної пластичної деформації або структурних перетворень, МПа;

$h_{\mu 0}$ – глибина залягання залишкових напружень – показує наскільки глибоко в матеріалі розподіляються залишкові напруження, мм;

$H_{\mu 0}$ – поверхнева мікротвердість – показує стійкість до пластичної деформації або проникнення іншого, більш твердого тіла у поверхневий шар під дією навантаження. Свідчить про наклеп, фазові перетворення або деградацію матеріалу;

h_{μ} – товщина поверхневого шару – показує глибину на яку властивості матеріалу відрізняються від його основного об'єму (серцевини);

ϵ – пружна деформація кристалічної ґрати – є основою для розуміння поведінки матеріалів під навантаженням;

l_z – розмір, форма та розподіл зерен по шару та їх кристалографічна орієнтація – ключові характеристики, що визначають мікроструктуру матеріалу та мають вирішальний вплив на механічні, хімічні та фізичні властивості матеріалу;

ρ_D – щільність дислокацій – визначає поведінку мікроструктури матеріалу під навантаженням.

Вибір оптимальної номенклатури показників якості поверхні для дослідження лезової обробки деталей спеціальної техніки ґрунтувався на таких критеріях як:

1. Функціональна значущість – обрані показники пов'язані з експлуатаційними властивостями (зносостійкість, втомна міцність, корозійна стійкість, герметичність) деталей спеціальної техніки;

2. Чутливість до технологічних параметрів – обрані показники реагують на зміну режимів різання, геометрії інструменту та інших параметрів обробки;

3. Відтворюваність вимірювань – обрані показники можливо точно виміряти за допомогою сучасних метрологічних засобів.

У подальшому виконанні науково-дослідної роботи, наведена номенклатура показників якості поверхонь, дозволить більш детально зосередитись на визначенні факторів, що впливають на них, а відповідно і на якість оброблених поверхонь деталей спеціальної техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В. Класифікація деталей машин з обліком якості їх поверхневого шару. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ, 2022. № 2 (272). С.91-98.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ СТАБІЛЬНОГО РІЗАННЯ В УМОВАХ РЕГЕНЕРАТИВНИХ КОЛИВАНЬ

Механічна обробка є одним із найпоширеніших виробничих процесів у промисловості завдяки її здатності виготовляти деталі з високою точністю. Однак продуктивність і якість обробки можуть бути обмежені через динаміку процесу різання. Коливання можуть виникати внаслідок динамічної взаємодії між процесом різання та структурою верстат-інструмент-деталь як замкненої системи. Такі коливання призводять до погіршення якості обробленої поверхні та зниження стійкості інструменту. Основне джерело самозбудження (виникнення регенеративних коливань), пов'язане з обробкою по сліду та зворотним зв'язком між наступними проходами на поверхні обробки, що призводить до хвилястості на оброблених поверхнях, і, отже, зміни товщини стружки [1]. Для певної швидкості різання існує гранична глибина різання, вище якої система стає нестабільною, і розвиваються коливання.

Рівняння руху для системи з одним ступенем вільності в разі дії на неї збурюючої сили F має вигляд

При ортогональному різанні з урахуванням регенеративного коливання сила різання F пропорційна площі різання (добутку ширини стружки або глибини зрізу b на товщину h)

$$F(t) = k_s b h = k_s b [x(t - \tau) - x(t)], \quad (1)$$

де k_s - жорсткість різання або питома сила різання; x - переміщення різця по нормалі до зрізу; t - час; τ - інтервал часу між попереднім і поточним зрізами.

Рівняння руху для системи з одним ступенем вільності в разі дії на неї збурюючої сили F має вигляд

$$\ddot{x} + 2\zeta \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{\omega_0^2}{k} F(t), \quad (2)$$

де $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$; $\zeta = \frac{c}{\sqrt{2km}}$.

Динамічна характеристика системи

$$G(i\omega) = \frac{x(\omega)}{F(\omega)} = \frac{\omega_0^2}{k} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\zeta\omega_0\omega}. \quad (3)$$

Дійсну G_R і уявну частину G_I динамічної характеристики визначимо

$$G_R = \frac{1}{k} \frac{1-r^2}{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}, \quad G_I = \frac{1}{k} \frac{-2\zeta r}{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}, \quad (4)$$

де $r = \omega / \omega_0$.

При спільному розв'язку рівнянь (1) і (2), ширина стружки b залежить від частоти коливань верстата через співвідношення частот r . В процесі обробки на верстаті кожній частоті коливань, відповідає визначена критична ширина стружки b . Перевищення цього значення зумовлює нестабільний процес різання, обробка на режимах з шириною стружки меншою критичного значення забезпечує стабільний режим.

Граничне значення глибини різання може бути визначене за формулою [2]

$$b_{lim} = \frac{-1}{2K_f G_R}, \quad (5)$$

де K_f — коефіцієнт сили різання в напрямку подачі (питома сила різання, Н/м²).

Розв'язок стійкості існує лише тоді, коли дійсна частина динамічної характеристики є негативною, тобто $G_R < 0$.

Результати розрахунків граничної глибини різання наведені на рис. 1. Розрахунок виконувався для обробки кінцевою фрезою діаметром 25 мм з числом зубів -2, жорсткість деталі $k = 12,3 \cdot 10^6$ Н/м, частота власних коливань деталі $\omega_0 = 231$ Гц, коефіцієнт демпфування $\zeta = 0,017$, коефіцієнт сили різання $K_f = 796 \cdot 10^6$ Н/м².

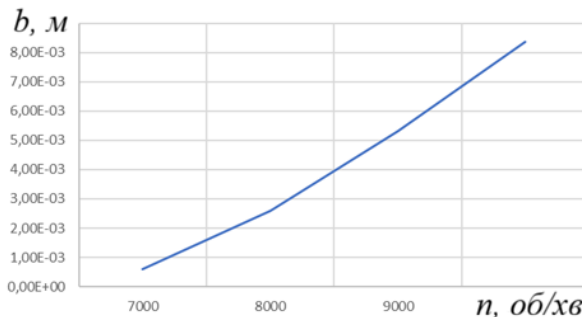


Рисунок 1 – Залежність граничної глибини різання від частоти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Erhan Budak. Machining stability and machine tool dynamics. *11th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*, TMT 2007, Hammamet, Tunisia, 05-09 September, 2007. P.30.

2. Altintas Y., Stepan G., Budak E., etc. Chatter Stability of Machining Operations. *Transactions of the ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 11. 2020, Vol. 142. -110801, 19 p.

УДК 621.891:669

Первсєв Д.В.¹

¹асист. НУ «Запорізька політехніка»

ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ДОБАВОК У МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСОБАХ ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ШЛІФУВАННЯ ТА ТОЧІННЯ

У сучасному машинобудуванні підвищення продуктивності процесів механічної обробки нерозривно пов'язане зі зростанням теплового та силового навантаження в зоні контакту інструмента із заготовкою. Особливо це характерно для шліфування і точіння, де інтенсивне тертя, локальний перегрів, адгезійні явища та зношування різальних чи абразивних поверхонь безпосередньо впливають на точність обробки, шорсткість та стійкість оснащення. За таких умов важливого значення набувають мастильно-охолоджувальні технологічні засоби (МОТЗ), які мають забезпечувати ефективне відведення теплоти, зменшення сили тертя, полегшення видалення продуктів обробки та захист обробленої поверхні від дефектів.

Аналіз літературних джерел свідчить, що розвиток МОТЗ у машинобудуванні відбувається в напрямі від традиційних мінеральних олив до водозмішуваних, синтетичних і комбінованих композицій, у тому числі з полімервмісними компонентами [1, 2, 3]. Такий підхід пояснюється прагненням поєднати високу охолоджувальну здатність водних середовищ із покращеними змащувальними властивостями, які забезпечуються завдяки плівкоутворенню, адсорбції активних компонентів на металі та стабілізації граничного тертя [1, 2].

Для процесу шліфування проблема вибору складу МОТЗ є особливо важливою, оскільки тепла пошкоджувальність поверхневого шару часто стає одним із головних обмежувальних чинників. Окремий інтерес становлять полімерно-водні системи. Зокрема, у дослідженні М. Winter, R. Bock, С. Herrmann доведено можливість використання нового полімерно-водного МОТЗ як альтернативи традиційним мінерально-оливним середовищам у шліфуванні [3]. Водночас у дослідженні D. Meyer та A. Wagner встановлено, що добавки до МОТЗ істотно впливають на теплові умови шліфування та змінюють межу виникнення термічних пошкоджень, що безпосередньо позначається на якості сформованого поверхневого шару [4]. Отже, застосування полімерних добавок у процесах шліфування є доцільним як для

покращення змащувальної дії технологічного середовища, так і для керування температурними параметрами процесу.

Специфіка лезової обробки також вимагає особливого підходу до вибору МОТЗ. Щодо токарної обробки, то більшість досліджень присвячена загальній ефективності водозмішуваних, емульсійних та екологічно орієнтованих МОТЗ. Оглядові дослідження S. A. Lawal та співавторів узагальнюють, що в процесах точіння ключовими критеріями ефективності МОТЗ залишаються температура в зоні різання, сили різання, стійкість інструмента та якість обробленої поверхні [5].

Сучасні публікації з трибології, а також розроблення нового складу водних мастильно-охолоджувальних середовищ підтверджують, що найбільш перспективними є композиції, у яких поєднуються охолоджувальна здатність, екологічна прийнятність і здатність до формування стабільної захисної плівки на поверхні контакту [6]. У цьому контексті полімерні добавки до МОТЗ для шліфування і точіння мають значний науковий і практичний потенціал, оскільки можуть забезпечити зниження температури в зоні обробки, зменшення інтенсивності зношування інструмента, покращення шорсткості поверхні. Отже, подальші дослідження доцільно спрямувати на встановлення оптимальної концентрації полімерної добавки в МОТЗ, оцінювання її впливу на сили обробки, температуру, параметри шорсткості та інструментальне зношування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Metalworking fluids—Mechanisms and performance / E. Brinksmeier et al. *CIRP Annals*. 2015. Vol. 64, no. 2. P. 605–628. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.003> (date of access: 20.04.2026).
2. Irani R. A., Bauer R. J., Warkentin A. A review of cutting fluid application in the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 45, no. 15. P. 1696–1705. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.006> (date of access: 20.04.2026).
3. Winter M., Bock R., Herrmann C. Investigation of a new polymer-water based cutting fluid to substitute mineral oil based fluids in grinding processes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013. Vol. 6, no. 4. P. 254–262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.07.003> (date of access: 20.04.2026).
4. Meyer D., Wagner A. Influence of metalworking fluid additives on the thermal conditions in grinding. *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65, no. 1. P. 313–316. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.016> (date of access: 20.04.2026).
5. Lawal S. A., Choudhury I. A., Nukman Y. Developments in the formulation and application of vegetable oil-based metalworking fluids in turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012.

Vol. 67, no. 5-8. P. 1765–1776. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4607-0> (date of access: 20.04.2026).

6. Tribological Effects of Metalworking Fluids in Cutting Processes / F. Pape et al. Lubricants. 2023. Vol. 11, no. 5. P. 224. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11050224> (date of access: 20.04.2026).

УДК 621.914.3:621.9.048:534.1

М. Frolov.¹, S. Tanchenko², S. Bazhanov³

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

³ студ. гр. М-215м НУ «Запорізька політехніка»

THE PHASE FACTOR AS A PREDICTOR OF THE INITIAL CON-DITIONS FOR THE HIGH-SPEED END MILLING OF THIN- WALLED PARTS

The development of high-tech sectors such as the aerospace industry, satellite systems and power plants is driven by the need to reduce the weight of equipment whilst maintaining its reliability and structural integrity. This objective is largely achieved through the use of thin-walled parts (TWP) made from a variety of metals, steels and alloys. Thin-walled parts are those in which the ratio of wall thickness to the shorter side lies within the range from 0.01 to 0.2. Such structures include: skins, stringers, frames, stiffeners, turbine blades, casings, etc. The most common method of machining such structures is milling, which is a complex task for production as the low rigidity of the parts leads to vibrations that significantly affect the micro- and macro-relief of the machined surface, its deformation and residual stresses.

The effect of vibrations on the machined surface relief depends on the initial cutting conditions [1]. Vibrational phenomena typical for high-speed milling are observed under the following conditions [1]:

$$D_R = t_c f_n < 1, \quad (1)$$

where t_c – cutting time, f_n – machined part natural vibration frequency, Hz.

Under these conditions, the initial vibration pulse consists of the damped natural vibrations from the previous pass and the forced vibrations associated with the cutting cycle. The sum velocity (V_s) will consist of the velocities of natural (V_n) and forced (V_z) vibrations. The vector equation of the sum velocity will look as follows (Eq. 2):

$$\vec{V}_s = \vec{V}_n + \vec{V}_z. \quad (2)$$

Considering the generated vibrations as harmonic oscillations, the following can be written:

$$F_n(t) = A_n \sin \left[\frac{2\pi}{T_n} t - \pi \right], \quad (3)$$

$$F_z(t_1) = -A_z \sin \left[\frac{2\pi}{T_z} (t_1 - t) \right], \quad (4)$$

where A_n , A_z – amplitude of a natural and forced vibration correspondently, mm; t , t_1 – time in sec and $t_1 > t$, T_n , T_z – period of a natural and forced vibration correspondently, sec.

After rearranging equations (2) – (4), the final expression for the summation velocity can be expressed not in terms of time, but of the phase factor μ that determines the fraction of the angular period – 2π and thus changes from 0 to 2.

The relationship between the vibrational energy during cutting and the quality of the machined surface is direct. The greater the fraction of energy conveyed to the oscillatory actions of the system, the more the micro- and macro-geometric parameters of the surface worsens. The energy, in the meantime, is directly proportional to the square of the oscillatory velocity. An additional factor that directly influences vibratory activity is acceleration. The relationships between the square of the total velocity and acceleration as a function of the phase factor are shown in Fig. 1.

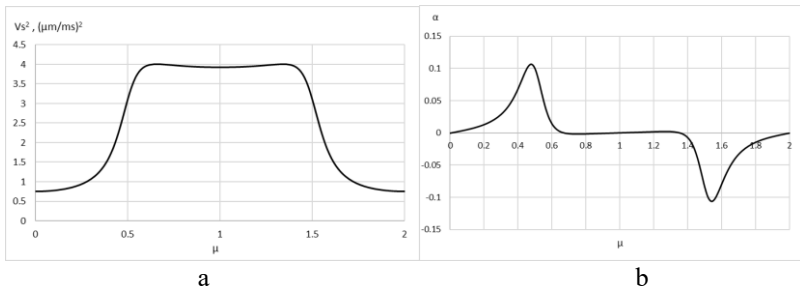


Figure 1 - Typical relationships between total velocity and acceleration index as a function of the phase factor.

An analysis of the dependencies, examples of which are shown in Fig. 1, indicates that the less favourable initial conditions for the generation of vibrations are observed when the phase coefficient lies within the range from 0.3–0.4 to 1.4–1.5.

The effective phase factor characterizing the initial cutting conditions is determined by the following equation:

$$\mu = 2 \left\{ \frac{f_n}{f_z} - \frac{1}{2} \right\}, \quad (5)$$

where f_z – frequency of forced vibration, Hz. The expression in curly brackets denotes the fractional part.

REFERENCES

1. Attendant Free Vibrations and Assessment of Their Influence on the Machined Surface Macrogeometry While End Milling / S. Dyadya et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, 2025. P. 327–337. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95211-1_27 (date of access: 03.04.2026).

УДК 621.9:004.94:519.17

Танченко С.В.¹, Рясненко Б.Д.²

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-213сп НУ «Запорізька політехніка»

ІНТЕГРОВАНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ РОЗГОРТОК ЛИС- ТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ТОПОЛОГІЧНИХ І ГРАФОВИХ МЕТОДІВ

Інтегрований метод побудови розгортки листових конструкцій на основі топологічного аналізу та графових алгоритмів

Сучасні вимоги до виготовлення листових конструкцій передбачають забезпечення високої точності геометрії виробів та ефективності технологічних процесів. Це особливо актуально при використанні алюмінієвих композитних панелей, які поєднують високу жорсткість, малу масу та корозійну стійкість.

Досягнення зазначених характеристик ускладнюється необхідністю виготовлення виробів складної просторової форми, що вимагає побудови коректних плоских розгортки. Традиційні методи, засновані на використанні типової конструкторської документації або штампуванні, є недостатньо ефективними в умовах індивідуального виробництва та відновлення виробів. У таких випадках застосовується реверс-інжиніринг, який забезпечує отримання цифрової моделі за фізичним зразком.

Побудова розгортки листових конструкцій характеризується двома основними складовими: геометричною та технологічною. Геометрична складова визначається складністю контурів, кількістю ліній згину та з'єднання, тоді як технологічна — трудомісткістю виготовлення та точністю складання.

Аналіз існуючих досліджень показує, що питання побудови розгортки розглядаються переважно з позицій геометричного моделювання, топологічного аналізу та методів теорії графів. Разом з тим виявлено низку суттєвих недоліків. Зокрема, недостатньо враховуються особливості обробки алюмінієвих композитних панелей методом фрезерування, відсутня систематизація технологічних параметрів, а також не визначені чіткі критерії оптимальності розгортки для даного класу матеріалів.

Існуючі критерії оцінки, такі як компактність розгортки та легкість складання, не забезпечують комплексного врахування технологічних факторів, зокрема довжини інструментальних траєкторій та особливостей формоутворення. Крім того, відсутня інтеграція процесів побудови розгортки із етапом реверс-інжинірингу, що знижує ефективність цифрового виробництва.

З метою усунення зазначених недоліків запропоновано інтегрований підхід до побудови розгортки, який поєднує методи реверс-інжинірингу, топологічного аналізу та теорії графів. Основою підходу є використання топологічного представлення 3D-моделі, що дозволяє формалізувати її структуру через зв'язність елементів, наявність циклів та локальні особливості поверхні.

Застосування топологічної декомпозиції забезпечує виділення областей, придатних для побудови розгортки, із збереженням геометричної цілісності моделі. При цьому використання граничного представлення дозволяє отримати повний опис взаємозв'язків між елементами поверхні.

Подальша оптимізація виконується із застосуванням методів теорії графів, де поверхня моделі подається у вигляді графа. Вибір ліній розрізу здійснюється на основі побудови мінімального остовного дерева, що забезпечує мінімізацію сумарної довжини різів і зменшення кількості фрагментів розгортки.

Додатково застосування імітаційних методів оптимізації, зокрема алгоритму відпалу, дозволяє одночасно враховувати декілька критеріїв, включаючи відсутність перекриттів і мінімізацію довжини траєкторій інструмента при фрезеруванні.

Запропонований підхід забезпечує підвищення точності побудови розгортки, зниження трудомісткості виготовлення, скорочення довжини інструментальних траєкторій та створює передумови для автоматизації процесу в CAD/CAM-системах.

Таким чином, інтеграція топологічного аналізу, графових методів і реверс-інжинірингу дозволяє підвищити ефективність побудови розгортки листових конструкцій та усунути обмеження існуючих підходів.

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

УДК 621.762.793:669.15

Кононов В.В.¹

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ ГТУ

Підвищення техніко-економічних характеристик сучасних газотурбінних установок (ГТУ), їх експлуатаційна надійність та ресурс пов'язані з надійністю найбільш важконавантажених деталей, насамперед, робочих лопаток ГТУ. Один з видів пошкоджень лопаток, які знижують експлуатаційну надійність ГТУ є корозійний вплив продуктів згоряння газотурбінного палива.

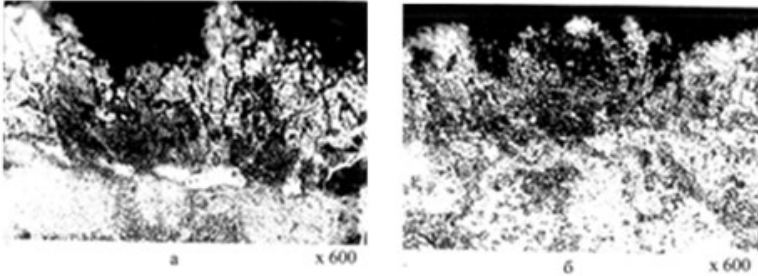
Останнім часом для виготовлення лопаток газових турбін, які працюють в умовах високих температур і напружень в агресивних середовищах, застосовують жароміцні нікелеві сплави з високими фізико-механічними властивостями, стабільністю структури при робочих температурах. Проте, при тривалому напрацюванні в умовах окисульфідної корозії відбувається зниження службових властивостей металу, що призводить до обмеження їх ресурсу експлуатації.

Підвищення корозійної стійкості лопаток може бути отримане різними засобами, що включають вдосконалення хімічного складу сплавів, застосування захисних покриттів, здійснення конструкторських і експлуатаційних заходів тощо. Наприклад, на профільну частину робочої лопатки турбіни в сталому робочому режимі діють статичні напруги від відцентрових і газових сил, що досягають 200 МПа. Внаслідок температурного градієнта, усталеного в перетинах лопатки, в матеріалі виникають термічні напруги статичного характеру. Одночасно матеріал лопатки схильний до дії високочастотних циклічних напружень, обумовлених вібрацією лопаток.

Основними факторами, що визначають швидкість корозійного пошкодження, є корозійні властивості робочого середовища і температура газів на вході в турбіну при експлуатації ГТД. При розгляді корозійного пошкодження деталей газових турбін, вся увага акцентується на поверхню, яка безпосередньо стикається з газовим потоком.

Металографічним аналізом корозійного стану поверхні лопаток встановлено, що у верхньому і середньому перетинах профільної частини шар продуктів корозії, як зовнішньої, так і внутрішньої поверхні, неоднорідний і нерівномірний. Під шаром продуктів корозії розташована

обезлегована зона. Мікроструктура корозійного пошкодження поверхневого шару робочої лопатки ТВД ГТК-10І представлена на рисунку 1.



а – зовнішня поверхня профільної частини; б – внутрішня поверхня профільної частини.

Рисунок 1 – Мікроструктура корозійного пошкодження робочих лопаток ГТК-10І.

Відмітимо деякі закономірності, прийнятні при розгляді загального механізму окиссульфідної корозії внутрішньої порожнини порожнистих деталей ГТУ. Найбільш важливим агресивним компонентом вважається сульфат натрію у вигляді конденсату чи у вигляді суміші пари Na_2SO_4 з продуктами горіння.

При цьому сірка, що виділяється при взаємодії сульфату натрію і нікелю, дифундує через початковий шар оксиду нікелю і утворює сульфід. Утворення евтектики $\text{Ni} - \text{Ni}_3\text{S}_2$ з низькою температурою плавлення веде до порушення захисної плівки оксидів. Надалі відбувається розвиток автокатолітичного процесу з утворенням і окисленням евтектики. Таким чином, комплексний підхід в аналізі корозійного руйнування зумовлює насущну необхідність захисту не лише зовнішньої, але і внутрішньої поверхні профільної частини порожнистих лопаток ГТУ.

УДК 621.874

Фролов Р.О.¹, Мартовицький Л.М.², Глушко В.І.³

¹ канд. техн. наук, старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ПРОГІННИХ КРАНОВИХ БАЛОК

Заміна вантажопідіймального обладнання та його окремих елементів є вкрай витратною операцією, що зумовлює низькі темпи оновлення основних фондів. Особливо це стосується кранів мостового типу, які є найбільш

поширеним видом підйомно-транспортного обладнання у важкій промисловості. Основним несучим елементом їх металоконструкції є прогінні балки, технічний стан яких безпосередньо визначає надійність і безпечність експлуатації крана в цілому. У зв'язку зі значним фізичним та моральним зношенням парку мостових кранів, а також обмеженими можливостями їх своєчасної заміни, особливої актуальності набувають задачі оцінювання залишкового ресурсу та обґрунтування можливості подовження строку експлуатації металоконструкцій, зокрема прогінних кранових балок.

На практиці прийняття рішень щодо подальшої експлуатації кранів, як правило, базується на результатах технічного обстеження, суттєву частку якого становить візуальний контроль. Такий підхід не забезпечує достатнього рівня об'єктивності та достовірності отриманих результатів, оскільки не враховує впливу прихованих дефектів, накопичених пошкоджень і втомних процесів, а також не спирається на результати інструментальних вимірювань і розрахункових оцінок. За таких умов виникає необхідність розроблення науково обґрунтованих методів оцінювання технічного стану та залишкового ресурсу прогінних балок мостових кранів, що дозволить підвищити достовірність прийняття інженерних рішень. Подовження строку служби металоконструкцій за рахунок впровадження таких методів забезпечує значний економічний ефект, який у ряді випадків є співставним із витратами на виготовлення нових кранів.

Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення точності оцінювання залишкового ресурсу та розроблення ефективних підходів до подовження експлуатаційного ресурсу прогінних кранових балок, є актуальними як з наукової, так і з практичної точок зору.

Поширеним у машинобудуванні методом подовження ресурсу роботи відповідальних циклічно навантажених деталей є надання їм тренувальних або зміцнювальних навантажень у напрямку дії експлуатаційних навантажень. Зазначені методи можуть реалізовуватися як із вилученням деталей із зони експлуатації, так і без цього. Зміцнення здійснюється шляхом прикладання напружень, рівень яких може досягати 0,9 від граничних (руйнівних) значень, як до початку експлуатації, так і безпосередньо під час неї, за рахунок зовнішніх механічних впливів (циклічних або статичних) із використанням спеціалізованих пристроїв.

У важконавантажених мостових кранах прогінні та кінцеві балки протягом усього терміну експлуатації працюють переважно в умовах циклічного згину. При цьому верхні пояси зони балок (пояси та прилеглі до них ділянки стінок) зазнають циклічних напружень стиску, тоді як нижні — напружень розтягу. У випадках, коли рівень напружень досягає границі текучості, що є характерним для реальних умов експлуатації металоконструкцій, відбувається зміцнення зовнішніх волокон стиснутої

зони, яке супроводжується стабілізацією кристалічної ґратки матеріалу. Це, своєю чергою, знижує ймовірність зародження та розвитку втомних тріщин у стиснутій зоні, що сприяє підвищенню її довговічності.

На основі аналізу існуючих методів подовження ресурсу циклічно навантажених деталей, а також результатів досліджень відмов і пошкоджень прогінних балок мостових кранів важкого класу, сформульовано гіпотезу щодо можливості подовження строку експлуатації елементів, які вже відпрацювали певну кількість циклів при знакопостійних або віднульових напруженнях розтягу чи стиску. Сутність гіпотези полягає у зміні знака циклічних напружень на протилежний при збереженні їх характеру (знакопостійного або віднульового). Передбачається, що за таких умов сумарна довговічність елемента може бути суттєво збільшена.

УДК 621.98

Козак Д.С.¹, Фролов Р.О.²

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ГЕОМЕТРІЇ ТА РОЗМІРІВ ЗРАЗКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ FDM-ДРУКУ

У дослідженнях впливу параметрів FDM-друку на механічні властивості виробів важливо забезпечити стабільність і повторюваність умов навантаження. Для цього необхідно використовувати зразок такої геометрії, що дозволяє мінімізувати вплив конструктивних особливостей деталі та зосередити увагу саме на впливі технологічних параметрів.

У даній роботі застосовано спеціально розроблений зразок, геометрія якого не відповідає стандартам ISO або ASTM, оскільки його форма адаптована під можливості обладнання та вимоги дослідження. Основною особливістю зразка є звужена робоча зона шириною до 8 мм, у якій навмисно створена контрольована концентрація напружень. Це забезпечує прогнозоване місце руйнування та зменшує вплив зон затиску на результати випробовування.

Плавні радіуси R25 формують м'який перехід між опорними частинами та центральною звуженою ділянкою. Така форма забезпечує стабільний характер деформації, запобігає випадковому перенесенню руйнування до місця закріплення та підвищує відтворюваність результатів. Торцеві частини з отворами призначені для надійного встановлення зразка у пристрої для випробувань та виключають додаткові паразитні напруження у робочій зоні.

Обрані розміри були підібрані з урахуванням можливостей 3D-принтера (діаметр сопла, висота шару, ширина лінії екструзії) та необхідності

формування однорідної структури матеріалу по всій довжині звуження. Геометрію зразка з основними параметрами наведено на рисунку 1.

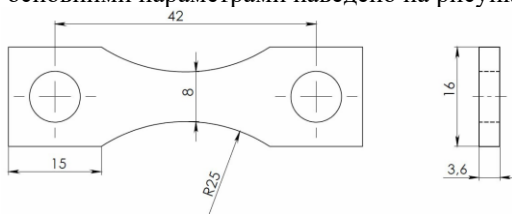


Рисунок 1 – Геометрія зразка з основними розмірами.

Таким чином, використання спеціально розробленого зразка зі звуженою робочою зоною забезпечує коректність і стабільність випробувань та дозволяє достовірно оцінити вплив ключових параметрів FDM-друку на механічні властивості виготовлених виробів.

УДК 621.762.793:669.15

Кононов В.В.¹, Махінов Ф.К.²

¹ канд. техн. наук, доцент НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-311 НУ «Запорізька політехніка»

НАДІЙНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ ГТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

Захисні покриття призначені не лише для підвищення робочих температур лопаток турбіни, які визначаються жароміцністю вживаних для їх виготовлення сплавів, а і для збільшення ресурсу і надійності роботи лопаток. Застосовуються вони вже більше 50 років. На першому етапі найбільшого поширення набули алюмінідні покриття. Просте алітування робочих і направляючих лопаток турбін дозволило збільшити ресурс газотурбінних двигунів приблизно в два рази при температурі 850 °С. Проте, ці покриття ефективні лише при такому типу корозії як високотемпературне окислення за рахунок утворення бар'єрного шару з оксиду алюмінію. Використання низькосортного палива різко знижує їх ефективність.

Алюмінідні покриття, леговані хромом, кремнієм, танталом, ніобієм і іншими елементами володіють вищою корозійною стійкістю в порівнянні з простим алітуванням, а також перевершують їх по термостабільності, пластичності і термосталостній міцності. Наносять їх на лопатки різними методами: дифузійним (у порошках з галогенідними активаторами і у вакуумі), шлікерним, металізацією і ін. Товщина їх знаходиться в межах

40...100 мкм. Ці покриття ефективні при використанні в газових турбінах високоякісного палива. В умовах інтенсивної окисульфідної корозії термін служби їх невеликий, оскільки інтерметаліди нікелю нестійкі у контакті з сульфатом натрію і в його суміші з хлоридом натрію.

Широкого поширення за кордоном набули алюмінідні покриття з підшаром з дорогоцінних металів (наприклад, платини або родію). До них можна віднести такі покриття, як LDC - 2, RT - 22, RT - 22A, RT - 44 і ін. Вони характеризуються високою стійкістю проти окисульфідної корозії. Товщина цих покриттів складає 70...80 мкм, основа NiAl, що містить алюмінід платини PtAl₂. Оскільки покриттям типу LDC - 2 властива пористість платинового шару, можливість концентрації забруднень на кордоні платини з підкладкою, розроблені вдосконалені покриття на їх основі JML - 1 і JML - 2. Шари платини, що входять в їх склад, формують з розплаву солей.

Поряд з алюмінідними застосовують і силіцидні покриття. Використовуються вони, в основному, в турбінах малої потужності з робочою температурою до 730 °С. Характеризуються вони великою крихкістю силіцидного шару, низькою температурою плавлення (985 °С) евтектики, що утворюється силіцидами нікелю, поганою термосталістю, погіршенням механічних властивостей основного металу через дифузію в нього кремнію. В зв'язку з цим вони модифікуються хромом і танталом.

Широке розповсюдження в газотурбобудуванні знайшли покриття, що отримуються осадженням у вакуумі. Вони відрізняються незалежною від підкладки, що захищається, структурою, володіють кращою жаростійкістю і особливо корозійною стійкістю, можливістю в широких межах варіювати їх хімічний склад, добиваючись мінімальної внутрішньої напруги на кордоні розділу покриття - основа.

Вдосконалення корозійних властивостей електронно-променевих покриттів здійснюється за рахунок ускладнення їх хімічного складу шляхом введення добавок кремнію, титану, платини, гафнію, танталу та ін. Композитні покриття, наприклад: двошарове, отримуване на початку шляхом електронно-променевого напилення шару Co - Cr - Al - Y (АТД - 2) завтовшки 100...140 мкм з подальшим його платинованням (товщина шару 4...8 мкм) гальванічним методом і відпадом при температурі 1080 °С протягом 4 годин у вакуумі або електронно-променеве нанесення сплаву Co - Cr - Al - Y, а потім - катодне напилення платини; двошарове із зовнішнім шаром, збагаченим кремнієм (10...50 мас. %), перший шар якого наноситься електронно-променевим методом Me - Cr - Al - Y (Hf) з подальшим нанесенням тим же або дифузійним методом шару кремнію.

Для надійного захисту зовнішньої поверхні робочих лопаток ефективно використовуються електронно-променеві покриття типу Co - Cr - Al - Y.

Проте, технологія їх нанесення не дозволяє наносити захисне покриття на вузькі внутрішні канали деталей. Тому як альтернативні тут можуть бути вибрані захисні покриття, а отже, і технологія їх нанесення, яка б дозволила їх повільне поєднування. В зв'язку з цим шлікерна (суспензійна) технологія нанесення захисних покриттів на внутрішню порожнину лопаток ГТУ має переваги перед іншими відомими способами, такими, наприклад, як нанесення покриттів з газової фази, в засипці з порошків.

В даний час двосторонній захист робочих лопаток ГТУ здійснюється за комплексною технологією, розробленою спільно з ІЕС ім. Е.О. Патона. Показано, що формування термодинамічно стабільних покриттів в складній багатокомпонентній системі ЖС - Пк (Cr - Al - Si - Ti) найефективніше здійснюється при температурі рівній або більшій температури перитектичної реакції (≈ 1130 °C). Показано, що при відносно нижчих температурах формування покриття (1080 °C, 4 годин), структура шлікерного покриття значно відрізняється від аналогічних з гетерогенною структурою і повністю відповідає класичній типу RT-22A. Встановлено, що міцнісні характеристики жароміцних сплавів при використанні комплексної технології захисту при температурах 800 і 850 °C не знижуються. Підвищення жаростійкості обумовлене сприятливим поєднанням компонентів і досконалою структурою покриття. Шлікерні покриття Cr - Al - Si - Ti з гетерогенною структурою шару ("високотемпературні") мають більш високу стійкість, ніж "низькотемпературні". Прогнозований термін служби робочих лопаток збільшується на 10 тис. годин при використанні двостороннього їх захисту за комплексною технологією.

УДК 004.89

Фролов Р.О.¹, Овсов А.М.²

¹ канд. техн. наук, старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-315сп НУ «Запорізька політехніка»

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В РОБОТІ ІНЖЕНЕРА-КОНСТРУКТОРА

Технології штучного інтелекту (ШІ) отримали досить широке розповсюдження в багатьох сферах життя і роботи людини. Особливо популярними останнім часом стали генеративні моделі штучного інтелекту, такі як Gemini, Grok, ChatGPT та інші. Їх застосування на практиці в роботі інженера-конструктора дозволяє автоматизувати рутинні задачі з заповнення супровідної документації та перевірки на відповідність нормативним документам. Основною перевагою цієї технології є те, що вона за лічені секунди знаходить необхідну інформацію, проаналізувавши всі можливі

варіанти формулювання запиту. Часто людина не здатна коректно сформулювати свою думку в запиті і в результаті отримує не той результат, на який розраховувала. Так само корисними технології ШІ стають у питаннях навігації, розпізнавання образів або вирішення задач з оптимізації.

Однак, слід зазначити, що ШІ має суттєві недоліки у вигляді неточностей, які виникають під час навчання на відкритих базах даних із сумнівних джерел. Для запобігання цьому, слід застосовувати компетентнісний підхід замість популярного, тобто навчання штучного інтелекту має бути зосереджене на фахових публікаціях з високим ступенем довіри до першоджерела а не на тих які мають найбільшу кількість відвідувань, переглядів або реакцій.

Також існує небезпека потрапляння під цензуру зацікавлених груп осіб, які мають власні інтереси і підлаштовують ШІ під себе, тим самим створюючи монополію на приховування або розкриття чутливої інформації для власної, економічної, політичної та ідеологічної вигоди. Наприклад, китайський ШІ заперечує незалежність держави Тайвань і привласнює її до своїх територій, таким самим трюком займається й американський ШІ, ставлячи під сумнів існування Палестини. Також відбувається освоєння штучно створених наукових даних та їх подання як достовірного джерела. Існує ризик зниження рівня конфіденційності внаслідок використання технологій штучного інтелекту. Зокрема, процеси навчання ШІ можуть супроводжуватися масштабним збором даних, що створює потенційні загрози обходу механізмів захисту, підбору паролів до облікових записів, а також визначення місцезнаходження пристроїв, пов'язаних з відповідними акаунтами.

Крім того, впровадження ШІ у різні сфери діяльності зумовлює суттєві соціально-економічні наслідки. Зокрема, спостерігається тенденція до скорочення робочих місць та перегляду доцільності їх існування. Це, своєю чергою, стимулює роботодавців до переоцінки ролі людських ресурсів і розгляду можливості їх часткової або повної заміни автоматизованими системами.

Важливою перевагою ШІ з позиції суб'єктів господарювання є відсутність витрат, пов'язаних із оплатою праці, дотриманням норм трудового законодавства, оподаткуванням, а також забезпеченням відпочинку. Водночас функціонування таких систем потребує відповідних енергетичних ресурсів та обчислювальних потужностей, зокрема необхідного обсягу пам'яті для обробки даних.

УДК 621.874:681.5

Сидоренко М.В.¹, Серова Д.А.², Кравченко С.О.³

¹ канд. техн. наук, доцент НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. МЗ-312 НУ «Запорізька політехніка»

³ асп. НУ «Запорізька політехніка»

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ МОСТОВИМ КРАНОМ ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 180/2×70 Т

Мостовий спеціальний кран вантажопідйомністю 180/2×70 т розроблено СПКТБ «Запоріжгідросталь». Це унікальний вантажопідймальний механізм, у якому практично виключено вплив людського фактору: робоче місце кранівника відсутнє, а керування може здійснюватися повністю в автоматизованому режимі.

У зв'язку з необхідністю завершення будівництва виробничого корпусу, в якому експлуатувався кран, його було введено в роботу в режимі дистанційного керування за допомогою радіопульта. За допомогою цієї системи було змонтовано основне технологічне обладнання об'єкта. Водночас у процесі експлуатації виявлено низку конструктивних особливостей, доопрацювання яких дозволяло суттєво підвищити ергономіку та ефективність роботи крана. У зв'язку з цим під час виконання пусконаладжувальних робіт було прийнято рішення щодо модернізації системи керування.

Позиціонування вантажозахоплювальних органів крана здійснювалося в декартовій системі координат x - y - z з точністю до ± 5 мм, що забезпечувало високоточне наведення вилки головного підйому вантажопідйомністю 180 т у будь-яку точку робочої зони. Разом із тим, перехід до криволінійної системи координат, у якій одна з осей прив'язана до профілю підвізкових рейкових шляхів, дозволив суттєво підвищити точність позиціонування.

Кран програмується на наведення до однієї з восьми заданих технологічних точок, при цьому абсолютні координати x - y - z не є визначальними. Додатково було виконано порівняльний аналіз алгоритмів зупинки крана в заданій точці. Встановлено, що використання фізичних констант, визначених експериментальним шляхом, дозволяє спростити алгоритмічну реалізацію та підвищити точність позиціонування. Таким чином, застосування більш детермінованих математичних моделей сприяло підвищенню надійності системи керування.

У процесі випробувань перевірено точність позиціонування в автоматичному режимі як з навантаженням, так і без нього, що підтвердило коректність прийнятих технічних рішень.

Система автоматичної реєстрації параметрів роботи крана була модернізована відповідно до чинних нормативних документів у сфері

безпеки експлуатації обладнання АЕС. Розділено функції системи зважування та системи обмеження вантажопідйомності. Для цього розроблено та впроваджено відповідні модулі та субблоки у складі системи керування крана.

Додатково впроваджено систему візуалізації положення вилки крана КМ 180/2×70, що підвищує точність виконання монтажних операцій та безпеку робіт.

Удосконалена система керування краном у поєднанні з розробленими алгоритмами стала прикладною основою для створення спеціалізованих систем керування під час реконструкції кранів кругової дії на атомних електростанціях України.

СЕКЦІЯ «ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ»

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.¹, Малкіна О.В.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² здобувачка НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ГАРЯЧОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ

Маса злитків складає від 200 кг до 350 т. Найбільше поширення мають злитки масою більше 1 т. Для кування застосовуються злитки багатогранні (найчастіше шести восьмигранні) або циліндричні. За способом виготовлення поковок розрізняють вільну ковку і гарячу об'ємну штампування.

Гаряче об'ємна штампування здійснюється з нагріванням до температури 200-1300 С в залежності від складу сплаву і умов обробки. Вихідний матеріал - прокатні прутки, розділені на мірні заготовки, рівні за обсягом майбутньої поковки (з урахуванням неминучих відходів), хоча іноді штампують і від прутка з подальшому відділенням поковки безпосередньо на штампувальній машині. Заготівлі відрізають від прутка різними способами: на кривошипних прес-ножицях, газовим різанням, тощо. Маса виробів від кількох грамів до 6-8 т; точність розмірів поковок залежить від їх маси і конфігурації і може бути підвищена подальшим холодним калібруванням; шорсткість поверхні відповідає 3-7-го класів чистоти.

Процес гарячого об'ємного штампування аналогічний з фізичної сутності вільному куванню, але здійснюється у штампах. Гарячим об'ємним штампуванням отримують поковки, однорідні за структурою, порівняно високої точності, складної конфігурації, якої неможливо домогтися при вільному куванні. Проте середній коефіцієнт використання металу при гарячого об'ємного штампування 0,5-0,6 (тобто до 50-40% металу йде у відхід), при холодному штампуванні цей коефіцієнт значно вищий.

Штампи для об'ємного штампування найчастіше складаються з 2 половин - верхньої і нижньої або з пуансона і матриці. Зазвичай при штампуванні на молотах і вертикальних пресах нижня частина штампа нерухома, а верхня рухома. Об'ємне штампування виконують у відкритих штампах з площиною роз'єму, перпендикулярної напрямку штампування, або в закритих штампах-з площиною роз'єму по периметру поковки. Відкритий штамп відрізняється простотою пристрою і універсальністю застосування, але гаряче штампування в ньому пов'язана з утворенням задирки, який забезпечує заповнення складного рельєфу порожнини штампа. Відход металу при цьому становить 5-20%, іноді досягає 50-80%. У закритих штампах,

застосовуваних при гарячої та холодної об'ємного штампування, задинок або дуже невеликий (не більше 1%), або зовсім відсутній, так як поковка формується з усього обсягу металу. Однак ці штампи менш універсальні, наприклад в них не можна отримувати поковки у формі кулі.

У тих випадках, коли потрібно отримати вихідні заготовки досить високої точності за обсягом, застосовують закриті штампи з компенсаторами - додатковими порожнинами, в які витікає надлишковий метал заготовки. Компенсатори розташовуються в такому місці штампі, в яке метал надходить в останню чергу, щоб запобігти передчасному і надмірне попадання металу в компенсатор. Однак цей спосіб неекономічний, так як метал, що надходить в компенсатор, йде у відхід. Іншим технологічним прийомом при гарячого об'ємного штампування є застосування штампувальних ухилів, які роблять в порожнині штампів з метою полегшення виштовхування готових виробів. Поковка виходить спотвореної форми, наприклад замість циліндра - усічений конус. Зазвичай в молотових штампах ухили 5-7. Надлишок металу на поковки (напуск) також є відходом. Для здійснення об'ємного штампування з меншим ухилом (1-2) в штампах застосовують виштовхувачі: при штампуванні на молотах - тільки нижні, на пресах - верхні і нижні.

Одним із раціональних рішень є гаряча об'ємна штампування в роз'ємних матрицях, тобто в штампах з 2 або декількома площинами роз'єму, найчастіше на горизонтально-кувальних машинах. Матриці цих штампів не мають ухилів, в них можна штампувати навіть поковки, що розширюються до дна матриці. У роз'ємних матрицях можна також вести штампування на гвинтових і кривошипних пресах. Кування для однієї і тієї ж деталі можна отримати методами гарячого об'ємного штампування як на молоті, так і на пресі. У цих двох випадках заготовки будуть зовні відрізнятися, мати різні припуски.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.¹, Бабічин В.В.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-815м НУ «Запорізька політехніка»

ВИРОБНИЦТВО ПРУТКІВ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ МЕТОДАМИ СОРТОВОГО ПРОКАТУВАННЯ

Обробка металів тиском є важливим технологічним процесом металургійного виробництва. При цьому забезпечується не тільки надання злитку або заготовці необхідної форми та розмірів, але й, у поєднанні з іншими видами обробки, істотне поліпшення механічних та інших властивостей металів.

Прокатка, волочіння, пресування, кування, штампування є різними видами обробки металів тиском у пластичному стані

Серед різних методів пластичної обробки прокатка займає особливе місце, оскільки цим способом виробляють вироби, придатні для безпосереднього (у стані поставки) використання в будівництві та машинобудуванні (шпунт, рейки, профілі сільськогосподарського машинобудування тощо). Прокатуванням отримують також різноманітні види заготовок, які є вихідним матеріалом для інших способів обробки. Так, гарячекатана та холоднокатана листова сталь, смуги та стрічки у великих кількостях йдуть для листового штампування. При куванні в штампах як вихідний продукт використовують переважно катану заготовку. Вихідним матеріалом при волоченні є катанка, що отримується на дровових станах. Величезне значення прокатного виробництва в народному господарстві підтверджується щорічним збільшенням випуску прокату. Через валки прокатних станів проходить 75–80 % усього виплавленого металу.

Розвиток прокатного виробництва ґрунтується на застосуванні принципу безперервності самого процесу та всіх технологічних операцій (прокатування, термічна обробка, обробка тощо). У цьому випадку велику роль відіграє впровадження досягнень обчислювальної техніки та автоматизації технологічних процесів на цій основі.

Поряд із безперервним зростанням прокатного виробництва розширюється асортимент, збільшується випуск ефективних металовиробів, таких як холоднокатаний лист, гнуті профілі, прокат із зміцнювальною термічною обробкою, високоміцні труби, у тому числі із захисними покриттями, розширюється випуск мідної катанки, алюмінієвої стрічки, фольги, тощо. Широкого розвитку набуває комплекс заходів щодо поліпшення споживчих властивостей прокату: міцності, пластичності, жаростійкості та холодостійкості, надійності та довговічності та інших шляхом легування, термічної обробки, лудіння, оцинкування, нанесення неорганічних та органічних покриттів тощо.

Висока продуктивність процесів обробки металів тиском, порівняно низька їхня енергоємність, а також незначні втрати металу під час виробництва виробів вигідно вирізняють їх у порівнянні, наприклад, з обробкою металу різанням, коли необхідну форму виробу отримують шляхом видалення значної частини заготовки у вигляді стружки. Істотною перевагою пластичної обробки є значне поліпшення властивостей металу в процесі деформування.

Динамічне і пропорційне зростання чорної та кольорової металургії, виробництво виробів з металів і сплавів методом пластичної обробки ґрунтуються на подальшому розвитку теорії обробки металів тиском, що є

науковою базою розробки технологічних операцій отримання виробів з металів і сплавів.

Теорія пластичної обробки металів дозволяє оцінити економічну доцільність обраного способу деформації, виявити вплив умов обробки на властивості виробів, що отримуються, визначити силові та енергетичні параметри процесу та вказати шляхи їх раціональної зміни, дає можливість керувати процесом обробки з точки зору поліпшення здатності металів пластично деформуватися. Знання закономірностей обробки металів тиском допомагає обирати найбільш оптимальні режими технологічних процесів, необхідне основне та допоміжне обладнання та технічно раціонально його експлуатувати.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.¹, Задорожний В.В.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-815м НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІЛЬНОГО КУВАННЯ НА ГІДРАВЛІЧНИХ ПРЕСАХ

У сучасному розвитку економіки України важливу роль відіграє розвиток металургійної галузі. Щороку збільшується обсяг виробництва на металургійних підприємствах країни. Сучасне машинобудування відчуває зростаючу потребу у виробництві великих поковок, вихідною заготовкою для яких служить злиток.

Найбільш універсальним способом виробництва деталей зі злитків є кування. Вільне кування – це процес, що забезпечує підвищення якості литого металу та отримання виробів необхідної форми. Багато металообробних підприємств мають у своєму складі цех або дільницю вільного кування. Вільне кування дозволяє отримувати заготовки та деталі масою від кількох кілограмів до сотень тон, розмірами від кількох сантиметрів до десятків метрів.

Кування на гідравлічних пресах є одним з основних способів виготовлення поковок, особливо в умовах індивідуального та дрібносерійного виробництва. На гідравлічних кувальних пресах виготовляється близько 17% (за масою) усіх поковок. Кування є поки що єдиною можливим способом отримання великогабаритних заготовок відповідального призначення: валів турбоагрегатів, колон гідравлічних пресів, ексцентрикових і колінчастих валів ковальсько-пресових машин, валків прокатних станів, дисків турбін, компресорів та інших. У деяких випадках кування використовують для виготовлення заготовок під подальше

гаряче штампування, а також для отримання поковок, що не потребують механічної обробки.

Основними напрямками розвитку сучасної технології кування є: підвищення точності та якості вироблених поковок, зниження витрати металу та трудомісткості їх виготовлення, збільшення продуктивності праці, вдосконалення організації ковальського виробництва. Гостро стоїть завдання комплексної механізації та автоматизації процесів вільного кування, повного виключення важкої ручної праці на всіх етапах виготовлення поковок.

Розробка раціонального технологічного процесу кування вимагає врахування стану та якості вихідного металу, підбору необхідної величини деформації, температурного поля зони деформації та відповідного інструменту, що забезпечує належну обробку металу.

УДК 621.771

Матюхін А.Ю.¹, Чабаненко В.В.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-815м НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ НЕДОЛІКІВ ІСНУЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОКАТУВАННЯ ЗЛИТКІВ НА СЛЯБІНГУ

На заводі «Запоріжсталь» ТОВ «МЕТІНВЕСТ-СМЦ» використовують порівняно сучасні технології прокатки слябів із підвищеним тепловим навантаженням, проте прокатка слябів здійснюється при коефіцієнті форми, що дорівнює 0,23...0,75, що відповідає прокатці товстих смуг; у цьому випадку пластична деформація не проникає на всю глибину перерізу, що призводить до значних нерівномірних деформацій перерізу, погіршення якості прокату, збільшення коефіцієнта витрат та сили прокатки. Такі технології є застарілими, у світовій практиці використовуються проривні технічні рішення, пов'язані з усуненням обтискних станів та заміною їх машинами безперервного розливу сталі або ливарно-прокатними агрегатами. З огляду на те, що це пов'язано з багатомільярдними витратами, на даний момент така конструкція є неможливою. Тому виникає необхідність у розробці нових технічних схем, що змінюють нерівномірність деформації по висоті перерізу.

Метою нової технології є більш глибока обробка перетину заготовки з усіма пов'язаними з цим позитивними наслідками для виробництва. Пропонується збільшити захоплюючу здатність валків за рахунок більш сприятливого силового та кінематичного впливу на смугу, що має місце під час стабілізованого процесу прокатки. Пропонується в першому проході на основі максимального захвату обтиснути кінцеву ділянку не на значну

довжину, реверсувати валки, і потоншений кінець обтиснути на 0,3 величини кута захвату початкового моменту. Надалі прокатку проводити без зупинки та реверсу, що забезпечить збільшення кута стиснення на 1,3 кута захвату на решті не деформованої смуги.

УДК 621.77.01

Бень А.М.¹, Арцибашева Д.Д.²

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-815м НУ «Запорізька політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ

Гаряче штампування є одним з інноваційних процесів виробництва, який може виготовляти складні конструкційні компоненти з надвисокоміцної сталі.

Чисельне моделювання стало незамінним для проведення швидких розрахунків. Існують різні програмні продукти для його виконання. Більшість інженерних програм базується на моделюванні методом скінченними елементами (МСЕ) для прогнозування розподілу мікроструктури та механічних властивостей деформованої сталі.

Моделювання МСЕ є надійним лише за умови пов'язаних теплових, механічних та металургійних процесів. Штампи повинні бути спроектовані таким чином, щоб забезпечити ефективне охолодження та отримання однорідного розподілу температури на поверхні заготовки, що деформується. Однак досі комбіновані методи чисельного моделювання, що враховують систему охолодження не застосовуються.

Гаряче штампування – це термомеханічний процес формування. Для опису пластичної деформації металу в симуляції необхідне знання нелінійної, залежної від температури, функції зміцнення. Випробування на гарячий розтяг проводяться на горизонтальній системі гарячого розтягу при різних температурах та швидкостях деформації.

Дослідники описують взаємодію між механічним полем, тепловим полем та еволюцією мікроструктури. Для аналізу впливу параметрів обробки гарячого штампування та забезпечення числового інструменту для проектування штампів гарячого штампування розроблено новий систематичний числовий метод моделювання пов'язаного процесу. Досліджуються ключові температурно-залежні механічні та теплові властивості.

Для оцінки достовірності пов'язаного числового методу використовується історія зміни температури та пружній зворотний зв'язок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Akerstom P., Bergman G., Oldenburg M. Numerical implementation of a constitutive model for simulation of hot stamping, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Volume 15, Nr. 2, 2017. DOI: 10.1088/0965-0393/15/2/007.

2. Ye Li, Liang Ying, Ping Hub, Dongyong Shi, Xi Zhao and Minghua Dai. Coupled numerical simulation of hot stamping process and experimental verification, *The 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, 2013. Doi: 10.1063/1.4806863.

УДК 621.77.07

Бень А.М.¹, Леденьов Д.В.²

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-815м НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТОЧНОГО ВІДКРИТОГО ТА ЗАКРИТОГО ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ

Гаряче об'ємне штампування є одним із найбільш ефективних методів виготовлення точних металевих заготовок складної форми. Головна різниця між методами відкритого і закритого штампування полягає у ступені обмеження течії металу стінками штампа та наявності облою - надлишку матеріалу, що витікає у спеціальну щілину на лінії роз'єму штампу.

Закрите штампування є оптимальним для серійного виробництва складних прецизійних деталей. Хоча вартість виробу формується під впливом типу сплаву, жорсткості допусків та потреби в термічній обробці, цей метод гарантує високу точність і мінімізує витрати на подальшу механічну обробку.

Натомість відкрите штампування пропонує більшу гнучкість у роботі з різними габаритами - від простих форм до масивних балок і труб. Завдяки вільному переміщенню металу в матрицях, цей метод дозволяє виготовляти як одиничні замовлення, так і великі партії для стратегічних галузей: аерокосмічної, військової та енергетичної.

У традиційному процесі штампування в відкритому штампі, завдяки конструкції зони облою та обмеженню потоку в бічному напрямку, порожнина штампа легко заповнюється матеріалом. Однак цей процес призводить до втрат матеріалу через облою та вимагає використання подальшого процесу обробки. Коли втрати матеріалу та процес обробки мінімізуються, можна виготовляти точні штамповані вироби з високою доданою вартістю. Крім того, високе штампувальне навантаження, необхідне

для отримання облою, може негативно впливати на штамп. Тому необхідні дослідження процесу точного безоблойного штампування.

Під час виробництва кінцевого продукту за допомогою звичайного штампування в відкритому штампі викидається близько 30% вихідної заготовки. Більш конкурентоспроможні вироби будуть вироблятися, якщо зменшити кількість облою та покращити точність розмірів виробу.

Сучасний стан розвитку світового машинобудування характеризується жорсткою конкуренцією, що вимагає безперервної оптимізації технологічних циклів, то ж порівняльний аналіз методів відкритого та закритого гарячого штампування є стратегічно важливим завданням для забезпечення технологічного суверенітету та високої рентабельності виробництва.

Впровадження прогресивних методів обробки металів тиском дозволяє розв'язати проблему раціонального використання сировинних ресурсів. У той час як безоблойне штампування забезпечує високу технологічну гнучкість, перехід до закритих схем деформування та дозволяє досягти показників коефіцієнта використання металу, близьких до одиниці. Це критично важливо при роботі з титановими сплавами, жароміцними сталями та іншими високовартісними матеріалами.

УДК 621.777:621.882

Єпішкін О.В.¹, Прохоренко А.П.²

¹ асист. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-815м НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ХОЛОДНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ ВИСОКОМІЦНОГО КРІПЛЕННЯ

Холодне видавлювання є одним із найбільш ефективних та високопродуктивних методів виготовлення високоміцних кріпильних деталей, таких як болти, гвинти та шпильки. Головна перевага цього процесу перед механічною обробкою полягає у збереженні неперервності макроструктури (волокон) металу та його деформаційному зміцненні, що критично підвищує втомну міцність і надійність виробу під час експлуатації.

Використання технологій холодного пластичного деформування є оптимальним для масового та великосерійного виробництва. Хоча початкові витрати на проектування технології та виготовлення штампового оснащення є високими, цей метод гарантує високу точність розмірів, відмінну якість поверхні та дозволяє досягти коефіцієнта використання металу, близького до одиниці, зводячи до мінімуму утворення відходів.

Натомість процес холодного формоутворення характеризується високими питомими зусиллями деформування та значними контактними

напруженнями. Під час формування головки або редукування стержня кріплення на формотворчий інструмент (пуансони та матриці) діють екстремальні навантаження, що створює ризики його передчасного зношення, пластичного зминання або навіть втомного руйнування.

У традиційному циклі проектування технологій обробки металів тиском відпрацювання геометрії інструменту та визначення оптимальних ступенів деформації часто відбувалося методом "спроб і помилок". Це призводило до значних фінансових втрат. Сьогодні для уникнення цих проблем та прискорення підготовки виробництва раціонально використовувати комп'ютерне моделювання на базі сучасних CAE-систем, зокрема програмного комплексу QForm.

Аналіз напружено-деформованого стану (НДС) заготовки та інструменту дозволяє візуалізувати зони критичних напружень та оцінити характер течії металу ще на етапі проектування. Завдяки моделюванню можна з високою точністю спрогнозувати ймовірність появи внутрішніх або поверхневих макродефектів, а також розрахувати енергосилові параметри для правильного вибору пресового обладнання.

Сучасний стан розвитку автомобілебудування та важкого машинобудування вимагає безперервного вдосконалення процесів виготовлення відповідального кріплення класів міцності 10.9 та 12.9. Тому глибокий аналіз НДС та оптимізація кутів робочої зони матриці, швидкості деформування і умов тертя є стратегічно важливим завданням для забезпечення високої якості продукції.

Впровадження результатів комп'ютерного аналізу в реальне виробництво дозволяє розв'язати проблему низької стійкості інструменту. Перехід від емпіричних розрахунків до точного прогнозування напружено-деформованого стану забезпечує створення бездефектних технологій холодного видавлювання, що підвищує загальну рентабельність та технологічну конкурентоспроможність підприємства.

УДК 517.9+537.311.322

Онуфрієнко В.М.¹, Килимник І.М.², Слюсарова Т.І.³

¹ д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ асист. НУ «Запорізька політехніка»

ДИФЕРЕНТЕГРАЛЬНІ РІВНЯННЯ НЕПЕРЕРВНОСТІ ПУАССОНА У ФРАКТАЛЬНИХ МОДЕЛЯХ P-N ПЕРЕХОДІВ

При дії на напівпровідники деяких зовнішніх факторів виникає ненульова упорядкована швидкість носіїв зарядів. При цьому, у напівпровіднику, звичайно порушуються стани термодинамічної рівноваги [1].

1. У напівпровідниках з фрактальними неоднорідностями рух носіїв змінюється під дією електричного поля або різниці потенціалів, а це змінює дрейфові струми, що виникають.

Якщо подіяти на фрактально неоднорідний напівпровідник електричним полем E , то на фоні хаотичного руху носіїв виникає α -характеристика швидкості дрейфу ${}_a D_{x_i}^\alpha v(x) d^\alpha x$, де дробовий диференціал

$$d^\alpha x = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \frac{dx}{(t-x)^{1-\alpha}}, \quad \text{що пов'язаний з дробовою похідною}$$

$$d^\alpha L(x) = {}_a D_{x_i}^\alpha L(x) d^\alpha x, \quad {}_a D_{x_i}^\alpha L(x) \text{ використовується у формі Рімана-Ліувілля [2].}$$

Густина (струм на одиницю фрактального відрізка) дрейфових струмів електронів і дірок пропорційна концентраціям та α -характеристикам швидкості [3] дрейфу $j_n^{(\alpha)} = q n D^\alpha(v_n)$; $j_p^{(\alpha)} = q p D^\alpha(v_p)$. З урахуванням рухливості електронів і дірок α -характеристики пов'язані з електричним полем E , отже $j_n^{(\alpha)} = q n \mu_n D^\alpha E$; $j_p^{(\alpha)} = q p \mu_p D^\alpha E$.

2. За рахунок руху носіїв заряду у фрактальному середовищі змінюється їх просторова неоднорідність концентрації, на фоні хаотичного теплового руху (фрактального броунівського) спостерігається направлене перенесення носіїв з області високої концентрації в область з низькою концентрацією, що впливає на виникнення дифузійних струмів $j_n^{(\alpha)}_{dif} = q n dif_n D^\alpha(n)$, $j_p^{(\alpha)}_{dif} = -q n dif_p D^\alpha(p)$, які є пропорційними градієнтам концентрацій носіїв з коефіцієнтами дифузії електронів $D^\alpha(n)$ і дірок $D^\alpha(p)$.

Таким чином рівняння переносу для електронів та дірок у фрактально конфігурованому напівпровіднику маємо у вигляді

$$\begin{aligned} j_n^{(\alpha)} &= q \cdot n \cdot \mu_n \cdot D^\alpha E + q \cdot \text{dif}_n \cdot D^\alpha n, \\ j_p^{(\alpha)} &= q \cdot p \cdot \mu_p \cdot D^\alpha E - q \cdot \text{dif}_p \cdot D^\alpha p. \end{aligned} \quad (1)$$

У двох рівняннях переносу (1) для фрактального напівпровідника невідомими є нестационарні концентрації електронів $n(x,t)$ і дірок $p(x,t)$, густини струмів $j_n^{(\alpha)}(x,t)$, $j_p^{(\alpha)}(x,t)$ та поле E .

До системи цих рівнянь з п'ятьма невідомими вводимо рівняння неперервності, а третім рівнянням може бути рівняння Пуассона.

3. Для урахування збереження числа частинок в одиниці фрактального об'єму та умови фрактальної неперервності потоків електронів і дірок вводимо у розгляд рівняння неперервності в диференціальній формі з просторовим стоко-джерелом $(-1)^\alpha D^\alpha \sigma$ на осі розглядаємо у вигляді $\text{div}^\alpha J + D_t^\beta \rho = (-1)^\alpha D^\alpha \sigma$, де J - густина потоку, ρ - густина заряду, вклад у потік стоко-джерела (за значень $\alpha = 1$ потік від'ємний (стік); додатний потік (джерело), коли $\alpha = 1$). Таким чином, можна досліджувати застосування рівняння неперервності в диференціальній формі як для опису процесів в точці, так і для будь-якої скінченної області. Значення показників β та α пов'язані з фрактальними відповідно у часі і просторі властивостями напівпровідникового середовища.

Рівняння неперервності для електронів та дірок мають відповідно види

$$\begin{aligned} D_t^\beta(n) &= \frac{1}{q} D_x^\alpha(j_n) + G_n - R_n; \\ D_t^\beta(p) &= -\frac{1}{q} D_x^\alpha(j_p) + G_p - R_p, \end{aligned} \quad (2)$$

де G - темп генерації нерівноважних носіїв, R - темп рекомбінації.

4. Рівняння Пуассона зв'язує розподіл поля E або потенціалу $\phi(x)$ з розподілом густини заряду $\rho(x)$:

$$D_x^\alpha(E) = -\frac{d}{dx} D_x^\alpha(\phi) = \frac{D_x^\alpha \rho(x)}{\epsilon \epsilon_0}. \quad (3)$$

Для фрактального напівпровідника для дослідження переходів розглядаємо густина заряду у вигляді

$$D_x^{\alpha} \rho(x) = q[p(x) - n(x) + N_D(x) - N_A(x)], \quad (4)$$

де $N_{D(A)}$ позначає кількість донорних і акцепторних частинок.

Рівняння з α – характеристиками фрактального напівпровідника показують можливість застосування наведеної моделі для вивчення явищ аномальної дифузії, коли частинки у фракталах рухаються не за гаусівським розподілом (зокрема, у нафтових пластах, для аналізу фільтрації рідини в пористому ґрунті або розгалужених кровосудинах).

Модель застосовна для розгляду характеристик, електричних і механічних імпедансів фрактально конфігурованого наносередовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sze S.M., Kwok K.Ng. Physics of Semiconductor Devices. New York: Wiley-Interscience Publ. 2007. 815 p.
2. Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J. Theory and Applications of Fractional Differential Equations. Elsevier, Amsterdam. 2006. 523 p.
3. Onufriyenko V.M. Physical and Geometric Interpretation of α - Characteristics. Telecommunication and Radio Engineering. 1991. Vol.53, No. 4-5. P. 136-139.

УДК 517.9

Онуфрієнко В.М.¹, Антоненко Н.М.², Фасоляк А.В.³

¹ д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ФРАКТАЛЬНИЙ ПРИПОВЕХНЕВИЙ ШАР: УЗАГАЛЬНЕННЯ КЛАСИЧНОГО ПРОСТОГО І ПОДВІЙНОГО ШАРІВ ТИПУ ГЕЛЬМГОЛЬЦЯ, ГУЇ-ЧЕПМЕНА ТА ШТЕРНА

Подвійний шар на контакті між імплантатом та рідинами організму складається з шару електронів (якщо неелектролітична фаза є металом або електронним провідником), шару адсорбованих іонів та дифузного подвійного шару з іонною атмосферою, де іони зі знаком, протилежним до поверхні електрода, присутні в надлишку порівняно з об'ємом [1].

Для кількісного опису розглядаємо фізико-геометричну модель фрактального шару і поширюємо результати дослідження на три класичні моделі (Гельмгольца, Гуї-Чепмена та Штерна), які описують фундаментальну поведінку іонів біля поверхні шару. Класичним підходом ігноруються ключові фактори, якими є іон-іонні кореляції, стеричні ефекти,

перекриття іонів, що і призводить до невідповідностей результатів розрахунків з експериментальними даними.

Введенням диферінтегралів в опис фрактальних множин ураховуємо наявність в точках шару неінтегровної густини кластерів з зарядами (струмами), імпедансу та ємності фрактально конфігурованого компакту з наявною локалізацією поля у тонкому шарі поверхні, що характеризується глибиною проникнення і законом розподілу струмів (деформацій).

Диферінтеграл $d^\alpha x = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \frac{dx}{(t-x)^{1-\alpha}}$ та його зв'язок 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 далі у формі Рімана-Ліувілья [2].

Відомі поняття з класичної теорії потенціалу для простого $\varphi(r) = \int_S G(r, r') \sigma(r') dS'$ та подвійного $\varphi(r) = \int_S \frac{\partial G(r, r')}{\partial n'} \eta(r') dS'$ шарів (де $G(r, r')$ - функція Гріна, $\sigma(r')$ - густина заряду, $\eta(r')$ - дипольна густина, S - гладка поверхня) після вводу фрактальної конфігурації зарядів і 2^α - полів зводимо до розгляду α - характеристики потенціалу у вигляді

$$\varphi(r, \alpha) = \int_{S_{fr}} D_r^\alpha G(r, r') D_{r'}^\beta \rho_{fr}(r') dS_{fr}, \quad (1)$$

що при значеннях $\alpha = 0; \beta = 0$ перетворюється в формулу потенціала для простого шару; при $\alpha = 1; \beta = 0$ - описує подвійний шар, а для інших значень скейлінгового показника – формулу стоко-джерельного потенціалу (за рахунок стоко-джерельної функції Гріна $D_r^\alpha G(r, r')$).

Розглядається альтернативна строга задача про заходження характеристик потенціалу з рівняння Пуассона

$$\frac{d}{dx} D_x^\alpha (\varphi) = - \frac{D_x^\alpha \rho_{fr}(x)}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (2)$$

Зазначеним підходом структурно адаптовано компактний шар іонів, що використовувався у моделі Гельмгольца, до дифузного шару моделі Гуї-Чепмена, що простягається в об'єм середовища. Таким чином ураховується факт про скінченний (а не точковий) фрактальний характер розмірів частинок, як у моделі Штерна.

Розрахунковим експериментом на рівнянні типу (2) підтверджено значний вплив фрактального розподілу частинок на характеристичні відстані, потенціал, розподіл щільності зарядів, диферінтегральну ємність розглядуваного шару.

Фракталізація подвійного шару, що супроводжується застосуванням апарату дробового інтегрування зі степенною залежністю фізичних параметрів (частоти, проникності, провідності, напруження, деформації) від величини скейлінгу α , демонструє також можливість прогнозування перебігу аномального скін-ефекту в умовах координатної зміни скейлінгового показника $\alpha(x)$, що значно розширює використання розвиненої теорії для проєктування імпедансів пристроїв мікроелектроніки і механіки, що функціонують на основі або всупереч скін-ефекту, має величезний вплив на аналіз та моделювання електричних взаємодій імплантатів з біосистемою.

Можливе узагальнення підходу для послідовних, паралельних, та послідовно-паралельних комбінацій доменних областей для покриття складної границі області визначення поля.

Результати моделювання для фрактальних меж областей збігаються з відомими даними [3].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gongadze E., Petersen S., Beck U., van Rienen U. Classical models of the interface between an electrode and an electrolyte. *Comsol Conference* (Milano, October 2009). URL: <https://www.comsol.com/paper/classical-models-of-the-interface-between-an-electrode-and-an-electrolyte-6594> (дата звернення: 13.04.2026).

2. Samko S.G., Kilbas A.A., Marichev O.I. Fractional Integrals and Derivatives: Theory and Applications. Yverdon : Gordon and Breach Science Publisher, 1993. 1016 p.

3. Онуфрієнко В. М. Електромагнітні приповерхневі властивості фрактально структурованих металів. *Вісник ДНУ*. 2008. Т. 16, № 2/1. С. 150–157.

УДК 517.9

Онуфрієнко В.М.¹, Засовенко А.В.², Слюсарова Т.І.³

¹ д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

³ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

³ асист. НУ «Запорізька політехніка»

ДИФЕРЕНТЕГРАЛЬНІ СТОКО-ДЖЕРЕЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ У РІВНЯННЯХ ЧЕПМЕНА-КОЛМОГорова

Останніми роками поняття дробового інтеграла та похідної активно застосовуються у багатьох областях фізики, механіки, математичної біології, моделюванні стохастичних процесів.

Для опису фрактальних розподілів імовірностей і формулювання рівняння Чепмена-Колмогорова застосовуємо диферентеграли зі змінним

порядком $d^{\alpha(t)}t = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \frac{dt}{(t-t')^{1-\alpha(t)}}$, що пов'язані зв'язком з дробовою похідною $d^{\alpha(t)}L(t) = {}_aD_t^{\alpha(t)}L(t)d^{\alpha(t)}t$, де дробова похідна ${}_aD_t^{\alpha(t)}L(t)$ використовується у формі Рімана-Ліувілля [1]

$${}_aD_t^{\alpha(t)}L(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha(t))} \frac{d}{dt} \int_a^t \frac{L(t')}{(t-t')^{\alpha(t)}} dt'. \quad (1)$$

Визначаємо диферінтегральні характеристики [2] (швидкості зміни) імовірності

$$D^{\alpha(t)}P_{i,j}(t) = D^{\alpha(t)}P\{X(t) = j \mid X(0) = i\}, \quad (2)$$

того, що марковський процес $\{X(t); j \mid t \geq 0\}$ знаходиться в j -стані такий час, що $X(0) = i$.

Для стану на час s маємо

$$\begin{aligned} D^{\alpha(t)}P_{i,j}(t) &= \sum D^{\alpha(t)}P\{X(t) = j, X(s) = k \mid X(0) = i\} = \\ &= \sum D^{\alpha(t)}P\{X(s) = k \mid X(0) = i\} D^{\alpha(t)}P\{X(t) = j \mid X(s) = k\}. \end{aligned} \quad (3)$$

З урахуванням того, що залишковий час до наступного переходу є експоненціальним зі швидкістю ν_k , а процес з початком в s в стані k статистично ідентичний тому, що починається з часу 0 в стані k , для будь-якого $0 \leq s \leq t$ виконується

$$D^{\alpha(t)}P\{X(t) = j \mid X(s) = k\} = D^{\alpha(t)}P_{kj}(t-s). \quad (4)$$

Таким чином, маємо рівняння Чепмана-Колмогорова для α -характеристик імовірностей марковського процесу

$$D^{\alpha(t)}P_{ij}(t) = \sum_k D^{\alpha(t)}P_{ik}(s) D^{\alpha(t)}P_{kj}(t-s). \quad (5)$$

Диференціальні рівняння Колмогорова в α -характеристиках отримуємо з урахуванням того, що за малих $t-s$ можливий вираз $P_{kj}(t-s)$ через $(t-s)q_{kj} + o(t-s)$, $k \neq j$; так само для $P_{jj}(t-s)$ є зв'язок $1 - (t-s)\nu_j + o(s)$. Отже,

$$D^{\alpha(t)}P_{ij}(t) = \sum_{k \neq j} [D^{\alpha(t)}P_{ik}(s)(t-s)q_{kj}] + D^{\alpha(t)}P_{ij}(s)[1 - (t-s)\nu_j + \frac{o(s)}{s}]. \quad (6)$$

Після віднімання в (6) з обох сторін $P_{ij}(s)$, ділення на $(t-s)$ у границі при $(s \rightarrow t)$ маємо рівняння Колмогорова

$$\frac{d}{dt} D^{\alpha(t)} P_{ij}(t) = \sum_{k \neq j} (D^{\alpha(t)} P_{ik}(t) q_{kj}) - D^{\alpha(t)} P_{ij}(t) v_j. \quad (7)$$

В одержаному диференціальному рівнянні у правій частині записано різницю α – характеристик (швидкостей) переходів в j – стан за t та переходів за станом j ; ця різниця є швидкістю, з якою $D^{\alpha(t)} P_{ij}(t)$ змінюється у часі.

У фрактальних процесах, що у багатьох випадках є моделями для опису аномальних процесів (немарковських, пам'яттєвих, суб- та супердифузії у фактально конфігурованому середовищі), алгоритм може бути заснованим на інтегральному варіанті рівнянь Чепмена-Колмогорова із введенням пам'яттєвим ядром та диференціалом (порів. з [3]) зі змінним порядком $\alpha(t)$

$$P(x, t | x_0, 0) = \int_0^t d\tau \int P(x, t | x', \tau) P(x', \tau | x_0, 0) d^\alpha x'. \quad (8)$$

Завдяки створенню математичних моделей підвищеної інформаційної складності і розмірності відкривається можливість для формування і накопичення нових знань, зокрема, про кібератаки і особливості кібертероризму. На базі наведеного методу можна створити нові методи інтелектуальної оцінки кіберстійкості інформаційної інфраструктури, засоби інтелектуального розпізнавання кіберзагроз в умовах наростаючої динаміки числа впливів, а також розробити нові технології керування явищами безпеки для успішної протидії кібератакам, кібертероризму та забезпечення потрібного рівня кібербезпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kilbas A.A., Srivastava H.M., Trujillo J.J. Theory and Applications of Fractional Differential Equations. Elsevier, Amsterdam, 2006. 523 p.
2. Onufriyenko V.M. Physical and Geometric Interpretation of α - Characteristics. Telecommunication and Radio Engineering. 1991. Vol.53, No. 4-5. P. 136-139.
3. Онуфрієнко В., Килимник І., Слюсарова Т., Зіненко І. Диференціальна модель фрактального хвильового трансформатора. Grail of Science. 2024. №36. С. 282-286.
4. Tarasov V.E. Fractional Chapman-Kolmogorov equation. Modern Physics Letters B. 2007. Vol.21, No4. P.163-174.

**ПРО ОДИН ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ДВОВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ
ТЕРМОПРУЖНОСТІ ДЛЯ ДВОШАРОВОЇ ОСНОВИ З ГЛАДКИМ
КОНТАКТОМ МІЖ ШАРАМИ**

Розглянемо двошарову основу, що представляє собою два однорідних, невагомих та ізотропних шари, що лежать на абсолютно жорсткій півплощині. Контакт між шарами гладкий. У кожному шарі введемо локальну декартову систему координат $O_j x z_j$, $j=1,2,3$ (рис. 1).

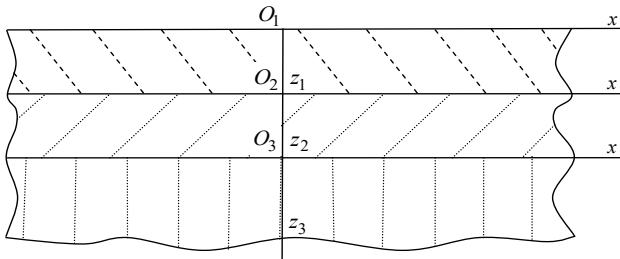


Рисунок 1 – Двошарова основа

Умови на верхній межі основи:

$$\sigma_{z1}(x,0) = \sigma(x), \quad \tau_{xz1}(x,0) = 0, \quad T_1(x,0) = f(x). \quad (1)$$

Умови на межі другого шару та півплощини:

$$w_2(x, h_2) = 0, \quad T_2(x, h_2) = 0. \quad (2)$$

Умови на спільних межах шарів:

$$w_2(x,0) = w_1(x, h_1), \quad \sigma_{z2}(x,0) = \sigma_{z1}(x, h_1), \quad (3)$$

$$\tau_{xz2}(x,0) = 0, \quad \tau_{xz1}(x, h_1) = 0, \quad (4)$$

$$k_{T2} \frac{\partial T_2}{\partial z}(x,0) = k_{T1} \frac{\partial T_1}{\partial z}(x, h_1), \quad T_2(x,0) = T_1(x, h_1). \quad (5)$$

Необхідно визначити компоненти термо-напружено-деформованого стану для усіх точок основи.

Задача розв'язується з допомогою інтегрального перетворення Фур'є. У просторі трансформант Фур'є компоненти напружено-деформованого стану j -го шару можна подати у вигляді комбінації таких функцій [1]:

$$\alpha_j(\xi) = \bar{\sigma}_j(\xi, 0), \quad \beta_j(\xi) = 2\mu_j \omega_j p \bar{w}_j(\xi, 0), \quad \eta_j(\xi) = \bar{T}_j(\xi, 0), \quad \varepsilon_j(\xi) = \frac{1}{p} \frac{d\bar{T}_j}{dz}(\xi, 0),$$

де $p = |\xi|$, ξ – параметр інтегрального перетворення, $j = 1, 2$.

Застосовуючи інтегральне перетворення Фур'є до крайових умов (1), (2) та умов на спільній межі шарів (3)-(5), отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно $\beta_1, \varepsilon_1, \alpha_2, \beta_2, \eta_2, \varepsilon_2$:

$$2F_1 \alpha_2 = (2p_1 + \text{sh } 2p_1) \alpha_1 + (\text{ch } 2p_1 - 1 - 2p_1^2) \beta_1 - \alpha_{T1} \mu_1 r_1 (2p_1^2 - \text{ch } 2p_1 + 1) \eta_1,$$

$$2F_1 \beta_2 = d_1 ((\text{ch } 2p_1 - 1) \alpha_1 + (\text{sh } 2p_1 + 2p_1) \beta_1 + \\ + \alpha_{T1} \mu_1 (p_1 \text{sh } 2p_1 + (1 - p_1 r_1)(\text{ch } 2p_1 - 1)) \eta_1),$$

$$\eta_2 = (\text{ch } p_1 - r_1 \text{sh } p_1) \eta_1, \quad \varepsilon_2 = -r_2 \eta_2, \quad \varepsilon_1 = -r_1 \eta_1,$$

$$(\text{ch } 2p_2 - 1) \alpha_2 + (\text{sh } 2p_2 + 2p_2) \beta_2 + \\ + \alpha_{T2} \mu_2 (p_2 \text{sh } 2p_2 + (1 - p_2 r_2)(\text{ch } 2p_2 - 1)) \eta_2 = 0,$$

$$\text{де } r_2 = \text{cth } p_2, \quad r_1 = \frac{\Delta_1 \text{sh } p_1 + r_2 \text{ch } p_1}{\Delta_1 \text{ch } p_1 + r_2 \text{sh } p_1}, \quad d_1 = \frac{\mu_2 \omega_2}{\mu_1 \omega_1}, \quad \Delta_1 = \frac{k_{T1}}{k_{T2}}, \quad F_1 = S_1 + p_1 C_1,$$

$$p_j = p h_j, \quad j = 1, 2.$$

Знайдені вирази для $\alpha_j(\xi)$, $\beta_j(\xi)$, $\eta_j(\xi)$, $\varepsilon_j(\xi)$ підставляємо в вирази для трансформант компонент термо-напружено-деформовано деформованого стану та застосовуємо до них обернене перетворення Фур'є.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Антоненко Н. М. Застосування перетворення Фур'є до задачі термопружності для шару на жорсткій півплощині за відсутності дотичних напружень на його межах. Тиждень науки-2025. Машинобудівний факультет : зб. тез доп. щоріч. наук.- практ. конф. (Запоріжжя, 14-18 квітня 2025 р.). Електронні дані. Запоріжжя, 2025. С. 107–108.

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ВИКЛАДАННЯ ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ В ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ: ПОТЕНЦІАЛ МОДЕЛІ FLIPPED CLASSROOM

Сучасні умови розвитку вищої освіти змушують нас по-новому подивитися на підходи до викладання фундаментальних дисциплін, зокрема вищої математики. Традиційна модель навчання, яка тривалий час залишалася домінантною, дедалі частіше не відповідає потребам студентів технічних спеціальностей. Вона орієнтується переважно на передачу теоретичних знань, тоді як сучасний ринок праці вимагає від майбутніх інженерів уміння застосовувати математичний апарат у практичних ситуаціях, мислити критично та самостійно розв'язувати складні задачі. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах дистанційного навчання та обмежень, пов'язаних із воєнним станом, коли необхідно забезпечити не лише безперервність освітнього процесу, а й його якість.

Модель flipped classroom («перевернутого класу») є одним із ефективних інструментів оновлення навчального процесу [2; 3]. Її суть полягає в тому, що студенти опановують теоретичний матеріал самостійно, використовуючи цифрові ресурси, а навчальний час із викладачем присвячують активній роботі: обговоренню, аналізу, розв'язанню задач і застосуванню знань на практиці. Такий підхід дозволяє змінити саму логіку навчання: від пасивного сприйняття інформації – до активної взаємодії з нею.

Організація навчального процесу за цією моделлю потребує ретельного планування [1]. За кілька днів до заняття студентам надаються навчальні матеріали: короткі відеолекції, конспекти, приклади розв'язання задач, додаткові пояснення. Вони повинні бути максимально доступними, структурованими й такими, що не перевантажують студентів. Це дає їм можливість працювати у власному темпі, повертатися до складних моментів і формувати базове розуміння теми ще до заняття.

Під час синхронної роботи вже не витрачається час на детальне пояснення теорії. Натомість коротке обговорення дозволяє з'ясувати, наскільки добре студенти засвоїли матеріал. Для швидкої оцінки ситуації використовуються невеликі тести або усні запитання. Після цього розбираються типові помилки та складні моменти, які виникли під час самостійної роботи. Такий етап допомагає вирівняти рівень підготовки та підготувати студентів до більш складної діяльності.

Основну частину заняття ми присвячуємо розв'язанню задач, причому добираються приклади, пов'язані з майбутньою професійною діяльністю

студентів. Робота часто відбувається в групах, що стимулює обговорення, обмін ідеями та розвиток комунікативних навичок. При цьому не просто контролюється процес, а відбувається активна взаємодія зі студентами, ставляться запитання, шукаються різні способи розв'язання. Важливо, що студенти починають не боятися помилок, а сприймають їх як природну частину навчання.

Завершується заняття короткою рефлексією. Студентам пропонується оцінити, що було зрозумілим, що викликало труднощі, які питання залишилися відкритими. Такий підхід допомагає не лише закріпити матеріал, а й формує навички самоаналізу, які є важливими для подальшого навчання.

Разом із тим модель перевернутого класу не є ідеальною. Найбільш відчутною проблемою стала недостатня підготовка частини студентів до занять. Якщо студент не опрацював матеріал заздалегідь, він не може повноцінно включитися в роботу, і це впливає на динаміку всієї групи. Для вирішення цієї проблеми запроваджується система коротких онлайн-тестів перед заняттям і враховуються результати підготовки в загальному оцінюванні. Це значно підвищило відповідальність студентів.

Крім того, постійно вдосконалюються навчальні матеріали, вони стають більш інтерактивними та цікавими. Добре працюють відео з поясненнями, елементи гейміфікації, завдання з відкритими запитаннями. Важливу роль відіграє також регулярний зворотний зв'язок: студенти мають відчувати, що їхня робота не залишається поза увагою.

Доцільно впроваджувати *flipped classroom* поступово. Спочатку використовувалися лише окремі елементи цієї моделі в поєднанні з традиційними підходами. З часом частка самостійної роботи зросла, і студенти почали краще розуміти переваги такого формату. Це дозволило уникнути різкого переходу та полегшило адаптацію.

Практика показала, що використання перевернутого класу позитивно впливає на навчальні результати. Студенти стають більш активними, краще розуміють матеріал і впевненіше застосовують знання. Особливо помітно зростає їхня залученість: вони частіше ставлять запитання, беруть участь в обговореннях, пропонують власні ідеї. Змінюється і їхнє ставлення до навчання – воно стає більш усвідомленим.

Не менш важливим є розвиток ключових компетентностей. У процесі такої роботи студенти вчаться планувати свій час, відповідально ставитися до завдань, аналізувати інформацію та працювати в команді. Вони поступово формують навички, які виходять далеко за межі однієї дисципліни й стають основою їхньої майбутньої професійної діяльності.

Отже, використання моделі перевернутого класу дозволяє поєднати теоретичну підготовку з практичною діяльністю, зробити навчання більш гнучким і орієнтованим на потреби студентів. Ця модель має реальний

потенціал для підвищення якості математичної освіти в технічних університетах. Вона не лише змінює формат занять, а й формує нову культуру навчання, у центрі якої перебуває активний, відповідальний і мотивований студент.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анпілогов Д.І. Застосування моделі flipped classroom при викладанні вищої математики в технічному університеті. *Перспективи та інновації науки. Серія «Педагогіка»*. 2026. № 2(60). С. 177 – 187.
2. Love B., Hodge A., Grandgenett N., Swift A. Student learning and perceptions in a flipped linear algebra course. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*. 2014. Vol. 45. P. 317–324.
3. Suárez F., Mosquera-Feijóo J., Chiyón I., Alberti M. Flipped Learning in Engineering Modules Is More Than Watching Videos: The Development of Personal and Professional Skills. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. P. 1–20.

УДК 519.865

Левицька Т.І.¹, Пожуєва І.С.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ АСОРТИМЕНТНОЇ ПОЛІТИКИ ПІДПРИЄМСТВА

Проблема невизначеності початкової інформації при розрахунку показників ефективності асортиментної політики виникає через те, що розрахунки необхідно здійснювати на основі значень об'ємів товарів, що реалізуються, в майбутньому. На момент розробки моделі або при оцінці її ефективності ці величини точно невідомі. Їх необхідно прогнозувати на основі статистичних даних або експертним способом. Як показує практика, частіше використовується другий варіант. Це пов'язано з тим, що для отримання достовірних результатів прогнозування необхідне чимала кількість інформації про аналогічні проекти. При цьому, з одного боку, збір такої інформації є трудомістким процесом і, крім того, інформація про реалізацію подібних товарів може бути закритою. З іншого боку, часто схожі моделі реалізуються при різних поєднаннях внутрішніх і зовнішніх умов, а, отже, їх не можна використовувати як прототипи. Наприклад, модель асортиментної політики, успішно реалізованої при стабільній економіці, може не принести того ж ефекту, якщо в економіці спостерігається деякий дисбаланс через певну політичну ситуацію або кризу, із-за відмінностей в

середовищі їх реалізації. Крім того, асортиментна політика може бути пов'язана з інноваціями, і в цьому випадку товари є унікальними, а тому про наявність статистики не може йтися.

Була розроблена схема розрахунку (рис.1), що враховує при моделюванні асортиментної політики як чітку, так і нечітку інформацію, по якій розраховуватимуться показники ефективності обраної моделі асортименту.

Для вироблення рішень в процесі управління асортиментом необхідно виявити множину всіх істотних з погляду цього рішення параметрів асортименту $X1 = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ і його оточення $X2 = \{X_{m+1}, X_{m+2}, \dots, X_n\}$, $X = X1 \cup X2 = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. Крім того, повинна бути визначена множина обмежень CX , яка складається з множини обмежень внутрішнього середовища, що накладаються в рамках формування асортименту $CX1 = \{CX_1, CX_2, \dots, CX_i\}$ (наприклад, обмеженість грошових коштів підприємства або торгових площ) і зовнішнього середовища $CX2 = \{CX_{i+1}, CX_{i+2}, \dots, CX_r\}$, $CX = CX1 \cup CX2 = \{CX_1, CX_2, \dots, CX_r\}$.

Серед параметрів асортименту і зовнішнього середовища X виділяється множина параметрів, які можуть оцінюватися чітко, і множина параметрів, значення яких точно невідомі. Аналогічно, серед обмежень виділяються жорсткі і м'які. З метою кількісної оцінки інформації про невідомі точно параметри $\{X_{k+1}, \dots, X_m\} \cup \{X_{p+1}, \dots, X_n\}$ (статистичні дані, якісна інформація, лінгвістичні оцінки і т.п.) перетворюється в нечіткі величини, а потім обробляється за допомогою відповідних моделей і алгоритмів. Чітко відомі значення параметрів $\{X_1, \dots, X_k\} \cup \{X_{m+1}, \dots, X_p\}$ не потребують такої обробки і можуть відразу використовуватися для обчислень.

Аналогічно, інформація про м'які обмеження $\{CX_{i+1}, \dots, CX_i\} \cup \{CX_{j+1}, \dots, CX_r\}$ перетворюється в представлення обмежень нечіткими множинами, а жорсткі обмеження $\{CX_1, \dots, CX_i\} \cup \{CX_{i+1}, \dots, CX_j\}$ відразу використовують для обчислень. На основі значень всіх параметрів і обмежень обчислюються характеристики, необхідні для підготовки прийняття рішення.

Далі за отриманими результатами приймається рішення, яке дає управляючу дію на асортиментну політику підприємства.

Запропонована концепція дозволяє будувати економіко-математичні моделі управління асортиментною політикою з урахуванням невизначеності початкової інформації, джерелами якої є суб'єктивні і лінгвістичні оцінки, твердження, що конфліктують і т.п.

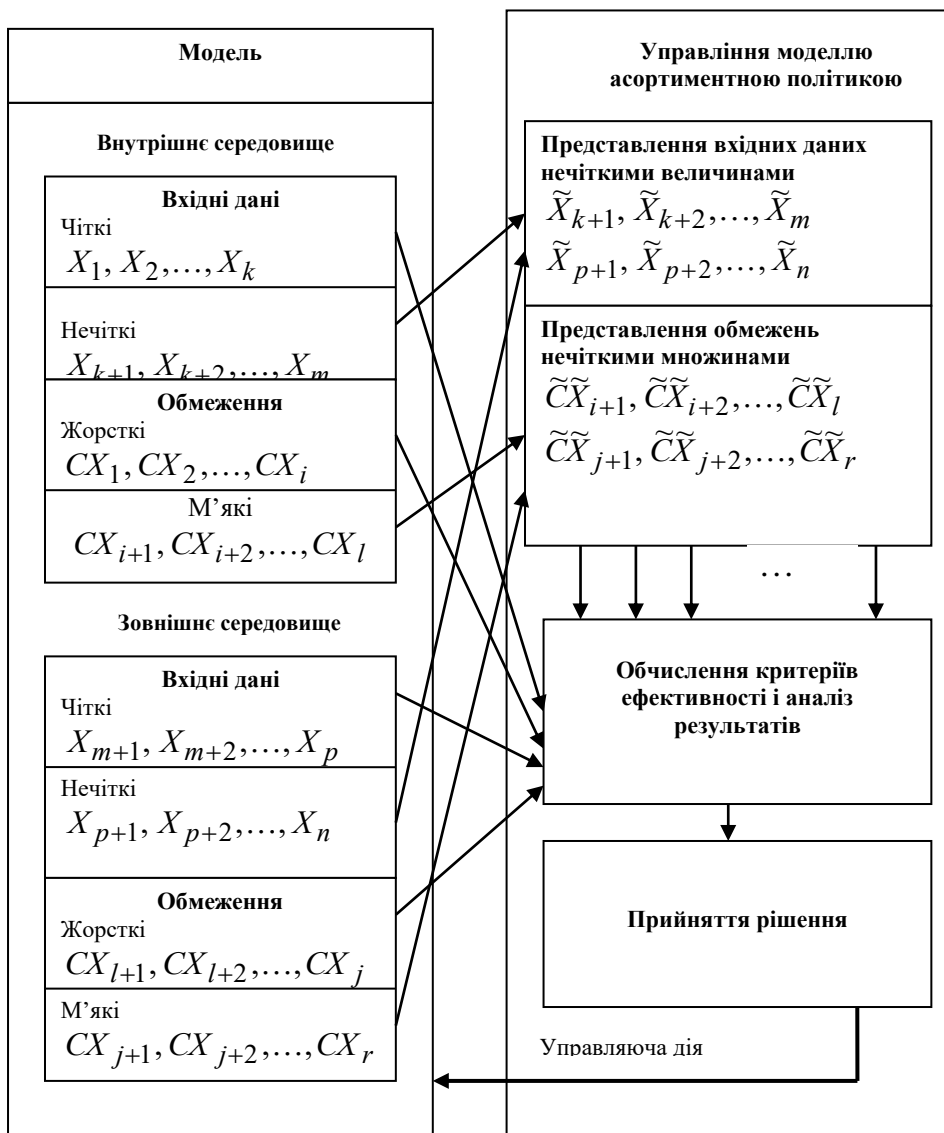


Рисунок 1 – Структурна модель управління асортиментною політикою за допомогою теорії нечітких множин

УДК 631.316.022

Шаніна З.М.¹, Засовенко А.В.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ПРОЕКТУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЗУБЧАСТОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ ДЛЯ ОБРОБКИ ГРУНТУ

Зубчастий робочий орган (ЗРО) являє собою блок зубців. Западина та виступ окремого зуба в горизонтальній площині виконані за логарифмічною спіраллю, виступ – у вигляді параболи четвертого степеня. Логарифмічна спіраль западини плавко з'єднуючись з параболою виступу утворюють ріжучу кромку леза [1-3].

Рівняння поверхні ЗРО може бути представлено у вигляді

$$y_i = Ax_i, \quad (1)$$

де x_i – координата точок M_i логарифмічної спіралі;

y_i – координата точок поверхні ЗРО, в залежності від ψ поточного кута радіус-вектора логарифмічної спіралі $r_{\psi_i} = r_0 \cdot e^{\psi \operatorname{tg} \varphi}$;

$\operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя.

Для ділянки западини координати поточної точки вектора переміщення по логарифмічній спіралі визначається рівняннями

$$x_i^{N_i} = x_1^{O_1} + r_{\theta_i} \cdot e^{\theta_i \operatorname{tg} \varphi} \cos \theta_i; \quad x_2^{N_i} = r_{\theta_i} \cdot e^{\theta_i \operatorname{tg} \varphi} \sin \theta_i; \quad x_3^{N_i} = 0, \quad (2)$$

де $\theta_i = 180^\circ$ – початкові кути;

$\overline{\theta_i} = 20^\circ + \theta_i$ – координати точки $O_1(S/2, 0, 0)$;

S – крок розташування зубців.

У зв'язку з подовженням профілю западини логарифмічної спіралі по вісі Ox_1 , вводимо коефіцієнт $k = \frac{1}{\cos \alpha}$, а перетворення подовження

запишемо матрицею:

$$A_{zan}^n = \begin{pmatrix} k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Враховуючи це координати точок вектора поступального переміщення можна визначити

$$\Delta x_i = A_{zap}^n \cdot x_i; \quad \Delta x_i^{N_i} = k \cdot x_i^{N_i}; \quad \Delta x_2^{N_i} = x_2^{N_i}; \quad \Delta x_3^{N_i} = 0. \quad (4)$$

Для ділянки виступу координати точки N_i вектора поступального переміщення по параболі визначається, як добуток наступних перетворень:

- а) стискання вздовж вісі Ox_2 з коефіцієнтом μ , описаного матрицею A_6^c ;
- б) подовження вздовж вісі Ox_1 з коефіцієнтом k , описаного матрицею A_n^o ;
- в) поступальне переміщення, описаного матрицею A_n .

Тоді загальне перетворення параболи опишемо матрицею

$$A_{zag} = A_n A_n^o A_6^c. \quad (5)$$

Рівняння поверхні ЗРО в матричній формі може бути представлено як на ділянках западин, так і на ділянках виступів. Форма поверхні робочого органу залежить від значень функціональних параметрів k , μ , θ , ψ .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zoja Shanina, Andrii Zasovenko, Tetiana Sliusarova, Anton Fasolyak, Olena Syvachuk. Solving the Contact Problem of Elasticity Theory in Modelling an Operating Tool for Tillage. *International Journal of Advanced Engineering and Management Research (IJAEMR)*. 2025. Vol. 10, No 02. P. 28-35. <https://doi.org/10.51505/ijaemr.2025.1102>
2. Zoia Shanina, Andrii Zasovenko, Tetiana Sliusarova, Olena Syvachuk. Surface Design of a Toothed Soil-engaging Element for Soil Tillage. *International Journal of Advanced Engineering and Management Research (IJAEMR)*. 2026. Vol. 11, No 02. P. 1-10. <https://doi.org/10.51505/ijaemr.2026.1201>
3. Шаніна, З.М., Засовенко А.В. Опис процесу подрібнення ґрунту при обробці його зубчатим робочим органом. *Тиждень науки-2025. Машинобудівний факультет* : зб. тез доп. щоріч. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 24-28 квітня 2023 р.). Запоріжжя, 2023. С. 161-162.

УДК 621.762:669.017.3

Фасоляк А.В.¹, Єршов А.М.²

¹ канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² аспірант каф. «ТАД» НУ «Запорізька політехніка»

ОЦІНКА ПРУЖНИХ ТА МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

На сьогодні технології порошкової металургії широко застосовуються у різних галузях промисловості, що зумовлено передусім їх високою економічною ефективністю та можливістю отримання виробів складної форми з мінімальними витратами матеріалу. Водночас механічні характеристики спечених матеріалів, зокрема показники міцності та пластичності, як правило, поступаються аналогічним властивостям деформованих або литих сплавів. Ключовим чинником, що зумовлює таке зниження експлуатаційних властивостей, є наявність залишкової пористості, яка формується у процесі спікання та суттєво впливає на поведінку матеріалу під навантаженням.

У сучасних наукових дослідженнях запропоновано значну кількість підходів і моделей для оцінювання впливу пористості на механічні характеристики порошкових матеріалів. Проте більшість із них базується на урахуванні лише інтегрального показника — об'ємної частки пор. При цьому такі важливі чинники, як форма пор, їх геометричні особливості, просторовий розподіл і характер взаємного розташування, як правило, ігноруються або враховуються спрощено [1]. Подібні припущення істотно обмежують точність прогнозування міцнісних характеристик і знижують надійність оцінки ресурсу виробів ще на стадії проектування. У зв'язку з цим актуальною є розробка більш досконалих підходів, які дозволяють комплексно враховувати структурні особливості пористого середовища.

Одним із перспективних напрямів є використання методу гомогенізації в поєднанні з методом скінченних елементів (МСЕ) [2]. Суть підходу полягає у побудові репрезентативного об'єму матеріалу (Representative Volume Element, RVE), який відтворює характерну мікроструктуру з урахуванням реального або статистично згенерованого розподілу пор. Такий об'єм може формуватися на основі експериментальних даних, отриманих методами мікроструктурного аналізу, або шляхом чисельного моделювання.

Застосування МСЕ до аналізу RVE дає можливість визначати ефективні пружні характеристики матеріалу, зокрема модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та модуль зсуву, які узагальнено враховують вплив пористості. Важливою перевагою такого підходу є можливість врахування складної

геометрії пор, їх взаємодії, кластеризації, а також потенційної анізотропії структури. Це, у свою чергу, забезпечує більш точне відтворення реальної механічної поведінки пористих матеріалів і підвищує достовірність інженерних розрахунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pavlenko D., Dvirnyk Y., Przysowa R. Advanced materials and technologies for compressor blades of small turbofan engines. Aerospace. 2021. Vol. 8, no. 1. URL: <https://doi.org/10.3390/aerospace8010001>

2. Xi Y., Wang L., Gao Y., Lei D. Numerical investigation on effective elastic modulus of multifractal porous materials. Fractal and Fractional. 2023. Vol. 7, no. 3. URL: <https://doi.org/10.3390/fractalfract7010003>

УДК 519.6: 004.04

Коротунова О.В.¹, Анненкова Д.Р.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. КНТ-215, НУ «Запорізька політехніка»

КОСИНУСНА МІРА В АЛГОРИТМАХ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Сучасні інформаційні сервіси (Netflix, Spotify, Amazon), інтернет-магазини, соціальні мережі щодня обробляють мільярди запитів. Головна проблема – "інформаційне перевантаження". Для утримання уваги користувачів ІТ-продукти використовують системи рекомендацій (Recommendation Systems). Рекомендаційні системи фільтрують контент під конкретного користувача. В основі найбільш ефективних методів лежить не складний код, а фундаментальні поняття лінійної алгебри та аналітичної геометрії – векторний простір та скалярний добуток.

У сучасних дослідженнях методи векторного аналізу активно використовуються у сфері обробки великих даних (BigData) та рекомендаційних систем. Цей же метод працює і для пошуку плагіату (пошук схожих текстів), і для розпізнавання образів. Проте питання математичного представлення інтересів користувачів у вигляді векторів та оцінювання їх схожості потребує подальшого узагальнення.

Для застосування методів лінійної алгебри кожен об'єкт системи (фільм, товар, стаття) або профіль користувача представляється як вектор у п-вимірному просторі ознак:

$$\vec{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (1)$$

де n – кількість характеристик, a_i – вага або значення i -ї характеристики (наприклад, оцінка жанру або частота вживання слова).

Міра схожості визначається як косинус кута θ між двома векторами.

$$\cos \theta = \cos(\bar{a} \cdot \bar{b}) = \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{|\bar{a}| \cdot |\bar{b}|} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2}} \quad (2)$$

Якщо $\cos \theta = 1$, вектори колінеарні (інтереси ідентичні); якщо $\cos \theta = 0$, вони ортогональні (спільних рис немає).

Процес формування рекомендації за допомогою косинусної міри включає три етапи:

Векторизація: Перетворення бази даних у матрицю "користувач-об'єкт". Тобто математична модель – це матриця, де рядками є користувачі, а стовпцями оцінки товарів.

Обчислення матриці схожості: Розрахунок косинусів між цільовим вектором та всіма векторами бази.

Ранжування: Відбір топ- k об'єктів з найвищими значеннями схожості. Користувачу пропонують те, що сподобалося його "векторним сусідам".

Наприклад, нехай є два користувачі, які можуть обрати на деякій платформі фільми трьох жанрів: (Пригоди, Драма, Комедія). Кількість переглянутих фільмів відповідного жанру подано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Матриця оцінок (жанри)

	Пригоди	Драма	Комедія
Користувач 1	5	3	0
Користувач 2	4	2	1

Обчислимо косинусну міру подібності між ними:

$$\cos \theta = \frac{5 \cdot 4 + 3 \cdot 2 + 0 \cdot 1}{\sqrt{5^2 + 3^2 + 0^2} \cdot \sqrt{4^2 + 2^2 + 1^2}} = \frac{26}{\sqrt{34} \cdot \sqrt{21}} \approx 0,97$$

Показник 0.97 вказує на надзвичайно високу подібність, отже, Користувачу 1 можна рекомендувати фільми, які сподобалися Користувачу 2.

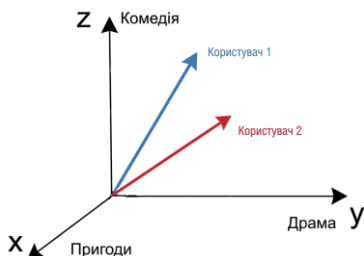


Рисунок 1 – Геометрична інтерпретація прикладу косинусної подібності.

Як можна бачити на рис. 1, косинусна міра ігнорує довжину векторів і фокусується лише на куті між ними. На практиці це дозволяє визначити, що Користувачі 1 та 2 мають надзвичайно схожі смаки, незважаючи на різну кількість оцінок у кожному жанрі. Це ідеально підходить для алгоритмів рекомендацій, бо пошук ведеться саме за напрямком інтересів, а не їхню інтенсивністю.

На відміну від Евклідової відстані, яка вимірює фізичну відстань між точками, косинусна міра оцінює напрямки векторів. Це критично важливо при різній інтенсивності взаємодії користувачів, оскільки активні користувачі матимуть довші вектори, ніж пасивні, навіть при однакових смаках.

У реальних системах мільйони товарів, але користувач взаємодіє лише з 10-20. Більшість координат вектора – нулі. Це вимагає використання спеціальних методів зберігання матриць. Коли користувачів мільйони, порівнювати вектор кожного з кожним занадто довго. Математика пропонує рішення у вигляді Наближених найближчих сусідів (ANN). Алгоритм діє так:

Бере вектор активного користувача.

Обчислює косинусну подібність з усіма іншими векторами (товарами або користувачами) у базі.

Сортує результати за спаданням косинуса.

Вибирає k об'єктів з найбільшим значенням (близьким до 1).

Використання скалярного добутку для обчислення схожості дозволяє реалізувати алгоритми, що мають високу обчислювальну швидкість, що є критичним для сервісів, які працюють у режимі реального часу. Базові операції лінійної алгебри лежать в основі складних нейромережових архітектур та систем Big Data. Таким чином, векторна модель дозволяє перетворити абстрактні вподобання людей на чіткі математичні об'єкти. Попри простоту, метод косинусної подібності залишається базовим інструментом у Computer Science завдяки своїй обчислювальній ефективності та можливості працювати упростоках високої розмірності.

Незважаючи на ефективність векторних моделей, залишаються виклики, пов'язані з розрідженістю матриць (Sparsity) та необхідністю динамічного

оновлення векторів. Подальший розвиток теми може стосуватися використання методів зниження розмірності (наприклад, SVD-розклад) для оптимізації обчислень у надвеликих просторах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Strang G. Introduction to Linear Algebra. 6th ed. Wellesley: Wellesley-Cambridge Press, 2023. 640 p.

2. Лобур М. В., Шварц М. Є., Стех Ю. В. Моделі і методи прогнозування рекомендацій для колаборативних рекомендаційних систем. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Інформаційні системи та мережі*. 2018. № 901. С. 68-75.

УДК 517.2:330.4

Коротунова О.В.¹, Гусак І.І.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. БТЕ-0614, НУ «Запорізька політехніка»

КРИВА ЛАФФЕРА: МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОДАТКОВОГО ОПТИМУМУ

Питання встановлення оптимального рівня податкового навантаження є однією з ключових проблем сучасної макроекономічної політики. В умовах глобальної нестабільності та пошуку ресурсів для наповнення бюджету держави часто вдаються до підвищення податкових ставок. Проте математичне моделювання доводить, що така стратегія має свої фізичні та економічні межі. Дослідження математичних аспектів моделі Артура Лаффера дозволяє знайти ту критичну точку, за якою подальше посилення фіскального тиску стає контрпродуктивним, спричиняючи тінізацію економіки та скорочення податкової бази.

Припустимо, що зв'язок між податковою базою B та ставкою податку t є лінійним:

$$B(t) = A(1-t), \quad (1)$$

де A –максимально можлива база при нульовому оподаткуванні. При ставці 100% податкова база скорочується до нуля через відсутність стимулів до легальної діяльності

Тоді функцію податкових надходжень $T(t)$ можна записати у вигляді:

$$T(t) = t \cdot A(1-t) = A(t-t^2). \quad (2)$$

Щоб знайти оптимальну ставку t^* , при якій надходження до бюджету будуть максимальними, необхідно знайти першу похідну функції за змінною t і прирівняти її до нуля:

$$T'(t) = A(1 - 2t) = 0 \Rightarrow t^* = 0,5, \quad (3)$$

або 50%. В реальних умовах t^* залежить від схильності населення до ризику (тіньова економіка), рівня довіри до держави, а також від мобільності капіталу (як легко гроші можуть «втекти» з країни). Математично це описується коефіцієнтами у функції податкової бази.

Якщо $t < t^*$, то економіка знаходиться у «сприятливій» зоні. Держава може підвищувати податки для збільшення бюджету без критичного ризику для бізнесу. Якщо ж $t > t^*$, то економіка країни потрапляє в «заборонену» зону. Кожне наступне підвищення податку t призводить до стрімкого скорочення бази $B(t)$ (закриття підприємств, виводу капіталу в офшори), через що загальний добуток T падає.

Розглянемо приклад «податкової пастки». Уявімо гіпотетичну країну, де податкова база B (загальний дохід бізнесу) при нульовому податку складає 100 млрд. грн. Зі зростанням податкової ставки t бізнес починає закриватися або йти в «тінь» за лінійною залежністю: $B(t) = 100(1 - t)$. Складемо таблицю надходжень до бюджету ($T = t \cdot B$) для різних ставок:

Таблиця 1 – Розрахунок податкових надходжень залежно від ставки оподаткування

Ставка (t)	Податкова база (B), млрд. грн.	Надходження (T), млрд. грн.	Коментар
10%	90	9	Початок росту
30%	70	21	Ефективна фіскальна зона
50%	50	25	Точка максимуму (Оптимум)
70%	30	21	«Заборонена зона» (надходження падають)
90%	10	9	Критичний рівень тінізації

Розрахунки показують, що при ставці оподаткування 70% та податковій базі у 100 одиниць, чистий дохід бюджету (21 од.) дорівнює доходу при ставці 30%. Це математично доводить доцільність зниження податкового тиску для виходу з рецесивної зони.

З графіку (рис. 1) видно, що оптимальною є ставка 50%. Все, що знаходиться правіше цієї точки, — це "заборонена зона". Підвищення ставки

в цій зоні, наприклад до 70%, є математично недоцільним, оскільки воно призводить до падіння доходів бюджету до рівня, який можна було б отримати при ставці всього 30%.

Оскільки залежність між рівнем оподаткування та доходами бюджету є нелінійною і має вигляд параболічної функції, то існують дві різні податкові ставки (одна у сприятливій, інша у забороненій зоні), які забезпечують однаковий обсяг надходжень до бюджету. Це означає, що існує межа фіскального тиску, після якої подальші спроби наповнити бюджет шляхом підвищення ставок призводять до зворотного результату.



Рисунок 1 – Крива Лаффера.

Найбільш відомим практичним застосуванням цієї моделі є період «рейганоміки» у США 1980-х років, коли Артур Лаффер фактично переконав уряд знизити податки для стимулювання економіки.

Класична модель Лаффера залишається фундаментальною базою стратегічного планування, але в сучасних дослідженнях математики додають у рівняння моделі змінні інфляції, рівень корупції та швидкість цифровізації економіки, що робить функцію складнішою за звичайну параболу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Голубник О.Р., Приймак З.В. Оптимізація податкового навантаження для національної економіки України. *Економіка: реалії часу*. Науковий журнал. 2016. № 6 (28). С.25–32.
2. Круш П.В., Тульчинська С.О. Макроекономіка : навч. посіб. Київ: Центр навч. літ., 2008. 328с.
3. Приймак В.І. Математичні моделі визначення оптимальної ставки оподаткування. *Формування ринкової економіки в Україні*. Львів: Інтереко, 2009. №19. С.112–117.

УДК 519.217

Коротунова О.В.¹, Луканюк П.Л.²

¹ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. БТЕ-0614, НУ «Запорізька політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАС САМООБСЛУГОВУВАННЯ У РИТЕЙЛІ

У сучасних умовах швидкість обслуговування є критичним фактором конкурентоспроможності ритейлу. Традиційні каси з касирами часто стають «вузьким місцем» системи, створюючи великі черги в пікові години.

Використовуючи апарат теорії масового обслуговування обґрунтуємо заміну однієї традиційної каси на простір із чотирьох терміналів самообслуговування (ТСО). Такий вибір обумовлений тим, що чотири каси ТСО займають стільки ж місця, скільки одна звичайна каса з зоною викладки товару.

Будемо розглядати деякий магазин (супермаркет) як систему масового обслуговування з такими параметрами:

λ – інтенсивність надходження клієнтів (заявок) в систему (осіб/год);

μ – інтенсивність обслуговування (осіб/год);

s – кількість кас (каналів);

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \text{ – середній час очікування;}$$

$$\rho = \frac{\lambda}{s \cdot \mu} \text{ – коефіцієнт завантаження системи.}$$

Потрібно порівняти роботу звичайної каси і ТСО, що мають спільну чергу, яка розходить на декілька кас. Звичайна каса зазвичай швидко обслуговує клієнтів, бо працює професіонал (висока μ). Клієнт, який обслуговується самостійно, повільніший, але таких кас багато на тій же площі, і вони мають спільну чергу.

Нехай у годину в магазин заходить $\lambda = 30$ покупців. Середній час обслуговування касиром 1,5 хвилини ($\mu = 40$ осіб/год). Середній час самообслуговування покупця 4 хвилини ($\mu = 15$ осіб/год для кожного терміналу). Навіть якщо один покупець обслуговується на ТСО в 2,5 рази довше ніж на касі, загальна потужність системи ТСО вища: $\mu = 4 \cdot 15 = 60$ осіб/год. Завантаження системи на звичайній касі: $\rho = \frac{30}{40} = 0,75$. На

майданчику ТСО $\rho = \frac{30}{4 \cdot 15} = 0,5$. Тобто половина терміналів постійно є

вільною. Якщо потік покупців збільшиться до 40 осіб/год, то $\rho = \frac{40}{40} = 1$,

звичайна каса працює на межі можливостей. Якщо кількість покупців буде збільшуватися, черга почне рости до нескінченості. Для чотирьох кас самообслуговування $\rho = \frac{40}{4 \cdot 20} = 0,67$. Система ТСО все одно є вільнішою.

Проаналізуємо залежність середнього часу очікування на касі та ТСО в залежності від інтенсивності потоку покупців (табл.1). Для цього побудуємо графік (рис. 1), із якого видно що точка критичного завантаження для звичайної каси настає раніше.

Таблиця 1 – Час очікування

Потік (λ)	10	20	30	35	40	42	44
Час на звичайній касі	0,6	1,1	2,7	4,7	11	19	59
Час на касах ТСО	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1

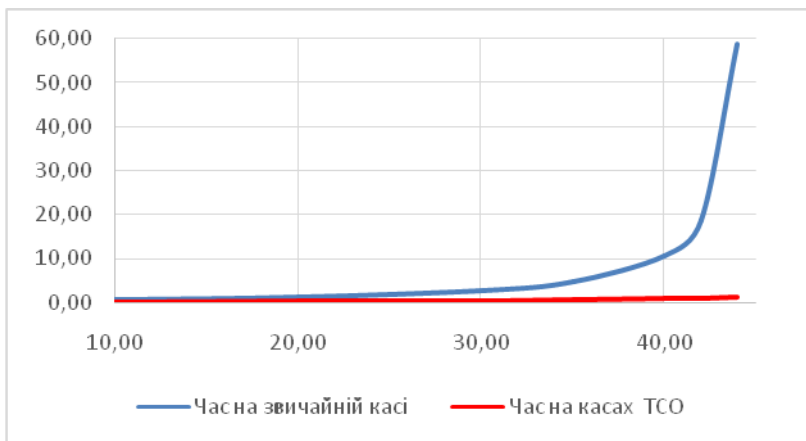


Рисунок 1 – Динаміка часу очікування в черзі.

Каси самообслуговування виграють не за рахунок швидкості сканування товару, а за рахунок паралельності процесів та зменшення часу простою системи. Отже впровадження таких терміналів є ефективним способом підвищення пропускної здатності торговельної системи та покращення рівня обслуговування клієнтів.

УДК 517.954

Сніжко Н.В.¹, Сясін Б.Р.²

¹ канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. КНТ-814 НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИКА ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕОРІЇ ПОЛЯ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ЕЛЕКТРОСТАТИКИ

Теорема та поняття теорії поля дають багатий математичний апарат для моделювання та дослідження фізичних процесів, зокрема, в області електростатики та електродинаміки.

Розглянемо наступну задачу: необхідно отримати формулу для розрахунку напруженості поля всередині кулі, рівномірно зарядженої по об'єму. Усередині самої кулі проведемо концентричну з нею сферу S радіусу r (рис. 1).

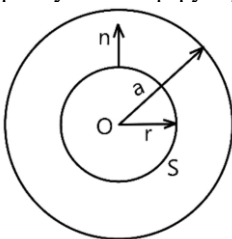


Рисунок 1 – Рівномірно заряджена куля.

Рівномірно заряджена куля створює в зовнішньому просторі таке поле, як і у випадку, якби весь заряд був зосереджений у його центрі [2]. Враховуючи кульову симетрію, маємо:

$$\vec{E} = E(r) \frac{\vec{r}}{r}. \quad (1)$$

Запишемо даний вираз у координатній формі:

$$E_x = E(r) \frac{x}{r}, \quad E_y = E(r) \frac{y}{r}, \quad E_z = E(r) \frac{z}{r}. \quad (2)$$

Диференціюємо E_x і враховуємо, що $\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x}{r}$ та $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, одержуємо:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{dE}{dr} \frac{x^2}{r^2} - E \frac{x^2}{r^3} + E \frac{1}{r}. \quad (3)$$

Напишемо аналогічні вирази для похідних $\frac{\partial E_y}{\partial y}$, $\frac{\partial E_z}{\partial z}$ і додамо їх:

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{2E}{r} = \frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 E)}{dr}. \quad (4)$$

За теоремою Гаусса в диференціальному вигляді [1] маємо, що $\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho$, де ρ – об’ємна густина електричного заряду, віднесена до одиниці об’єму. Тоді у внутрішніх точках кулі виконується:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 E)}{dr} = 4\pi\rho. \quad (5)$$

Відокремлюємо змінні і інтегруємо даний вираз, одержуємо:

$$\begin{aligned} \int d(r^2 E) &= \int 4\pi\rho r^2 dr \\ r^2 E &= \frac{4\pi\rho}{3} r^3 + C \end{aligned} \quad (6)$$

Виражаємо E , таким чином знаходимо шукану формулу для розрахунку напруженості поля всередині кулі:

$$E = \frac{4\pi\rho}{3} r + \frac{C}{r^2}. \quad (7)$$

З курсу теоретичної фізики відомо, що напруженість поля E в центрі кулі скінченна, тому стала C повинна дорівнювати нулю. Остаточно маємо:

$$E = \frac{4\pi\rho}{3} r. \quad (8)$$

Використання елементів теорії поля в задачах фізики базується на тому, що будь-який фізичний процес може бути математично змодельований. Застосування диференціальних операторів теорії поля значно спрощує створення моделі фізичних явищ і скорочує розв’язання задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анпілогов Д.І., Сніжко Н.В. Диференціальне числення : навч. посібник. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 308 с.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики : у 3 т. 2-ге вид., випр. Київ : Техніка, 2006.

УДК 517.3+531.1

Сніжко Н.В.¹, Сижко В.С.²

¹ канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. ІФ-515сп НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАДІЄНТА ТЕМПЕРАТУРИ

Елементи векторного аналізу (поняття градієнта, дивергенції, ротора) широко застосовуються в задачах теплофізики, а саме для опису полів швидкостей, температур, сил у матеріальних середовищах.

Розглянемо задачу, в якій необхідно знайти функцію залежності температури стержня від x – відстані до того торця стержня, який має температуру T_1 , якщо довжина стержня з теплоізолюваною бічною поверхнею дорівнює l , а коефіцієнт теплопровідності матеріалу, з якого виготовлений стержень, змінюється з температурою T за законом $\chi = \frac{\alpha}{T}$, де α – деяка стала.

Нехай торці стержня підтримуються при температурах T_1 і T_2 відповідно (рис. 1).

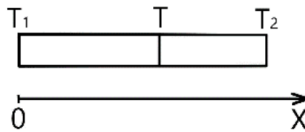


Рисунок 1 – Стержень довжиною l з теплоізолюваною бічною поверхнею.

За законом Фур'є кількість тепла, що переноситься в одиницю часу через переріз, розміщений нормально до напрямку найшвидшої зміни температури, прямо пропорційна градієнту температури, тому скористаємося наступною формулою [2]:

$$q = -\chi S \operatorname{grad} T. \quad (1)$$

Виконаємо перетворення, необхідні для подальшого розв'язання задачі:

$$q = -\frac{\alpha}{T} \frac{dT}{dx} S. \quad (2)$$

Відокремлюємо змінні, інтегруємо одержаний вираз і отримуємо:

$$\int_0^x q dx = -\alpha S \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T}. \quad (3)$$

Звідси випливає:

$$qx = -\alpha S \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (4)$$

Тоді шукана залежність $T(x)$ набуває наступного вигляду:

$$T = T_1 e^{\frac{qx}{\alpha S}}. \quad (5)$$

Таким чином, за допомогою означення градієнта скалярної функції [1] ми отримали залежність температури стержня від відстані до його кінця.

На цьому прикладі було розкрито специфіку розв'язання задач теплофізики з використанням елементів векторного аналізу. У різних областях фізики використовується поняття градієнта різних фізичних полів. Крім наведеного вище прикладу, за допомогою градієнта описується напруженість гравітаційного поля (прискорення вільного падіння) у класичній теорії гравітації, консервативна сила в класичній механіці, а також багато інших фізичних явищ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анпілогов Д.І., Сніжко Н.В. Диференціальне числення : навч. посібник. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. 308 с.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики : у 3 т. 2-ге вид., випр. Київ : Техніка, 2006.

УДК 532.135

Онуфрієнко В.М.¹, Козак В.С.²

¹ д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

РЕОЛОГІЧНІ РІВНЯННЯ СТАНУ ДЛЯ НЕЛІНІЙНОЇ В'ЯЗКО-ПРУЖНОЇ ПОВЕДІНКИ ФРАКТАЛЬНО КОНФІГУРОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ: МОДЕЛІ ВАГНЕРА, ЛЕОНОВА, МАРУЧЧІ

Метою цієї роботи є використання методу дробових похідних та фрактального аналізу для опису процесу текучості полімерних

нанокомпозитів та фізична інтерпретація дробового показника у випадку полімерів.

Побудову часових компактів вичерпування фрактально конфігурованого матеріалу здійснюємо за наступною схемою [1]. Сформуємо перше покоління покриття відрізками часу $\Delta t_1 < t$, де t спостережуваний загальний час руху від точки А до В по фракталу. Кількість елементів покриття часу t_1 залежить від діаметру t та величини Δt_1 у вигляді функції $N_{\Delta t_1 t} = f(t / \Delta t_1)$. Для наступних поколінь спостерігаються наступні співвідношення між кількостями часового покриття:

$$N_{\Delta t_1 t} \times N_{\Delta t_2 t_1} = N_{\Delta t_2 t}; N_{\Delta t_1 t} \times N_{\Delta t_3 t_1} = N_{\Delta t_3 t}; \dots; N_{\Delta t_{i(k+1)} \Delta t_{i(k)}} \times N_{\Delta t_{i(k+2)} \Delta t_{i(k+1)}} = N_{\Delta t_{i(k+2)} \Delta t_{i(k)}}.$$

З останньої рівності маємо функціональне рівняння Коші типу $f(x)f\left(\frac{y}{x}\right) = f(y)$, розв'язок якого є степеневою функцією

$$f\left(\frac{\Delta t_{i(k)}}{\Delta t_{i(k+1)}}\right) = \left(\frac{\Delta t_{i(k)}}{\Delta t_{i(k+1)}}\right)^\alpha, \quad -\infty < \alpha < +\infty, \quad (1)$$

що допускає узагальнення для комплексного значення показника $\alpha = \alpha' + i\alpha''$.

Таким чином, для опису фрактальних розподілів у часі застосовуємо диферінтеграли з комплексним порядком $d^\alpha t = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \frac{dt}{(t-t')^{1-\alpha}}$, що пов'язані

з дробовою похідною $d^\alpha L(t) = {}_a D_t^\alpha L(t) d^\alpha t$ [2]

$${}_a D_t^\alpha L(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_a^t \frac{L(t')}{(t-t')^\alpha} dt' \quad (2)$$

Для опису нелінійного відклику фрактально конфігурованих метаматеріалів використаємо далі інтегральне формулювання Вагнера [3], до схеми якого вводимо диферінтегральну α характеристику (швидкість зміни) напруженості (обчислюється інтегралом по історії деформації для зсувних потоків)

$$\sigma(t) = - \int_{-\infty}^t M(t-t') h(\gamma) \gamma(t, t') d^\alpha t' \quad (3)$$

де скінченна деформація $\gamma(t, t') = \gamma(t') - \gamma(t)$, $h(\gamma)$ - функція затухання.

Функція $M(t-t')$ є ядром пам'яті і визначається швидкістю зміни модуля релаксації $M(t-t') = {}_0 D_t^\alpha G(t-t')$, ${}_0 D_t^\alpha G(t-t') d^\alpha t' = d^\alpha G(t-t')$, таким чином $\sigma(t) = - \int_{-\infty}^t h(\gamma)(t, t') d^\alpha G(t-t')$. Параметр дробового порядку

$0 < \alpha < 1$ визначає швидкість релаксації, де нижчі значення відповідають довготривалій пам'яті, а асимптотична поведінка показує перехід від пружності до в'язкої течії з важким степеневим хвостом.

Рівняння (3) є нелінійним узагальненням рівняння для фрактальної конфігурації середовища, його можна використовувати для побудови нелінійних в'язко-пружних рівнянь дробового порядку шляхом вибору функції пам'яті. З'являється можливість опису середовищ з фрактальною в'язкоеластичністю та складною пам'яттю таких, як біополімери, гелі, нанокомпозити, структура яких має самоподібну архітектуру.

Звичайна (дійсна) дробова похідна описує плавне згасання або дифузю, а комплексна частина виявляє періодичні коливання в логарифмічному масштабі, що підтверджує не безперервну, а сходинкову фрактальну структуру.

Комплексні показники застосовуються в моделях фрактальних меж, що наближаються до краху (розрив матеріалу, землетруси, фінансові кризи). Математична модель демонструє такі процеси збільшення амплітуди логоперіодичних коливань, що важливо для прогнозування моментів злому фрактальної структури.

Результати побудованої моделі показали, що коректний опис процесу текучості для полімерних нанокомпозитів, наповнених вуглецевими нанотрубками у фрактальній інтерпретації, може бути отриманий в рамках концепції дробових похідних. Величина границі текучості контролюється двома факторами: модулем пружності та структурним станом нанокомпозиту, що характеризується фрактальною розмірністю його структури. Дробовий показник степеня визначається як дробова частина фрактальної розмірності структури нанокомпозиту, яка є основним інформатором щодо стану зазначеної структури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Onufriyenko V.M. Physical and geometric interpretation of α -Characteristics. Telecommunication and Radio Engineering. 1999. Vol.53. 4-5. P. 136-139.
2. Ortigueira M.D. A coherent approach to non-integer order derivatives. Signal Processing. 2006. 86. P. 2505.
3. Rathinaraj J.D.J., McKinley G.H., Keshavarz B. Incorporating Rheological Nonlinearity into Fractional Calculus Descriptions of Fractal Matter and Multi-Scale Complex Fluids. Fractal Fract. 2021. 5. P.174.

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному та
мережному режимах

ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2026

Машинобудівний факультет

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

13–17 квітня 2026 року

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. Університетська, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідectво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.