МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

# ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2025

## Машинобудівний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів
14–18 квітня 2025 року

Електронне видання на DVD-ROM

Запоріжжя • НУ «Запорізька політехніка» • 2025

УДК 621(06)
Т39

*Рекомендовано до видання Вченою радою*
*Національного університету «Запорізька політехніка»*
*(Протокол № 10 від27.05.2025 р.)*

**Упорядник:** Ніна АНТОНЕНКО, канд. фіз.-мат. наук, доцент

**Редакційна колегія:**
*Вадим ШАЛОМЄЄВ* , 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;
*Віра САВЧЕНКО*, канд. техн. наук, доцент;
*Наталія ФУРМАНОВА*, канд. техн. наук. доцент;
*Микола КАСЬЯН*, канд. техн. наук, доцент;
*Микола ДЄДКОВ*, канд. іст. наук, доцент;
*Олена ВАСИЛЬЄВА*, д-р екон. наук, професор;
*Світлана КОКАРЄВА*, канд. наук з фіз. вих. і спорту, доцент;
*Юрій ФІЛЕЙ*, канд. юр. наук, професор;
*Таісія ГАЙВОРОНСЬКА*, канд. філос. наук, доцент;
*Наталя ВИСОЦЬКА*, в.о. начальника НДЧ;
*Наталя САВЧУК*, начальник редакційно-видавничого відділу;
*Сніжана ВИЧУЖАНІНА*, керівник відділу наукової роботи студентів;
*Юлія ЧУШКІНА*, провідний фахівець відділу наукової роботи студентів;
Ніна АНТОНЕНКО, канд. фіз.-мат. наук, доцент

Т39 **Тиждень науки-2024. Машинобудівний факультет.** Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 14–18 квітня 2025 р. [Електронний ресурс] / Редкол. : Вадим ШАЛОМЄЄВ (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 128 с. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.

ISBN 978-617-529-497-0

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 машинобудівному факультеті Національного університету «Запорізька політехніка». Збірка розрахована на широкий загал дослідників та науковців

**УДК 621(06)**

ISBN 978-617-529-497-0

© Національний університет
«Запорізька політехніка»
(НУ «Запорізька політехніка»), 2025

**ЗМІСТ**

## СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ»

*Bezkhlibnyi D.O., Pukhalska H.V.*
Quality control methods for additive manufacturing products ..... 9
*Клименко Ю.О., Пухальська Г.В.*
Технологія виготовлення лопаті кермового гвинта з полімерних композиційних матеріалів..... 11
*Яхно Д.А., Дядя С.І.*
Аналіз впливу кількості зубів фрези на сталість різання та якість поверхні ..... 13
*Карасьов А.М., Пухальська Г.В.*
Застосування адитивних технологій в авіабудівній промисловості на прикладі компанії GENERAL ELRCTRIC ..... 14
*Вишнепольский Є.В., Бондарєв А.А.*
Підвищення зносостійкості складнопрофільних деталей механізмів подвійного призначення ..... 16
*Жердєв О.М., Пухальська Г.В.*
Застосування CAD/CAM-систем у виробництві авіаційних деталей .. 18
*Дядя С.І., Дзюба Д.В.*
Ризики при використанні штучного інтелекту в управлінні проєктами ..... 20
*Степанов Д.М., Патрабой В.В.*
Дослідження зносостійкості наплавлених поверхонь деталей зі сплаву ВТ3-1 ..... 21
*Кононов В.В., Дядя С.І., Кононов Г.В.*
Якість і точність електроерозійної обробки..... 23
*Вишнепольский Є.В., Шептун В.О.*
Оптимізація технологічних процесів механічної обробки з використанням адаптивних систем керування ..... 24
*Тришин П.Р., Короткий Р.Є.*
Аналіз особливостей динаміки процесу різання при точенні важкооброблюваних матеріалів ..... 25
*Вишнепольский Є.В., Штангелов В.А.*
Адаптація адитивних технологій для виробництва функціональних металевих деталей ..... 27

*Ковтун В.Ю., Гончар Н.В.*
Методи впливу на поверхню і поверхневий шар авіаційних деталей на завершальному етапі їх виготовлення ..... 28
*Вишнепольский Є.В., Ляшко Я.А.*
Інноваційні методи підвищення зносостійкості деталей машин шляхом застосування композитних покриттів ..... 30

## СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ»

*Yakovlev O.V., Babenko O.M.*
Methodology of researching the technology of increasing the electrical conductivity of composite cabinets of aircraft..... 32
*Сбродов Є.В., Павленко Д.В., Торба Ю.І.*
Використання спектрального та вейвлет аналізу сигналів вібрації АГТД для ідентифікації розпалювання форсажної камери ..... 33
*Шаповал А.С., Павленко Д.В.*
Інноваційні підходи до попереднього проектування газотурбінних двигунів ..... 35
*Shalomieiev V.A., Chushkina Yu.O., Shalomieiev A.V.*
Development of resource-saving technologies for the production of high-quality magnesium alloy castings for aircraft engines..... 37
*Котов О.Б., Семенов Є.В.*
Вдосконалення алгоритму конструктивної модернізації БпАК..... 38
*Котов О.Б., Лівертовський М.І.*
Алгоритм конструктивного вдосконалення льотно-технічних характеристик БпАК, які експлуатуються ..... 39
*Лазарєва О.О., Сахнюк Н.В., Лазарєв І.О.*
Теоретичні та методичні основи викладання дисципліни з прогресивних технологій у галузі авіадвигунобудування ..... 40
*Собченко С.В., Уланов С.О.*
Нові технології діагностики та прогнозування залишку ресурсу авіаційних двигунів ..... 42
*Гвоздик Р.П., Бабенко О.М.*
Підвищення ефективності роботи осьового компресора при використанні керованих систем управління клапанами ..... 44
*Качан О.Я., Пухловський С.В.*
Чисельне моделювання запиленого повітряного потоку в трубках-циклонах: валідація CFD-моделі на основі експериментальних даних..... 48

*Півень І.П.*
Застосування оптимізованого варіанту конструкції вальниці для підвищення її ресурсу у складі авіаційних двигунів ..... 49
*Уланов С.О., Качан О.Я., Польнікова І.С. , Алексєєнко М.І.*
Технологічні особливості виготовлення заготовок робочих лопаток компресора ГТД методом гарячого видавлювання ..... 51
*Кокотін В.І.*
Композиційні матеріали для деталей авіаційного призначення на основі нанотехнологій ..... 53
*Польнікова І.С.*
Методи отримання і застосування нанопорошків ..... 55
*Двірник Я.В., Єсауленко С.В.*
Поступовий розвиток втомної тріщини та формування борозенок в деталях авіаційних газотурбінних двигунів, виготовлених зі сплавів на титановій основі ..... 57

## СЕКЦІЯ «МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ ТА СИСТЕМИ»

*Фролов М.В., Танченко С.В., Штанкевич В.С.*
Карти Шухарта як інструмент оцінки стану обладнання для створення раціонального регламенту його обслуговування ..... 60
*Танченко С.В., Фролов М.В., Смагін Р.Г.*
Вибір методу реверс-інжинірингу для формування оптимальної розгортки макету ..... 62
*Циганов В.В., Первєєв Д.В.*
Рішення просторової задачі опору металу деформації при термопластичному навантаженні ..... 64
*Танченко С.В., Фролов М.В., Вишенко Г.А.*
Дослідження напруженого стану конструкцій пристосування гнуття з використанням САЕ системи ..... 65
*Солоха В.В., Танченко С.В.*
Вплив температурної деформації в КГП на точність координатних переміщень робочих органів верстатів з ЧПК ..... 67
*Циганов В.В., Первєєв Д.В.*
Вплив полімерних сполук МОТЗ на ефективність шліфування ..... 69

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

*Мартовицький Л.М., Глушко В.І., Шаніна З.М.*
Дослідження динамічних характеристик їздових балок рудно-козлових перевантажувачів ..... 71
*Фролов Р.О., Сидоренко М.В.*
Забезпечення надійності зубчастих передач ..... 72
*Козак Д.С.*
Модернізація випробувальної установки РС-1 ..... 73
*Мартовицький Л.М., Євдокімов І.В.*
Спосіб діагностування кранових металоконструкцій ..... 74
*Фролов Р.О., Осаулко Р.С.*
Дослідження впливу коефіцієнта концентрації напружень на опір втомі низьколегованої сталі 09Г2С в умовах асиметрії циклу ..... 75
*Кононов В.В., Махінов Ф.К.*
Аналіз умов експлуатації деталей ГТУ ..... 76
*Кравченко Є.О., Сидоренко М.В., Фролов Р.О.*
Підвищення довговічності кінцевих балок мостових кранів ..... 79
*Козак Д.С., Козак В.С.*
Модернізація лабораторного стенду мостового крана ..... 80
*Сидоренко М.В., Єманов М.Ф.*
Вдосконалення способів виміру залишкових напружень в ходових колесах кранів ..... 81

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

*Матюхін А.Ю., Доновський І.О.*
Підвищення механічних властивостей та експлуатаційних властивостей мітчиків засобами пластичного формування ..... 83
*Обдул В.Д., Єпішкін О.В.*
Гвинтовий прес з муфтовою включення: енергоефективний підхід до штампування складних виробів ..... 84
*Матюхін А.Ю., Єрмоленко А.В., Жолнірчук О.В.*
Дослідження технології виготовлення деталей з вуглецево-полімерних композицій ..... 85
*Матюхін А.Ю., Кривопустов І.Є.*
Дослідження технології отримання антифрикційних виробів ..... 86

*Матюхін А.Ю., Ляшенко Ю.А.*
Магнітні порошкові матеріали ..... 88
*Матюхін А.Ю., Мисник В.В.*
Технологія виробництва заготовок із вуглецевої сталі способами прокатування ..... 89
*Матюхін А.Ю., Пакета І.М.*
Аналіз недоліків заводської технології виробництва прокату круглого перерізу ..... 91
*Обдул В.Д., Шевчук Д.О.*
Розробка технології прокатування трубної заготовки на блюмінгу .... 92
*Обдул В.Д., Карпов В.Д.*
Розробка технології прокату крупного сорту зі сталей аустенітного класу ..... 93
*Бень А.М., Неклеса М.Е.*
Гаряче штампування сталей надвисокої міцності ..... 94
*Бень А.М., Фролов Є.В.*
Дослідження та вибір матеріалів штампів гарячого штампування ..... 95
*Бень А.М., Щербина А.Д.*
Перспективи розвитку процесів точного об'ємного штампування видавлюванням ..... 96
*Єпішкін О.В., Нікітенко А.Л.*
Розробка системи автоматизованого проектування для обладнання прокатного виробництва ..... 97
*Бень А.М., Мережко Б.В.*
Чисельне моделювання процесів гарячого штампування ..... 98
*Єпішкін О.В., Четверик О.О.*
Застосування комп'ютерного інжинірингу у створенні штампового оснащення ..... 100
*Єпішкін О.В., Панченко К.Є.*
Вплив технології нагріву на якість штампування металів..... 101

## СЕКЦІЯ «МАТЕМАТИКА»

*Онуфрієнко В.М., Килимник І.М., Слюсарова Т.І., Зіненко І.І.*
Приповерхневий аномальний фрактальний скін-ефект в метаматеріальному шарі ..... 103
*Сніжко Н.В., Анпілогов Д.І.*
Математика в технічному університеті: міждисциплінарний підхід 105

*Антоненко Н.М.*
Застосування перетворення Фур'є до задачі термопружності для шару на жорсткій півплощині за відсутності дотичних напружень на його межах ..... 107
*Онуфрієнко В.М., Антоненко Н.М., Засовенко А.В., Фасоляк А.В.*
Задача Штурма-Ліувілля для диферінтегральних граничних умов Діріхле-Діріхле, Діріхле-Неймана, Неймана- Неймана ..... 108
*Фасоляк А.В.*
Нестаціонарна динаміка пружного середовища з циліндричною порожниною та поверхнею, підкріпленими тонкостінними структурами..... 110
*Шаніна З.М., Засовенко А.В.*
Диференціальні характеристики лобової поверхні зубчастого робочого органу ..... 112
*Нечипоренко Н.О.*
Оцінювання періоду часових рядів..... 113
*Левицька Т.І., Пожуєва І.С.*
Алгоритм розрахунку мінімальної маси колон, які підпирають оболонку ..... 115
*Засовенко А.В.*
Моделювання швидкісного деформування двох балок під дією пружно-пластичного ударника..... 119
*Онуфрієнко В.М., Слюсарова Т.І., Козак В.С.*
Диферінтегральна модель мемристичної складової імпедансу фрактальноконфігурованого метаматеріалу ..... 120
*Сніжко Н.В., Гаврик В.М.*
Застосування інтегрального числення для розв'язання деяких задач гідростатики ..... 122
*Пожуєва І.С., Шабля Д.О.*
Використання матриць у шифрі Хілла ..... 124

## СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ»

УДК 62-9
Bezkhlibnyi D.O.[1], Pukhalska H.V.[2]
[1] PhD student NU Zaporizhzhia Polytechnic
[2] PhD, assistant professor NU Zaporizhzhia Polytechnic

# QUALITY CONTROL METHODS FOR ADDITIVE MANUFACTURING PRODUCTS

The quality of the surface of a product is understood as the state of its surface layer as a result of the influence of one or more technological methods that are sequentially applied. The most important characteristic of the quality of the surface of additive manufacturing products is roughness, which significantly affects the operational properties. The data on the values of the surface roughness of additive manufacturing products obtained by different authors have a significant spread, associated with the influence on this indicator of many factors - the method and accuracy of measurement, the measuring instrument used, the physical features of the implementation of the additive manufacturing process in different installations, the presence and type of post-processing, etc. Table 1 shows the generalized values of the surface roughness of products for some methods of additive growth and after post-processing.

Table 1 – Surface roughness of additively manufactured products

| Additive manufacturing process | Surface roughness of additively manufactured products (without post-processing) $R_a$, mc | Surface roughness after post-treatment (best results) $R_a$, mc |
|---|---|---|
| SLA | 2÷40 | 0,64 |
| SLS | 5÷35 | 0,8 |
| FDM | 9÷40 | 0,3 |
| LOM | 6÷27 | – |

Structural factors are important indicators of the quality of additive manufacturing products, in particular the quality of the surface layer. For example, typical defects observed in products made of metal materials (SLS, SLM) include the absence of fusion (delamination), shrinkage porosity, gas porosity, microcracks, thermal stresses, warping and “bulging”. Typical defects of polymer and composite products manufactured by additive manufacturing can be low interlayer adhesion, warping, absence of a layer, the presence of microcracks, the formation of micro- and macroporosity. The most promising methods of non-destructive testing of additive manufacturing products, which allow detecting both surface and internal

defects of the structure and even measuring geometric parameters with high accuracy, are ultrasonic imaging, neutron tomography, X-ray computed tomography, etc. The X-ray computed tomography method is based on estimating the density of the material by the intensity of radiation passing through the object and hitting the detector. The method makes it possible to create a three-dimensional model of the scanned object, with the subsequent obtaining of any of its sections. Based on the three-dimensional image during X-ray examination, it is possible to obtain the exact dimensions of both the internal and external surfaces of the additive manufacturing of products, determine the geometry of the internal surfaces and channels, and obtain a three-dimensional picture of the location of defects - voids, pores, cracks, inclusions, etc.

A special role in product quality control is assigned to non-destructive methods of control (monitoring) in real time, included directly in the technological process of layer-by-layer growth of products. The most effective method of monitoring, active control of a number of additive manufacturing technologies (SLS, SLM) is the method of infrared thermography, which allows you to visualize the temperature distribution on the surface of the product layer by layer and, as a result, provides control of the history of product formation by layer-by-layer growth, as well as the dynamics of processes for the purpose of product quality management. The main research tool in the thermography method is an infrared camera, which operates on the principle of registering near-infrared radiation (i.e. electromagnetic radiation with a wavelength of 0.9÷14 μm) in the laser processing zone. Information on the dynamics of the product surface temperature throughout the entire thermal cycle of laser processing is of great practical interest, since the lack of operational control in selective laser melting is one of the main obstacles to its widespread industrial application. Infrared cameras, built into the general scheme of additive manufacturing installations, provide continuous temperature measurement in local areas during the additive layer-by-layer growth process, control of thermal fields inside each layer, as well as detection of various defects of system integrity, in particular pores, microcracks and geometry violations. Thus, the infrared thermography method allows you to control the dynamics of sintering processes of dispersed media, the features of melting and solidification of melts (SLS, SLM, FDM), provides detection and prevention of the formation of the most dangerous defects of products during the layer-by-layer growth process. Based on infrared thermography data, it is possible to predict the features of microstructure formation, which ultimately determine the functional properties of products.

## REFERENCES

1. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – 91 с.

2. Huang S. Microstructure and Porous Defects of a Spray-Formed and Hot Worked 7000 Aluminum Alloy / S. Huang, Z. Li, B. Xiong, Y. Zhang, X. Li, H. Liu , H. Yan , L. Yan // Materials Science Forum. – 2017. – Vol. 879. – P. 1778–1782.

УДК 621
Клименко Ю.О.[1], Пухальська Г.В.[2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТІ КЕРМОВОГО ГВИНТА З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Аналіз технологій показав, що оптимальна технологія виготовлення лопаті кермового гвинта вертольота з полімерних композиційних матеріалів передбачає застосування оправки з силіконової гуми замість еластичної діафрагми (прес-камери). Технологія виготовлення пера лопаті полягає у формуванні пакетів препрега у прес-формі, що забезпечує аеродинамічний контур лопаті (рис.1).

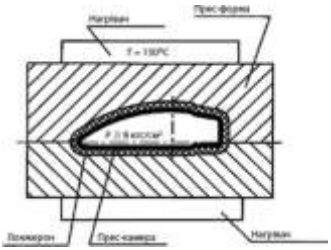



Рисунок 1 – Формування пакетів препрега у прес-формі.

До стінок прес-форми шари склопластику необхідно притиснути з зусиллям 8кгс/см$^2$. Одним із складних процесів виготовлення лопаті є створення необхідного тиску пресування препрега в прес-формі. Це обумовлено геометричною формою аеродинамічного профілю лопаті в місцях сполучення нижнього і верхнього обводів у вигляді поверхонь подвійної кривизни змінного радіусу. Прес-камера повинна витримувати необхідний тиск і температуру 150$^0$С протягом 4 годин [2]. Температура задається в автоматичному режимі вбудованим в прес-форму нагрівальним елементом, тиск - нагнітанням стисненого газу (азот). Готовий виріб повинен легко витягуватися з внутрішньої порожнини прес-форми.

Для виготовлення препрега використовується склотканина. Всі роботи, пов'язані з просоченням склотканини, проводяться в захищеному приміщенні за температури повітря 18…25$^0$С та відносної вологості не вище 75%. Склотканину, призначену для просочення, необхідно попередньо просушувати в термошафі за температури 80$^0$С протягом 6 год. Час між операцією сушки та початком просочення не повинен перевищувати 4 г. Отримані після просочення напівфабрикати (препреги) служать вихідним матеріалом для подальшої роботи зі створення елементів конструкцій лопатей. Основні вимоги на цьому етапі, що визначають якість лопатей, що виготовляються-точність дозування компонентів і витримок заданих технологічних режимів змішування, дотримання параметрів просочення (температури в сушильній шахті просочувальної машини, швидкості просочення та ступеня просочення склотканин зв'язуючим).

Другий етап складається з таких операцій як розкрій препрегів, клейових плівок та гум на заготівлі і їх розмітка; комплектація пакетів і заготовок (конструкція оболонки складається з п`яти пакетів); викладка пакетів на оправки; вакуумування пакетів і їх попереднє підпресування в автоклаві; зберігання препрегів та зібраних пакетів.

Третій етап - укладання отриманих заготовок на технологічні оправки для попереднього опресування пошарово. Викладка проводиться по осям, нанесеним на оправку, з контролем напряму основи тканин по лініям укладки основи, без складок та наявності гофр. Попереднє опресування проводиться в автоклаві за температури 60$^0$С та вакуумі в 0,6 ... 0,8 бар. Підготовані пакети укладають у прес-форму на оправці–вкладиші з силіконової гуми марки пентаеласт-750. Цей матеріал працює при температурі від -50 до + 220$^0$С. Остаточне формування оболонки лопаті відбувається при ступінчастому підвищенні температури зі швидкістю 1…2 градуса в хвилинудо 65$^0$С, з витримкою при цій температурі 30 хвилин і послідуючим виходом на режим 150$^0$С з витримкою 4 години. Після охолодження прес-форми до температури навколишнього середовища відбувається виймання деталі і видалення вклади з внутрішнього каналу лопаті. Готову оболонку укладають у спеціальне пристосування. Заповнювач з пінополіуретану виготовляється заливкою за вільного вспінювання за допомогою заливальної машини за температури 35 ... 40$^0$С.

На наступному етапі оболонка лопаті поступає на ділянку механічної обробки. На стрічково-пильному верстаті проводиться обрізка технологічних припусків, з яких в подальшому виготовляють зразки для підтвердження хіміко-фізичних властивостей отриманого композиту вимогам конструкторської документації. Переваги оправки із силіконової гуми: спрощується конструкція прес-форми; значно скорочується брак при формуванні і втрати дорогокоштуючих матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Habali S. M. Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics. Part I: Design of the blade and root / S. M. Habali, I. A. Saleh // Energy Conversion and Management. – 1999. – Vol. 41, No. 3. – P. 249–280. DOI: 10.1016/S0196-8904(99)00103-X.

2. Agarwal B. D. Analysis and performance of fiber composites / B. D. Agarwal, L. J. Broutman, K. Chandrashekhara. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. – Chapter 2. – P. 25–45.


УДК 621.914

Яхно Д.А.[1], Дядя С.І.[2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ЗУБІВ ФРЕЗИ НА СТАЛІСТЬ РІЗАННЯ ТА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ

У сучасній металообробці важливе місце займає забезпечення високої якості оброблених поверхонь при мінімальних витратах часу та ресурсів. Кінцеве фрезерування залишається одним із найпоширеніших і найбільш універсальних методів механічної обробки, що ефективно застосовується для формування поверхонь різної складності. Кінцеві фрези зарекомендували себе як високоточний і багатоцільовий інструмент, здатний забезпечувати якісну обробку широкого спектра матеріалів і виконання різних технологічних операцій з високою продуктивністю.

Одним із ключових факторів, що впливають на якість обробки та стабільність процесу фрезерування, є конструктивні характеристики інструмента. Зокрема, кількість зубів фрези значною мірою визначає характер взаємодії інструмента з заготівкою, динаміку навантажень, вібраційний стан системи та кінцеву якість поверхні. Кількість зубів фрези є визначальним фактором, що впливає на частоту контакту інструмента з матеріалом, розподіл сил різання та загальний динамічний стан системи. Збільшення кількості зубів зазвичай призводить до зниження амплітуди вібрацій завдяки меншому об’єму знімання на один зуб. Це сприяє стабілізації процесу різання та зниженню рівня вібраційних коливань. Водночас спостерігається покращення якості обробленої поверхні: зменшується шорсткість, хвилястість і мікронерівності. Проте надмірна кількість зубв може спричинити зворотний ефект – недостатній простір для відведення стружки, перегрів, забивання зубів, що веде до зростання сил різання, появи коливань і погіршення якості поверхні.

Оптимальна кількість зубів залежить від умов обробки. Зокрема, при високошвидкісному фрезеруванні ефективні фрези з більшою кількістю зубів, що забезпечують рівномірність процесу. Для чорнової обробки доцільніше застосовувати фрези з меншою кількістю зубів, які краще справляються з великим об'ємом стружки.

З метою забезпечення стійкості кінцевого фрезерування за різних режимів різання заплановані експериментальні дослідження з використанням фрез з різною кількістю зубів.

УДК 62-9
Карасьов А.М.[1], Пухальська Г.В.[2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АВІАБУДІВНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ НА ПРИКЛАДІ КОМПАНІЇ GENERAL ELRCTRIC

Компанія GE Aviation є одним із лідерів у застосуванні адитивних технологій (3D-друку) в авіаційній промисловості. Вона не тільки використовує 3D-друк для прототипування, але й успішно впроваджує у серійне виробництво ключові компоненти авіаційних двигунів. Федеральна Авіаційна Адміністрація (FAA) США видала схвалення на льотну експлуатацію першої деталі, виготовленої за технологією 3D-друку у реактивному двигуні виробництва GE для літаків комерційних авіаліній. Корпус датчика T25 нещодавно став першою деталлю, виготовленою методом 3D-друку, сертифікованим (FAA) США для льотної експлуатації в комерційних реактивних двигунах виробництва General Electric.

Рисунок 1 – Корпус датчика T25 виробництва GE.

В даний час GE Aviation проводить консультації з Boeing щодо оснащення даною деталлю, виготовленої методом 3D-друку більш ніж 400 двигу-

нів GE90-94B, одних із найбільших і найпотужніших у світі. Компанія GE вже розпочала льотні випробування турбореактивного двигуна LEAP, у конструкції якого є 19 3D-друкованих паливних форсунок. Даний двигун, призначений для встановлення на нові вузькофюзеляжні літаки, такі як Boeing 737MAX і Airbus A320пео, розроблений CFM International (50/50 СП між GE Aviation і французькою Safran (Snecma)). Компанія GE також проводить розробку паливних форсунок та інших деталей, що виготовляються за технологією 3D-друку для двигуна GE9X, призначеного для нового авіалайнера Boeing 777X. GE9X стане найбільшим у історії реактивним двигуном. GE Aviation використовує адитивні технології виробництва паливних форсунок для своїх двигунів CFM LEAP, які встановлюються на літаки Airbus і Boeing.

Рисунок 2 – Паливна форсунка, яка виготовлена за допомогою 3D-друку.

Це стало одним із перших прикладів успішного застосування 3D-друку для масового виробництва критично важливих деталей в авіації. 3D-друк дозволяє створювати паливні форсунки більш складної геометрії, що призводить до кращого змішування палива та повітря, підвищуючи ефективність двигуна та знижуючи викиди. Крім того, адитивне виробництво дозволило зменшити кількість деталей у форсунці (з 20 до 1), що знизило вагу та підвищило надійність. Новий корпус паливної камери, виготовлений із кобальт-хромового сплаву за технологією 3D-друку, забезпечує захист чутливої електроніки температурного датчика від зледеніння та агресивного потоку усередині двигуна.

Рисунок 3 – Корпус паливної камери.

У звичайних умовах, компанії GE знадобилося б кілька років на проектування цієї деталі та виготовлення її прототипу. Тим часом, групі інженерів GE вдалося скоротити цикл розробки та запуску в серійне виробництво щонайменше на 1 рік. Успішне застосування 3D-друку для виробництва паливних форсунок GE Aviation це приклад можливостей адитивних технологій в аерокосмічній галузі.

Таким чином, GE Aviation є яскравою ілюстрацією того, як адитивні технології можуть бути успішно впроваджені не лише для прототипування, а й для серійного виробництва складних та відповідальних деталей у машинобудуванні, зокрема, в авіаційній промисловості.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Manufacturing Milestone: 30,000 Additive Fuel Nozzles // GE Aerospace News. – 2018. – № 4. – P. 32–43.

УДК 621.438:620.193/.199:621.793.7
Вишнепольский Є.В.[1], Бондарєв А.А[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНІЗМІВ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Складнопрофільні деталі в умовах експлуатації піддаються високим механічним, термічним та динамічним навантаженням. Через це вони швидко зношуються, що призводить до втрати їх ефективності або до виходу з ладу. Особливо критично це для механізмів подвійного призначення, які мають функціонувати безвідмовно навіть в екстремальних умовах.

На прикладі найбільш поширених та складних механізмів – газотурбінних двигунів (ГТД), застосування яких поширюється як на цивільний транспорт, так і на військовий (зокрема ракетне озброєння). У статті більш детально розглядаються методи підвищення зносостійкості таких деталей як сопловий апарат (СА). Подаються випадки процесів зношування, оцінені перспективні методи зміцнення та захисту поверхонь. Наведені приклади експериментальних досліджень, а також перспективи розвитку методів мінімізації негативного впливу факторів, що спричиняють втрату ефективності механізмів.

Сопловий апарат зазнає дії високотемпературного, ерозійного та корозійного зношування. Його місцерозташування – одразу після камери згоряння (КЗ) – визначає напряму, скільки часу турбіна зберігатиме геометричні та механічні властивості, а також буде спроможна видавати бажаний результат

зі швидкості та тиску гарячого потоку (до 1500 °С на вході в СА). Зважаючи на складну просторову форму, високі вимоги до аеродинаміки та надійності, забезпечення високої зносостійкості є критичним завданням для вирішення при проектуванні та виробництві.

Основа будь-якого СА складається з напрямних лопаток, що мають профіль різного ступеню кривизни, розташованих у кільцевому корпусі – зовнішньому та внутрішньому, які утворюють тракт. Саме він формує потік гарячих газів на виході з КЗ та визначає ефективність турбіни. Основні конструктивні особливості:

1) може бути виконаний як суцільно відлитим або у складі більшої складальної одиниці, до якої входить у вигляді лопаток або секторів лопаток;

2) складний аеродинамічний профіль лопаток та трактової поверхні;

3) тонкостінна геометрія. Найтонший елемент конструкції (окрім лопаток) може сягати 1.2 мм;

4) високотемпературне середовище (до 1500 °С);

5) внутрішня система охолодження (переважно повітряна);

6) робота у циклічному режимі навантажень (термоудари).

У військовому застосуванні характерні форсажні режими та екстремальні (циклічні температурні та механічні) умови на відносно короткий термін, у той час як цивільні двигуни працюють у триваліших режимах, але з постійною високою інтенсивністю.

На сьогодні існує декілька методів, що значно підвищують спроможності конструкції та геометричних властивостей соплових апаратів. Основні з них:

1) підбір матеріалу для виготовлення, а саме застосування жароміцних та жаростійких сплавів типу Inconel 738 та 792, Udimet 500, René 80, René N5 – нікелеві суперсплави з високою термостійкістю або сплави типу ЖС та ВХ, що мають схожі фізико-хімічні характеристики та гарні ливарні властивості;

2) проектування конструкції та її розрахунок за допомогою програм ANSYS та Abaqus, що дозволяє змоделювати напружено-деформований стан соплових лопаток при зміні температури та передбачити ймовірність утворення дефектів (тріщин) в критичних зонах;

3) проектування конструкції, що передбачає додаткове пасивне повітряне охолодження профілю пера лопаток та трактової поверхні;

4) нанесення теплозахисного покриття (ТЗП): наприклад, на основі $ZrO_2$-$Y_2O_3$, а також з вмістом Al та Si. На основі подальших експериментів створюються карти зношування (англ. Oxidation-Erosion Map), що подаються в координатах «температура–швидкість потоку» і забезпечують об’єктивний набір показників для вибору оптимального матеріалу покриття в залежності від умов експлуатації.

Серед прикладів вдалих експериментів можна виділити дослідження компанії General Electric (США): було проведено термоциклічне тестування лопаток із нанесеним ТЗП на основі $ZrO_2$ при температурах 1150 °С та без. У результаті експерименту було підтверджено збільшення ресурсу вузлу в 2.8 разів для деталей з ТЗП порівняно з незахищеними деталями.

Ще одним гарним прикладом можуть слугувати результати, отримані в результаті досліджень на підприємстві АО «Мотор Січ» (Україна). В якості об'єкту тестування використовувалися СА зі сплавів ВЖЛ12У та ВКНА-25 в умовах циклічного нагрівання-охолодження до 1250 °С. Найкращу термостійкість показали зразки з керамічним двошаровим покриттям NiCrAlY + YSZ.

Підвищення зносостійкості складнопрофільних деталей, зокрема соплових апаратів, є ключовим чинником довговічності турбіни і загалом ГТД. Застосування сучасних суперсплавів, теплозахисних покриттів і числового моделювання дозволяє значно: скоротити час на проектування конструкції та їх подальше виготовлення; зменшити вплив людського фактору в розрахунках; підвищити ресурс роботи та надійність деталі (механізму) як цивільного, так і військового призначення.

УДК 621
Жердєв О.М.[1], Пухальська Г.В.[2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ЗАСТОСУВАННЯ CAD/CAM-СИСТЕМ У ВИРОБНИЦТВІ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ

Сучасні CAD/CAM-системи дозволяють технологам-програмістам змінювати твердотільну модель на власний розсуд методами прямого редагування, офсетно зміщувати грані або кромки, створювати округлення, переміщати та копіювати грані. Можна розділяти твердотільну грань на кілька граней у каркасному чи складовому поданні, а також розбивати деталь на кілька сегментів, щоб застосувати до них різні стратегії формування траєкторії інструменту, що полегшує обробку складних деталей. Хоча виробники можуть і не використовувати якісь CAD інструменти для зміни самої деталі, вони мають можливість легко і з мінімальними витратами створювати оснащення при виконанні складних проектів, проектуючи пристрої та програмуючи їхню обробку в одному CAD/CAM-середовищі.

Найчастіше для авіакосмічної галузі необхідно отримати гладкі, точні поверхні, що здебільшого потребує якихось додаткових операцій (полірування) для досягнення бажаного результату. Це особливо актуально у випадку,

коли йдеться про частини реактивного двигуна або трансмісії, які мають дуже жорсткі допуски і при цьому повинні ідеально підходити один до одного. Розумним підходом є формування таких керуючих програм, котрі дозволяють виконувати як чорнову та напівчистову, так і фінішну обробку без необхідністі знімати деталь з верстата. Коли йдеться о компонентах турбіни, а особливо про диски (Bladed Disk), лопатки яких складають єдине ціле з диском ротора, обробка повинна вестись у повній відповідності із документацією. Це непроста справа, якщо деталі виготовлені із жароміцних суперсплавів, що передають тепло ріжучому інструменту. Композити часто створюються шляхом пошарового з'єднання різних матеріалів, включаючи метали, та демонструють специфічні властивості щодо механічних навантажень, плавлення та деформації під час високошвидкісної обробки, що також є проблемою. Вибір правильного поєднання інструменту та траєкторії для кожної окремої операції різання має першорядне значення для скорочення відсотка браку та збільшення терміну служби фрез. Останнім часом співпраця розробників CAM-систем та постачальників ріжучого інструменту розширилося та охопило етап фінішних проходів, коли можливості автоматизованого формування інноваційних траєкторій спричиняють створення інноваційних різальних інструментів та навпаки. Одним із таких прикладів є програмна підтримка нових сегментних фрез, що добре підходять для чистових операцій. У багатьох випадках це може значно скоротити тривалість циклу чистової обробки в порівнянні з використанням більш традиційних кінцевих сферичних фрез. Там, де можуть застосовуватися ці інструменти та відповідні траєкторії, скорочення часу циклу в межах від 50% до 80% і навіть більше стало нормою при збереженні чудової якості поверхні. Щоб ця сучасна чистова стратегія досягла досконалості, необхідна узгодженість фрези та функціоналу CAM-системи, особливо у разі одночасної обробки за п'ятьма осями. Сегментні фрези можуть використовуватися як у 3-, так і у 5-осьових траєкторіях чистової обробки. При правильному використанні сегментні інструменти забезпечують чистоту та швидкість обробки в порівняні з тим, що можна досягти за допомогою набагато більшої кінцевої сферичної фрези.

Рисунок 1 – Сегментний інструмент (праворуч) та кінцева сферична фреза (ліворуч).

Досвідчені у справі багатоосьової обробки технологи-програмісти можуть точно налаштувати параметри, щоб зробити траєкторію обробки ще більш ефективною за наявності особливих вимог щодо чистоти обробки поверхні. Сегментні фрези розроблені таким чином, що інструмент малого діаметра має великий ефективний радіус різання – у багато разів перевищуючий допустимий для сферичної кінцевої фрези. Така конструкція дозволяє зменшити кількість чистових проходів та висоту гребінців на матеріалі, що суттєво покращує якість поверхні при одночасному скороченні тривалості циклу. Ці інструменти можна задіяти і на 3-осьових верстатах з ЧПК, але слід виявляти велику обережність при визначенні площин інструменту, щоб гарантувати високу точність чистової обробки та правильні умови контакту фрези з деталлю. Найкращі машинні цикли виходять у разі використання багатоосьового обладнання. Переваги надають і сучасні швидкодіючі стійки ЧПК, здатні аналізувати керуючу програму, заглядаючи вперед, і враховувати майбутні умови різання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вірченко Г. А. Деякі питання комп'ютерного структурно-параметричного конструювання вузлів літака [Текст] / Г.А. Вірченко // Інформаційні системи, механіка та керування. – Вип. 1. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008. – С. 70–76.

2. Ванін В. В. Оптимальне варіантне геометричне моделювання технічних об'єктів [Текст] / В. В. Ванін, В. Г. Вірченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Вип. 89. – К.: КНУБА, 2012. – С. 22–27.

УДК 005.31

Дядя С.І.[1], Дзюба Д.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-112 НУ «Запорізька політехніка»

## РИЗИКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УПРАВЛІННІ ПРОЄКТАМИ

Життєздатність будь якого підприємства забезпечується наявністю замовників і спроможністю виробництва швидко реагувати на зміни ринку збуту продукції. Впровадження управління проєктами для досягнення зазначених завдань засновується на позитивних прикладах роботи успішних підприємств світу. На сьогоднішній день для прискорення робіт з проєктної діяльності до проєктного управління залучається штучний інтелект (ШІ). Але є

деякі нюанси, які можуть вплинути на ефективність його використання. Серед них можна виділити наступні:

1. Незнання аспектів безпеки та конфіденційності ШІ на етапі проектування. Для правильного впровадження ШІ потрібен такий самий рівень моделювання кіберзагроз та превентивного контролю безпеки, що й для будь-якої корпоративної системи, щоб її не могли зламати кіберзлочинці.

2. Недостатні, неструктуровані чи ненадійні дані навчання ШІ. Жоден ШІ не може існувати без відповідних, великих обсягів високоякісних даних, які повинні постійно оновлюватись при виявленні недоліку в системі прийняття рішень.

3. Відсутність скоординованої бізнес-стратегії ШІ. Перед впровадженням системи ШІ необхідно визначити, обговорити та затвердити її цілі всередині компанії. Правові та нормативні питання також мають бути розглянуті та оцінені. Це допоможе уникнути ситуації, коли ШІ втручається в інтереси зовнішніх зацікавлених сторін або порушує закон.

4. Відсутність зрозумілості результатів, що генеруються ШІ. Системи машинного навчання «чорна скринька» та «біла скринька» мають свої переваги та недоліки. Обидва підходи використовуються для вирішення практичних і складних проблем, але організації необхідно розуміти вхідні дані, проблему, яку вони зрештою намагаються вирішити, і найкращий спосіб структурувати та подати вихідні дані у простій та зрозумілій формі.

З врахуванням вищенаведеного можна констатувати, що ідеальним варіантом при проєктному управлінні буде поєднання найкращого з двох світів: міць машинного навчання та геніальність людського інтелекту.

УДК 621.785.5
Степанов Д.М.[1], Патрабой В.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-114м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ НАПЛАВЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВУ ВТ3-1

Титан та його сплави знаходять все більше розповсюдження в різних галузях народного господарства нашої країни. Наряду з розширенням галузей застосування деталей, вузлів та конструкцій з титанових сплавів виникає необхідність в удосконалені експлуатаційних якостей вже робочих елементів машин. Насамперед це стосується збільшення зносостійкості деталей, які труться один об одну.

Ця задача вирішується в основному шляхом з’єднання легованих сплавів титану, які не приводять до очікуваного ефекту, так як в наслідок великої

різниці питомої ваги та температур плавлення титану та домішок (карбід бору, карбід вольфраму та ін.) не вдається отримати сплави з рівномірним розподіленням легуючих елементів. Інший шлях збільшення зносостійкості – застосування спеціальних наплавлень на елементах поверхонь деталей, які труться.

Отримання електродного наплавлюючого матеріалу з необхідними за зносостійкістю властивостями може бути виконано з використанням методів порошкової металургії. Ці методи дозволяють не тільки вирішити проблему рівномірного розташування легуючих домішок в титановій основі, а також створювати матеріали («псевдосплави») з унікальними властивостями, які неможливо отримати будь-яким іншим способом.

Як відомо легування титану карбідом бору, або карбідом вольфраму приводить до покращення показників зносу.

Для дослідження умов наплавки були виготовлені 7 партій електродів ∅5-6 мм, довжиною 500-700 мм по 5 кг. Для забезпечення повної переплавки карбідів вольфраму та карбідів бору при виборі режимів аргонного-дугового наплавлення в якості флюсу використовували 7% фтористого кальцію. вихідними матеріалами слугували чистийелектролітичний титановий порошок фракції -0,5+0,18 мм, порошок карбіду бору фракції 0,004+0,06 мм та порошок карбідів вольфраму фракції 0,002 мм.

Технологічний маршрут виготовлення наплавочних електродів передбачав наступні операції: мокре змішування шихти визначеного складу; штампування заготовок-брикетів; нагрів заготовок-брикетів в контролюємому середовищі аргону; пресування брикетів при визначеному термомеханічному режимі в середовищі аргону.

Наплавлення поверхонь титанового сплаву було виконане електродом з присадочним матеріалом з додаванням карбіду бору та карбіду вольфрама, а також карбідною проволокою у захисній атмосфері $A_2+O_2$ та $A_2+N_2$.

Випробування наплавок на зносостійкість проводили в середовищі корундового піску.

Результати випробувань на зносостійкість наплавок показали наступні результати:

зносостійкість наплавок, легованих карбідом бора, збільшується з підвищенням змісту цього елементу в присадочному матеріалі;

добавки карбіду вольфраму в присадочний матеріал підвищення зносостійкості в корундовому піску не дали.

При цьому також було виявлено, що наплавки, які виконані присадочним матеріалом з додаванням карбіду бору та карбіду вольфраму значно краще стоять на зносостійкість в корундовому піску у порівнянні з наплавками, які були виконані у захисній атмосфері $A_2+O_2$ та $A_2+N_2$.

УДК 621.762.793:669.15
Кононов В.В.[1], Дядя С.І.[1], Кононов Г.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-114м НУ «Запорізька політехніка»

# ЯКІСТЬ І ТОЧНІСТЬ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ

Відповідальні деталі газотурбінних двигунів складаються з деталей, що працюють в екстремальних умовах при температурах, близьких до температури плавлення самого жароміцного сплаву. Для забезпечення довговічної і надійної експлуатації виробів, деталі двигунів повинні відповідати усім показникам їх функціонального призначення, за, рахунок точності розмірів та форми і кості поверхневого шару.

Якість поверхні, обробленої на електроерозійному верстаті, характеризується двома основними показниками: шорсткістю і змінами в поверхневих шарах металу під впливом теплової дії розрядів. Найбільший вплив на це робить електричний режим. Розміри лунок, що формують мікрорельєф, залежать від енергії імпульсу. Зі збільшенням енергії імпульсу висота мікронерівностей збільшується. Тому чорнову обробку здійснюють на малій частоті імпульсів з великою енергією. При цьому шорсткість оброблюваної поверхні Rz 80 мкм і грубіше. Чистову обробку виконують з використанням імпульсів малої енергії з великою частотою. Шорсткість поверхні, що досягається на електроерозійних копіровально-прошивочних верстатах без застосування спеціальних технологій Ra1,25мкм.

Зона термічного впливу для більшості сталей і сплавів має складну структуру, залежну від режимів обробки. Так, при обробці сталі Ст15 на струмах до 30А (частота 400 Гц), змінений шар представлений у виді характерного білого "шару". При обробці на струмах до 100 А змінена зона складається з двох шарів - верхнього "білого шару" і нижнього шару з мартенситною структурою. У жароміцних і нержавіючих сталях зона термічного впливу є зазвичай "білим шаром", під яким знаходиться початкова структура сплаву. Зона термічного впливу коливається від декількох сотих міліметра при малій енергії імпульсу (0,02 Дж) до декількох десятих міліметра при енергії імпульсу 20 Дж і більше. Поверхні деталей, оброблених електроерозією, мають підвищену корозійну стійкість.

Крім того, на точність електроерозійної обробки впливають ті ж чинники, що і при механічній обробці: стан технологічної системи, похибка установки, базування електроду-інструменту при нагріві заготовки в процесі обробки.

Враховуючи всі перераховані вище чинники, можна створити умови для використання електроерозійних методів при остаточній обробці поверхонь.

УДК 621.9.06-529:681.5.015.24
Вишнепольский Є.В.[1], Шептун В.О.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-112сп НУ «Запорізька політехніка»

# ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ З ВИКОРИСТАННЯМ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Сучасні виробничі системи характеризуються високим рівнем варіативності технологічних процесів і зростанням вимог до точності та якості деталей. Традиційні системи керування верстатами з ЧПК не здатні оперативно реагувати на зміни умов обробки, що призводить до зниження продуктивності та якості виробів. Адаптивні системи керування процесами механічної обробки дозволяють в реальному часі коригувати параметри технологічного процесу відповідно до його поточного стану, забезпечуючи оптимальні умови для досягнення необхідної якості поверхні при максимальній продуктивності. Основні види адаптивних систем керування включають: системи з адаптацією за навантаженням (АСР) – контролюють силу різання і крутний момент; системи з адаптацією за вібрацією (АСВ) – запобігають виникненню шкідливих коливань; системи з адаптацією за температурою (АСТ) – оптимізують теплові процеси в зоні різання; комплексні адаптивні системи (КАС) – враховують одночасно декілька параметрів процесу.

Ключові елементи сучасних адаптивних систем: датчики для моніторингу параметрів процесу (силові, акустичні, теплові); контролери швидкої обробки даних на основі FPGA (Field-Programmable Gate Array); алгоритми машинного навчання для прогнозування оптимальних режимів; виконавчі механізми для корекції параметрів обробки в реальному часі.

Розроблена в рамках дослідження адаптивна система керування токарною обробкою включає комплекс датчиків (п'єзоелектричні, акустичної емісії, термопари), модуль збору та обробки даних на базі Arduino Mega з додатковими інтерфейсними платами та програмне забезпечення на основі нейромережевого алгоритму.

Система функціонує наступним чином: датчики безперервно вимірюють параметри процесу (сили різання, вібрації, температуру); мікроконтролер обробляє отримані дані та передає їх на комп'ютер; програмне забезпечення аналізує дані, порівнює їх з еталонними значеннями та розраховує оптимальні режими різання; коригувальні сигнали передаються на систему ЧПК верстата для зміни швидкості різання, подачі та глибини.

Особливу увагу в дослідженні приділено розробці алгоритмів прогнозування стану різального інструменту на основі аналізу акустичної емісії. Роз-

роблена нейромережева модель дозволяє з точністю до 92% передбачати критичний знос інструменту та запобігати браку деталей.

Впровадження адаптивних систем керування технологічними процесами механічної обробки є особливо ефективним при виробництві складнопрофільних деталей з високими вимогами до точності та якості поверхні, а також при обробці дорогих матеріалів, коли висока вартість заготовки не дозволяє допускати брак.

Подальші дослідження спрямовані на інтеграцію запропонованої адаптивної системи з технологіями цифрових двійників та промислового інтернету речей для реалізації концепції "розумного виробництва" в рамках Індустрії 4.0.

УДК 621.91
Тришин П.Р.[1], Короткий Р.Є.[2]
[1] PhD, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-111 НУ «Запорізька політехніка»

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧЕННІ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Дослідження процесу різання важкооброблюваних матеріалів – одне з актуальних завдань у сучасному машинобудуванні. Підвищені вимоги до якості обробки, довговічності інструменту та ефективності виробництва потребують глибокого розуміння динаміки процесу різання.

Важкооброблювані матеріали, такі як високолеговані сталі, титанові та нікелеві сплави, мають унікальні фізико-механічні характеристики: висока твердість та міцність при високих температурах; схильність до зміцнення під час деформації; низька теплопровідність; висока абразивність; підвищене утворення наросту на ріжучій крайці. Завдяки цим властивостям вони знаходять широке застосування в аерокосмічній, медичній та енергетичній галузях.

Однак їхня обробка пов'язана з низкою складнощів. У процесі точіння в зоні різання виникають значні сили та високі температури, а також спостерігаються різкі коливання напружень зсуву та температур у первинній зоні деформації. Це призводить до утворення смуг зсуву, що формують сегментовану стружку з характерною періодичністю, яка збігається з частотою коливань різання сил [1].

Дослідження показують, що зі збільшенням швидкості різання відбувається зміна морфології стружки: суцільна зливна стружка трансформується спочатку в сегментну, а потім – в елементну. Ця еволюція пов'язана з термопластичною нестабільністю у первинній зоні зсуву, що викликає періодичне утворення смуг деформації.

Слід зазначити, що сегментна стружка є домінуючим типом стружкоутворення при обробці важкооброблюваних матеріалів [2]. Для неї характерна виражена нерівномірність: зони з інтенсивною пластичною деформацією (адіабатичні смуги зсуву) чергуються із сегментами, у яких рівень деформації суттєво нижчий.

Незважаючи на те, що сегментна стружка може погіршувати якість поверхні та сприяти прискореному зносу інструменту, в умовах автоматизованого виробництва вона полегшує процеси дроблення та видалення стружки. Однак, сегментне стружкоутворення також здатне викликати вібрації [3], що негативно впливають на точність обробки, якість поверхні та термін служби різального інструменту.

Сильна вібрація при різанні важкооброблюваних матеріалів також може бути пов'язана зі зміною товщини різу при точінні за вібраційним слідом [1]. Підтвердження даного ефекту представлено у роботах з дослідження регенеративних автоколивань при обробці сплаву Ti-6Al-4V [4, 5].

Стружкоутворення є одним із ключових факторів, що впливають на інтенсивність вібрацій при різанні. Однак дослідники вібрацій при точінні важкооброблюваних матеріалів мають різні думки про вплив процесу стружкоутворення та регенеративного ефекту на збудження автоколивань.

Для підвищення стабільності процесу різання необхідно провести дослідження основних джерел збудження вібрацій при точінні важкооброблюваних матеріалів. На основі яких зробити висновок про застосовування оптимальних режимів та умов різання. Правильний аналіз та оптимізація цих факторів дозволяють досягти високої точності та надійності при точінні навіть найскладніших матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nakagawa J. Identification and effect of chip shear band on chatter vibration in the turning of Nickel Alloy 718 / J. Nakagawa, N. D. Farahani, Y. Altintas // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2023. – Vol. 44. – P. 82–90. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.05.004

2. Fazlali M. Predictive model of chip segmentation in machining of high-strength metallic alloys / M. Fazlali, M. Ponga, X. Jin // Journal of Materials Processing Technology. – 2022. – Vol. 308. – P. 117723. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117723

3. Hussain A. Mechanics of milling 48-2-2 gamma titanium aluminide / A. Hussain, S. E. Layegh, I. Lazoglu, P. J. Arrazola, X. Lazcano // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. – Vol. 30. – P. 131–139. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.05.001

4. Li M. Chatter suppression during milling of Ti-6Al-4V based on variable pitch tool and process damping effect / M. Li, W. Zhao, L. Li, N. He, M. Jamil //

Machines. – 2022. – Vol. 10(4). – P. 222. https://doi.org/10.3390/machines10040222

5. Feng J. An efficient method to predict the chatter stability of titanium alloy thin-walled workpieces during high-speed milling by considering varying dynamic parameters / J. Feng, N. Hou, Z. Jian, Z. Sun, J. Zhang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106. – P. 5407–5420. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05031-4.

УДК 621.762.04:669.018

Вишнепольский Є.В.[1], Штангелов В.А.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-112сп НУ «Запорізька політехніка»

## АДАПТАЦІЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

Розвиток адитивних технологій (АТ) відкриває нові можливості для виробництва складних металевих деталей з унікальними характеристиками. Однак впровадження цих технологій у масове виробництво потребує вирішення низки питань, пов'язаних із забезпеченням стабільності якості, точності розмірів та механічних властивостей виготовлених деталей.

Серед основних методів адитивного виробництва металевих деталей найбільш перспективними є селективне лазерне спікання (SLS), селективне лазерне плавлення (SLM) та пряме лазерне наплавлення металу (DLM). Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, що визначають область їх застосування.

Одним з ключових факторів, що впливають на якість адитивно виготовлених деталей, є правильний вибір параметрів процесу. Це включає потужність лазера, швидкість сканування, товщину шару порошку, стратегію сканування та температуру робочої зони. Оптимізація цих параметрів дозволяє мінімізувати залишкові напруження, пористість та дефекти структури, які безпосередньо впливають на механічні властивості деталей.

Значної уваги потребує проблема анізотропії властивостей деталей, виготовлених адитивними методами. Це пов'язано з шаруватою природою процесу виготовлення, що призводить до різниці у механічних властивостях залежно від напрямку. Для вирішення цієї проблеми застосовуються спеціальні режими термічної обробки та оптимізація орієнтації деталі під час друку.

Важливим аспектом є розробка та адаптація нових сплавів, специфічно призначених для адитивних технологій. Такі сплави повинні мати оптимальні характеристики плавлення, мінімальну схильність до утворення тріщин при

швидкому охолодженні та забезпечувати необхідний комплекс механічних властивостей кінцевої деталі.

Інтеграція адитивних технологій у традиційні виробничі процеси також є важливим напрямком досліджень. Гібридні технології, що поєднують адитивне виробництво з подальшою механічною обробкою, дозволяють використовувати переваги обох підходів та забезпечувати необхідну точність розмірів і якість поверхні.

Адитивні технології мають значний потенціал у машинобудуванні, особливо для виробництва складнопрофільних деталей з внутрішніми порожнинами та оптимізованою топологією. Проте для широкого промислового впровадження необхідно подальше вдосконалення процесів контролю якості, розробка нових матеріалів та оптимізація параметрів виробництва. Перспективним напрямком розвитку є створення інтегрованих систем, що поєднують проектування, виробництво та контроль якості в єдиному цифровому середовищі.

УДК 621
Ковтун В.Ю.[1], Гончар Н.В.[2]
[1] студ. гр. М-114м НУ «Запорізька політехніка»
[2]канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## МЕТОДИ ВПЛИВУ НА ПОВЕРХНЮ І ПОВЕРХНЕВИЙ ШАР АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ НА ЗАВЕРШАЛЬНОМУ ЕТАПІ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

Застосування оздоблювальних та зміцнювальних операцій на фінішному етапі дозволяє отримати необхідні характеристики поверхневого шару, такі як шорсткість, поверхневий наклеп, стискаючі залишкові напруження тощо. Конструктивні особливості, різноманітність матеріалів, що використовуються для виготовлення деталей газотурбінних двигунів, які підлягають деформаційному зміцненню, та різні вимоги до якості поверхневого шару після зміцнювальної обробки зумовлюють пошук та розробку різноманітних методів фінішингу.

Виділяють наступні групи фінішних методів формування та зміцнення поверхонь деталей, що підвищують їх експлуатаційні характеристики:

термозміцнювальна та хіміко-термічна обробка;

нанесення покриттів;

поверхнево-пластичне деформування (ППД).

Застосування термозміцнювальної та хіміко-термічної обробки деталей машин забезпечує високий рівень мікротвердості при глибині зміцнення до 1,4 мм, проте у підповерхневому шарі спостерігається різкий перепад значень

властивостей зміцненої поверхні та серцевини. Залишкові напруження можуть бути як стискаючими, так і розтягувальними, їх розподіл по глибині залежить від методу та режимів обробки.

Захисні покриття деталей підвищують корозійну стійкість, опір ерозійному зношуванню та зносостійкість. Як правило, при нанесенні покриттів у поверхневому шарі формуються розтягувальні залишкові напруження.

Особливістю методів поверхневого пластичного деформування є ефективний вплив на якість поверхні. Поверхневий шар деталей формується в результаті взаємопов'язаних явищ, що відбуваються в осередку деформування та прилеглих до нього зонах: багаторазові пружно-пластичні деформації, зміна пластичних властивостей металу, мікро- та макроструктури тощо. Застосування ППД дозволяє керувати рівнем і характером розподілу залишкових напружень, змінювати міцнісні властивості та параметри шорсткості поверхневого шару.

Методи зміцнення пластичним деформуванням, що застосовуються сьогодні в практиці загального машинобудування та авіадвигунобудування, поділяють на формоутворювальну обробку пластичним деформуванням та оздоблювально-зміцнювальну обробку безпосередньо поверхнево-пластичним деформуванням.

Враховуючи конструктивні особливості авіаційних деталей, характерними рисами яких є тонкостінність (через мінімізацію маси) та складна геометрія (для збереження міцносних властивостей при експлуатації), для них можуть бути використані лише методи ППД, суть яких полягає у підвищенні фізико-механічних властивостей поверхневого шару без зміни розмірної точності.

Вибір методу ППД визначається насамперед трудомісткістю та можливістю його застосування для обробки деталі конкретної конструкції. В якості фінішної обробки складнопрофільних деталей (лопаток, тонкостінних валів, ободової частини дисків тощо) досить поширеним та ефективним методом є поверхневе дробоударне зміцнення кульками. Численні способи реалізації цього методу набули широкого застосування на вітчизняних та закордонних машинобудівних підприємствах. Основними з застосовуваних способів дробоударного зміцнення є: пневмо- та гідродробоструменева обробка, вібро- та гідрогалтовка, ультразвукове зміцнення кульками. Досягаються значні стискаючі залишкові напруження після обробки, при цьому суттєво збільшується мікротвердість поверхні.

Незважаючи на те, що методи поверхневого деформаційного зміцнення використовуються при виробництві деталей машин уже досить тривалий час, їх можливості для подальшого підвищення довговічності деталей не вичерпані. Наразі набувають особливої актуальності дослідження, спрямовані на розробку технології комплексного зміцнення, що дозволить повною мірою

використовувати резерви міцності поверхневого шару матеріалу. Серед методів комплексного зміцнення слід виділити зміцнення дробом при підвищеній температурі, комбіноване зміцнення макро- та мікрокульками у поєднанні з методами проміжної релаксації залишкових напружень, зміцнення попередньо напружених деталей, зміцнення лазером тощо.

Вибір кожного виду фінішних методів та їх послідовності залежить від конкретної деталі, її матеріалу, конструкції, необхідних експлуатаційних властивостей, які треба забезпечити, наступної термічної обробки. При недостатності даних щодо їх використання (режимів, умов тощо) деякі методи фінішної обробки потребують додаткових досліджень.

УДК 621.793.1:620.178.16
Вишнепольский Є.В.[1], Ляшко Я.А.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-112сп НУ «Запорізька політехніка»

## ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ

Сучасні машинобудівні вироби експлуатуються в умовах високих навантажень, підвищених температур та агресивних середовищ. У таких умовах поверхневий шар деталей швидко зношується, що призводить до втрати функціональності та передчасного виходу з ладу механізмів. Традиційні методи захисту поверхонь (гартування, цементація, азотування) часто не забезпечують необхідного рівня зносостійкості. Тому розробка і впровадження композитних покриттів нового покоління стає критично важливим напрямком інженерних досліджень.

Одним із найперспективніших напрямків є розробка багатошарових композитних покриттів з програмованою структурою. На відміну від класичних одношарових покриттів, багатошарові системи дозволяють поєднувати різні властивості: висока твердість зовнішніх шарів забезпечує зносостійкість, пластичні проміжні шари підвищують адгезію та попереджають відшарування, а функціональні підшари покращують сумісність з основним матеріалом. Основні типи композитних покриттів для підвищення зносостійкості включають: керамічні покриття на основі оксидів металів ($Al_2O_3$, $ZrO_2$, $TiO_2$) – забезпечують високу твердість та корозійну стійкість; металокерамічні композиції (WC-Co, TiC-Ni) – поєднують твердість кераміки з пластичністю металевої матриці; нанокомпозитні покриття (Ti-Al-N, Ti-Si-N) – формують наноструктуру з унікальними механічними властивостями; алмазопо-

дібні вуглецеві покриття (DLC) – забезпечують низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість. технології нанесення композитних покриттів також постійно вдосконалюються. Найбільш перспективними є: магнетронне розпилення, що дозволяє отримувати щільні нанокристалічні покриття; плазмове напилення з мікродуговим оксидуванням для формування градієнтних структур; вакуумно-дугове осадження з імпульсним лазерним випаровуванням для створення надтвердих покриттів.

Застосування методів комп'ютерного моделювання (ANSYS, COMSOL) дозволяє оптимізувати склад та структуру покриттів для конкретних умов експлуатації. Це дає можливість прогнозувати поведінку покриттів при різних режимах навантаження та температурах.

Проведені експериментальні дослідження показали, що багатошарові Ti-Al-N покриття, нанесені методом магнетронного розпилення, забезпечують збільшення зносостійкості деталей вузлів тертя в 3-4 рази порівняно з азотованими поверхнями. При цьому коефіцієнт тертя знижується на 30-40%. Покриття системи $Al_2O_3$-$TiO_2$, отримані плазмовим напиленням, демонструють високу стійкість до абразивного зношування та можуть працювати при температурах до 800°C без погіршення властивостей.

Впровадження розроблених технологій на підприємствах машинобудівної галузі дозволить значно підвищити ресурс роботи деталей, що працюють в екстремальних умовах, скоротити витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання, а також зменшити простої виробничих ліній через поломки. Подальші дослідження спрямовані на розробку "розумних" самовідновлювальних покриттів, які зможуть адаптуватися до змінних умов експлуатації та компенсувати початкові пошкодження робочої поверхні.

UDC 62-213.9
Yakovlev O.V.[1], Babenko O.M.[2]
[1] PhD student NU Zaporizhzhia Polytechnic
[2] PhD (Technical Science), associate professor NU Zaporizhzhia Polytechnic

# METHODOLOGY OF RESEARCHING THE TECHNOLOGY OF INCREASING THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF COMPOSITE CABINETS OF AIRCRAFT

According to the requirements of the aviation rules AP-29, one of the most important criteria for ensuring flight safety is the ability of an aircraft to operate in lightning conditions. Lightning can cause critical damage to the fuselage, as well as malfunctions of electrical equipment, radio navigation and power plants. Therefore, an important component in the design is such a criterion as lightning protection. The most important influence on lightning protection is the electrical conductivity of the aircraft cabin. To meet these conditions, an electrically conductive layer is introduced into the structure. Structurally, this is achieved by using conductive materials (carbon nanotubes or metal particles), using layers with conductive properties (grids, foil sheets) and reinforcing conductive elements (conductive inserts, cabin reinforcement). Technologically, this is achieved by depositing and sputtering metals onto the composite, using conductive pastes, bonds and coatings.

The object of the study was the development of a composite cabin for a helicopter with a low take-off weight (3 t) MSB-2. The main problem during the design and manufacture of the cabin was to ensure proper lightning protection in accordance with AP-29, that is, the ability to withstand high voltages of a lightning discharge, without destroying and protecting the equipment. Attempts were made to increase the electrical conductivity of the cabin by introducing a metal power frame of copper and aluminum buses and plates inside the cabin in the locations of the main electronics. This partially solved the problem of providing the equipment with energy, but did not solve the problem of lightning protection and shielding. It is proposed to consider and test various technologies for manufacturing composite cabins based on tests of full-scale samples manufactured with different design and technological approaches. It is planned to present several technologies for composite samples, namely: with a polyester binder and a filler in the form of carbon nanotubes; with polymer binder and inner layers of aluminum or copper foil; with polymer binder and inner layers of copper or aluminum wire mesh; polymer binder with sprayed coating; composites of cellular conductive plates cast in polymer binder. Tests of samples 100 mm wide and 500 mm long will be carried out for each type of sample separately.

The test by passing a high-voltage discharge of 30…50 kV for 5…10 seconds will simulate the impact of an aircraft on a lightning discharge. The criterion for evaluating the test samples will be the degree of material destruction (charring, melting), as well as the possibility of further passing an electric current with the required specific resistance (electrical conductivity).

The load test of the sample with the on-board network voltage of 27 V DC and 115 V AC will simulate normal operation. The current strength at 27 V will be 300 A, at 115 V – 100 A. The test time is 30 minutes. The evaluation criteria are similar to the high-voltage discharge. These loads will be carried out for the samples both before and after the high-voltage tests. The high-voltage generation unit will be a Marx-type lightning pulse generator (Lightning Technologies 120 x XNUMX), the 115 V source will be a single-phase voltage converter, and the 27 V power source will be an autonomous airfield power source of the AIP-800-T type. Measurement of the electrical resistance of the samples before and after the tests will be carried out using the Megger TPT 320 complex. The results obtained after the tests will further determine the advantages and disadvantages of design and technological methods for improving the quality of composite cabins in general and will form the optimal approach to their manufacture.

УДК 621.45.036
Сбродов Є.В.[1], Павленко Д.В.[2], Торба Ю.І.[3]
[1]асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2]д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[3]канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ТА ВЕЙВЛЕТ АНАЛІЗУ СИГНАЛІВ ВІБРАЦІЇ АГТД ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РОЗПАЛЮВАННЯ ФОРСАЖНОЇ КАМЕРИ

Надійна діагностика систем і компонентів газотурбінних двигунів є важливим завданням у галузі двигунобудування. Предметом дослідження є процес розпалювання форсажної камери згоряння в турбореактивному двигуні. Метою роботи є встановлення можливості діагностування процесу розпалювання форсажної камери за параметрами вібрації АГТД. Існує багато досліджень щодо застосування вібродіагностики для контролю технічного стану ГТД [1]. Однак, незважаючи на свої переваги, вібродіагностика має обмежене застосування для моніторингу процесів горіння [2].

За допомогою спектрального аналізу вібраційного сигналу від штатного датчика, встановленого на опорі турбіни газотурбінного двигуна, виявлено діагностичний компонент (Рисунок 1), який з'являється при включенні форсажу.

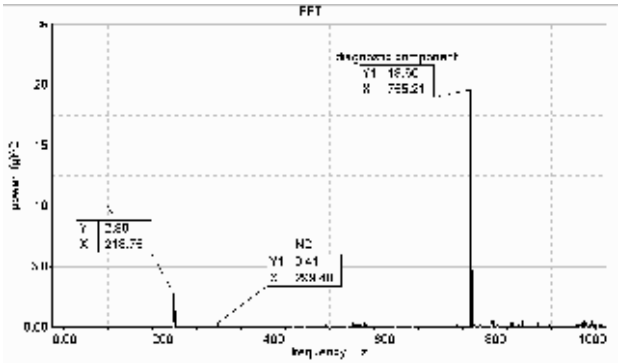
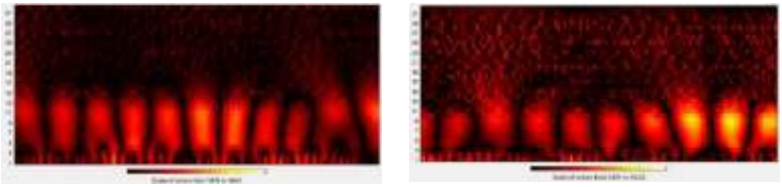



Рисунок 1 – Діагностичний компонент в спектрі потужності.

Підтверджено закономірність зростання амплітуди діагностичної складової сигналу та зміни частот обертання роторів N1 та N2 при активації агрегатів системи подачі палива та ініціації форсажної камери. Цей факт дозволяє стверджувати, що при впровадженні алгоритму ідентифікації розпалювання по сигналу штатного датчика вібрації в інтелектуальну систему керування двигуна, дозволить уникнути хибних спрацьовувань сигналу датчика полум'я і підвищити достовірність ідентифікації розпалювання форсажної камери.

Дослідження також демонструє потенціал використання неперервного вейвлет-перетворення сигналу штатного датчика вібрації для ідентифікації роботи форсажної камери. Вейвлет перетворення має приклади ефективного застосування для діагностики процесів горіння [3]. Підбір вейвлетів показав, що вейвлети «мексиканський капелюх» і гаусса найточніше описують сигнал датчика вібрації (Рисунок 2).



а б

а – «мексиканський капелюх»; б – гаусса.

Рисунок 2 – Вейвлет-спектри сигналу датчика вібрації на форсованих режимах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kochergin A. V. Vibroacoustic control of technical conditions of GTE / A. V. Kochergin, N. V. Pavlova, K. A. Valeeva // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 363–369. doi:10.1016 / j.proeng.2016.06.723

2. Торхов М. І. Метод виявлення вібраційного горіння палива в камерах згоряння газотурбінних установок / М. І. Торхов, С. В. Лозня, М. Б. Налесний // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2006. – № 10 (36). – С. 103–106.

3. Diagnostics of a combustion process in the aircraft radial engine / M. Geca, G. Litak, M. Wendeker, P. Jakliriski, J. Czarnigowski, K. Pietrykowski // PAMM. – 2009. – № 9 (1). – P. 677–678. doi: 10.1002 / pamm.200910308



УДК 621.43:004



Шаповал А.С.[1], Павленко Д.В.[2]

[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»

[2] д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»


# ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПОПЕРЕДНЬОГО ПРОЕКТУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Газотурбінні двигуни (ГТД) знайшли широке застосування у багатьох сферах нашого життя, таких як: авіація, морський транспорт, енергетика, видобуток і транспортування газу та інші. Наявність жорсткої конкуренції серед виробників у кожній з цих сфер вимагає постійного вдосконалення процесів проектування двигунів, а також розробку нових підходів до проектування, які б дозволили отримати ГТД з кращими питомими характеристиками ніж у конкурентів і меншою собівартістю виробництва й обслуговування.

Аналіз досліджень у авіаційній галузі [1-2] показав, що етап попереднього проектування – один з найважливіших етапів проектування ГТД, бо від рішень, які прийняті на цьому етапі залежить вигляд майбутнього двигуна і його компонентів, конструктивні особливості та відповідність вимогам технічного завдання. Тому вдосконалення підходів до проектування на цьому етапі – це найбільш перспективний напрямок на сьогоднішній день.

Оскільки традиційний підхід до попереднього проектування являє собою ітеративне повторення термодинамічного (циклового) розрахунку всього двигуна та попередніх газодинамічних розрахунків його компонентів, а також, оскільки на цьому етапі наявна велика кількість невідомих параметрів та взаємопов’язаних параметрів різних компонентів, було запропоновано автоматизувати цей процес за допомогою оптимізаційних комплексів. Такий під-

хід має знизити трудомісткість проектувальних робіт, а також підвищити якість отриманих результатів.

Для реалізації такого удосконалення розроблено блок-схему алгоритму проектування при традиційному підході, та проаналізовано можливість впровадження автоматизації окремих процесів. Встановлено, що при такому підході можливо отримати покращення характеристик окремого компонента двигуна, але для забезпечення найкращих параметрів ГТД в цілому потрібні додаткові ітерації узгодження компонентів та їх корегування. Такі висновки збігаються з результатами деяких робіт [3-4] у науково-прикладних публікаціях за темою застосування оптимізаційних комплексів у двигунобудуванні.

Тому було розроблено новий, інноваційний підхід до попереднього проектування ГТД, який полягає у об'єднанні циклового розрахунку двигуна з газодинамічними розрахунками його компонентів у єдину оптимізаційну задачу. При такому підході оптимізаційні комплекси будуть покращувати характеристики не окремих компонентів двигуна, а його інтегральні характеристики, змінюючи при цьому окремі компоненти.

Розроблена блок-схема для нового підходу, а також теоретично обґрунтована можливість реалізації такого підходу. Визначено загальну математичну модель ГТД, а також підходи до параметризації його компонентів.

Для універсалізації інноваційного підходу проаналізована можливість розробки параметричних моделей окремих елементів двигуна, які у подальшому можна буде масштабувати на ГТД будь якого типу і складності. За результатами аналізу у якості прототипу обрано ТРДД з осьовим вентилятором, осьовими і радіальною ступенями компресора, кільцевою камерою згоряння та осьовою турбіною. В ході подальших робіт буде розроблено параметричні моделі типових елементів та поєднання їх у математичну модель двигуна і інтеграція з оптимізаційною задачею.

Таким чином, на даному етапі роботи обґрунтовані актуальність і перспективність даної теми та теоретична можливість її реалізації, розроблено план реалізації інноваційної моделі, обрано прототип для майбутніх досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Beatty R. F. Turbomachinery Design Process Improvements Produce More Robust Machine / R. F. Beatty, G. H. Prueger // 36th Joint Propulsion Conference and Exhibit. – Las Vegas, 2000: AIAA-2000-3876.

2. Preliminary Multi-Disciplinary Optimization in Turbomachinery Design / Y. Panchenko, H. Moustapha, S. Mah, K. Patel, M. J. Dowhan, D. Hall // Reduction of Military Vehicle Acquisition Time and Cost through Advanced Modelling and Virtual Simulation. – Paris, 2002: 57.

3. Optimization of Compressor Variable Geometry Settings Using Multi-Fidelity Simulation / S. Reitenbach, M. Schnoes, R.-G. Becker, T. Otten // ASME-2015. – Montréal, 2015: GT2015-42832. doi:10.1115/GT2015-42832

4. Optimization of an Engine With a Gear Driven Counter Rotating Fan—Part II: Cycle Selection and Performance / T. Otten, T. Lengyel-Kampmann, R. Becker, S. Reitenbach // 22nd International Symposium on Air Breathing Engines (ISABE), Oct. 25–30, 2015. – Phoenix, 2015: 113303468.

UDC 669.721.5:621.431.75.002

Shalomieiev V.A.[1], Chushkina Yu.O.[2], Shalomieiev A.V.[3]
[1] Doctor of Technical Sciences, professor NU Zaporizhzhia Polytechnic
[2] Senior Specialist NU Zaporizhzhia Polytechnic
[3] Assistant NU Zaporizhzhia Polytechnic

## DEVELOPMENT OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR THE PRODUCTION OF HIGH-QUALITY MAGNESIUM ALLOY CASTINGS FOR AIRCRAFT ENGINES

The creation of new and modernization of existing aircraft engines with increased characteristics and service life imposes high requirements on magnesium alloys, from which some of their parts are made. At the same time, a very important factor is the reduction in the cost of components, which is possible due to the use of resource-saving technologies in their production.

The technologies used today in the production of aviation magnesium casting involve the use of expensive charge materials of Russian production and carry the risk of instability in the operation of aviation enterprises. Today, there are no technological solutions for the use of domestic materials to obtain high-quality castings from magnesium alloys with an increased set of mechanical and special properties.

The solution to this problem is connected with the necessity of development of new resource-saving technologies of production of aviation casting using domestic charge materials, including wastes of metallurgical enterprises and foundry waste.

Based on the research of chemical composition and analysis of physicochemical properties of wastes of regional metallurgical enterprises, it was established the possibility of their use as charge materials for production of alloys based on magnesium. This allows not only to reduce import dependence in production of magnesium casting, but also to reduce the cost of finished products, to increase efficiency of its production.

The furnace technologies for the production of magnesium alloys using waste from metallurgical enterprises have been studied. Technologies for modifying

magnesium castings using carbonaceous waste and refining the melt using chloride waste have been developed and studied.

It has been established that the developed technologies do not require any additional changes in the technological process of smelting and obtaining a magnesium alloy, while environmental safety meets the established standards. Recommendations have been developed for the preparation and use of waste in the production of magnesium alloy castings. The use of metallurgical waste in the smelting of magnesium alloys allows to significantly reduce the costs of its production, improve the environment and reduce the costs of waste disposal.

The application of developed technologies in the production of castings from advanced magnesium alloys allowed to increase their tensile strength by 25%, and ductility by 30%.

The use of high-quality magnesium alloy castings with a high level of mechanical and operational properties will allow to increase the operational reliability and increase the service life of aviation units.

УДК 658.788
Котов О.Б.[1], Семенов Є.В.[2]
[1] д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ КОНСТРУКТИВНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ БПАК

Для вдосконалення алгоритму конструктивної модернізації безпілотних авіаційних комплексів (БпАК), які експлуатуються, з метою покращення їх льотно-технічних та експлуатаційних характеристик, необхідно проаналізувати поточний алгоритм, визначити слабкі місця та запропонувати оновлений підхід із врахуванням сучасних технологій і методів. Нижче наведено детальний опис цього процесу [1].

Існуючий алгоритм модернізації БпАК зазвичай включає такі етапи: оцінка поточного стану БпАК, визначення цілей модернізації, дослідження та розробка, проектування та прототипування, тестування та валідація, впровадження змін, моніторинг та зворотний зв’язок.

Ці етапи є базовими, але їх можна оптимізувати та доповнити для підвищення ефективності, швидкості та якості модернізації, а також для покращення льотно-технічних (швидкість, маневреність, дальність польоту) та експлуатаційних (надійність, тривалість роботи, зручність обслуговування) характеристик.

Щоб досягти поставленої мети, пропонується зосередитися на таких ключових областях: інтеграція сучасних технологій, оптимізація процесів,

покращення льотно-технічних характеристик, покращення експлуатаційних характеристик, вдосконалений алгоритм модернізації БпАК.

На основі визначених напрямів пропонується оновлений алгоритм конструктивної модернізації БпАК, котрий включає в себе такі етапи: оцінка поточного стану, визначення цілей вдосконалення, дослідження та розробка, проектування та прототипування, тестування та валідація, впровадження, моніторинг та зворотний зв'язок.

Запропонований вдосконалений алгоритм конструктивної модернізації БпАК базується на інтеграції сучасних технологій (ШІ, IoT, 3D-друк), оптимізації процесів і фокусі на покращенні льотно-технічних та експлуатаційних характеристик. Цей підхід забезпечує швидшу, ефективнішу та якіснішу модернізацію БпАК, що відповідає сучасним вимогам експлуатації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Радецький В. Г. Безпілотна авіація в сучасній збройній боротьбі: монографія / В. Г. Радецький, І. С. Руснак, Ю. Г. Даник. – Київ: НАОУ, 2008. – 224 с.

УДК 658.788
Котов О.Б.[1], Лівертовський М.І.[2]
[1] д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## АЛГОРИТМ КОНСТРУКТИВНОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ ЛЬОТНО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БПАК, ЯКІ ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ

Для підвищення льотно-технічних характеристик безпілотних авіаційних комплексів (БпАК), що перебувають в експлуатації, необхідний систематичний і структурований підхід. Нижче наведено алгоритм, який охоплює оцінку, розробку, тестування та впровадження вдосконалень для покращення таких параметрів, як швидкість, маневреність, витривалість, вантажопідйомність і стабільність польоту [1].

Тож, для оцінки поточного стану необхідно провести наступні дії [2].

Необхідно провести детальний аналіз існуючих БпАК, оцінивши їхні поточні льотно-технічні характеристики. Також слід використовувати дані експлуатації, звіти про інциденти та відгуки операторів для виявлення слабких місць або обмежень, які потребують вдосконалення.

Між тим, необхідно звертати особливу увагу на визначення цілей вдосконалення, до яких можна віднести формування чітких та вимірюваних цілей

та врахування специфіки завдань БпАК (військові, цивільні, дослідницькі), а також потреби кінцевих користувачів.

З-поміж іншого, слід обов'язково враховувати наступні нюанси:

1. Дослідження та розробка.
2. Проектування та прототипування.
3. Тестування та валідація.
4. Впровадження.
5. Моніторинг та зворотний зв'язок.

Вказаний алгоритм дозволяє підвищити ефективність, надійність і безпеку БпАК, що є критично важливим для виконання складних завдань, таких як військові операції, моніторинг чи рятувальні місії.

Розглянутий алгоритм забезпечує структурований підхід до конструктивного вдосконалення льотно-технічних характеристик БпАК, дозволяючи адаптувати їх до сучасних викликів і потреб.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбулін В. П. Збройна боротьба в контексті четвертої індустріальної революції / В. П. Горбулін // Вісник НАН України. – 2022. – № 4. – С.3–11.

2. Радецький В. Г. Безпілотна авіація в сучасній збройній боротьбі: моногра-фія / В. Г. Радецький, І. С. Руснак, Ю. Г. Даник. – Київ: НАОУ, 2008. – 224 с.

УДК 378:533.6

Лазарєва О.О.[1], Сахнюк Н.В.[2], Лазарєв І.О.[3]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц., інж. АТ «Мотор Січ»
[3] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ВИКЛАДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ З ПРОГРЕСИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ГАЛУЗІ АВІАДВИГУНОБУДУВАННЯ

Сучасний світ потребує розширення інноваційної діяльності в галузі авіадвигунобудування. Якість підготовки інженерних кадрів безпосередньо пов'язана з формуванням інтелектуального потенціалу, засвоєнням нових знань, умінь та навичок, виробленням професійних компетенцій. Викладання дисципліни "Прогресивні технологічні процеси авіадвигунобудування" відіграє ключову роль у формуванні професійної майстерності майбутніх фахівців.

Аналіз викладання технічних дисциплін у закладах вищої освіти та розробка рекомендацій щодо осучаснення науково-педагогічної організації викладання дисципліни "Прогресивні технологічні процеси авіадвигунобудування".

Компетентнісний підхід до навчання передбачає використання нових освітніх технологій та орієнтацію на стандарти вищої освіти в галузі авіаційної та ракетно-космічної техніки. Висока наукоємність сучасного авіадвигунобудування вимагає від випускників глибоких знань у проектуванні, розрахунку та виготовленні деталей і вузлів авіаційних двигунів.

Для підвищення ефективності викладання дисципліни "Прогресивні технологічні процеси авіадвигунобудування" рекомендується:

Лекційні заняття: Використання відеопроекційної апаратури для підвищення наочності матеріалу. Формування знань у вигляді укрупнених блоків з подальшим деталізованим вивченням під час самостійної роботи.

Практичні заняття: Розвиток здібностей до самостійного технічного рішення та аналізу через вирішення реальних завдань. Застосування диференційованого навчання, при якому кожен студент опановує знання відповідно до його можливостей.

Лабораторні роботи: Практична верифікація теоретичних знань. Набуття навичок роботи з вимірювальним обладнанням, обробки інформації та формулювання обґрунтованих висновків.

Самостійна робота студентів: Включає вивчення додаткового теоретичного матеріалу, виконання поточних домашніх завдань та індивідуальних розрахунково-графічних робіт.

Для подолання дефіциту аудиторного часу та обмежень предметної бази практичних занять рекомендується:

Широке використання методів підвищення наочності навчання, зокрема схем структурних станів у поєднанні з прикладами типових технологій виготовлення авіаційних двигунів.

Використання схем та порівняльних характеристик при розгляді різних методів прогресивних технологій.

Застосування комбінацій номограм, ескізів та епюр для кращого сприйняття реалізованих процесів та закономірностей роботи деталей і вузлів авіаційних двигунів.

Ефективне викладання технічних дисциплін потребує:

-Інтеграції регіональних ресурсів науки, виробництва та освіти;

-Організації системи безперервної інженерно-технічної підготовки;

-Розвитку ціннісного ставлення до інженерної діяльності;

-Адаптації освітніх програм до реальних потреб виробництва;

Використання сучасних форм і методів навчання в процесі викладання дисципліни "Прогресивні технологічні процеси авіадвигунобудування" до-

зволяє студентам на високому рівні опанувати теоретичні знання та практичні навички.

Покращення якості підготовки фахівців потребує:

-Актуалізації програм та змісту підготовки відповідно до сучасних вимог;

-Активної участі представників підприємств у освітньому процесі;

-Інтеграції процесу навчання та науково-практичних досліджень;

-Розвитку співпраці між закладами вищої освіти та виробництвом;

Це дозволить підготувати конкурентоспроможних фахівців, здатних вирішувати складні інженерні завдання в галузі авіадвигунобудування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Byvalkevych L. Developing Technical Creativity in Future Engineering Educators / L. Byvalkevych, O. Yefremova, S. Hryshchenko // Revista Romaneasca Pentru Educatie Multidimensionala. – 2020. – № 12 (1). – P. 162–175.

УДК 621.638.004.6+004.8

Собченко С.В.[1], Уланов С.О.[2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] д-р філософії, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКУ РЕСУРСУ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Діагностика та прогнозування залишку ресурсу авіаційних двигунів відіграють важливу роль у забезпеченні їхньої надійності та економічної ефективності. Сучасні методи контролю дозволяють своєчасно виявляти дефекти, оптимізувати технічне обслуговування та збільшити ресурс експлуатації.

**Використання штучного інтелекту у діагностиці.** Сучасні алгоритми машинного навчання дозволяють аналізувати великі обсяги даних, виявляти приховані закономірності та прогнозувати можливі відмови. Це сприяє переходу від планового обслуговування до концепції «Предиктивне обслуговування» (Predictive Maintenance, PDM).

Переваги предиктивного обслуговування:

- Зниження ризику відмови – дозволяє запобігти серйозним інцидентам, зокрема через руйнування лопаток турбіни.
- Оптимізація витрат – скорочує витрати на непотрібне техобслуговування.
- Зменшення часу простою – підвищує ефективність флоту.

- Підвищення безпеки – мінімізує ймовірність аварій через раптові відмови двигуна.

**Методи безконтактного неруйнівного контролю.** Інноваційні технології, такі як вихрострумовий, ультразвуковий, лазерний та рентгенівський контроль, дозволяють проводити діагностику без розбирання двигуна. Це значно скорочує час і витрати на обслуговування.

**Вібраційна діагностика та аналіз акустичних сигналів.** Системи аналізу спектру вібрацій дають змогу виявити початкові стадії зносу підшипників, дисбаланс ротора або розвиток тріщин у лопатках. Впровадження таких систем у реальному часі значно підвищує безпеку польотів.

**Інтеграція Інтернету речей (IoT) у систему моніторингу.** Сучасні авіаційні двигуни оснащуються сенсорами/датчиками, які у реальному часі передають інформацію про температуру, оберти, вібрацію та інші параметри. Це дозволяє здійснювати аналіз стану двигуна та своєчасно реагувати на зміни.

**Цифрові двійники авіаційних двигунів.** Застосування комп'ютерного моделювання дозволяє створити цифровий двійник двигуна, що постійно оновлюється відповідно до реальних умов експлуатації. Це дає можливість точно прогнозувати залишковий ресурс та оптимізувати технічне обслуговування.

Рисунок 1 – Зона контролю міжпазового виступу диску компресора авіаційного двигуна.

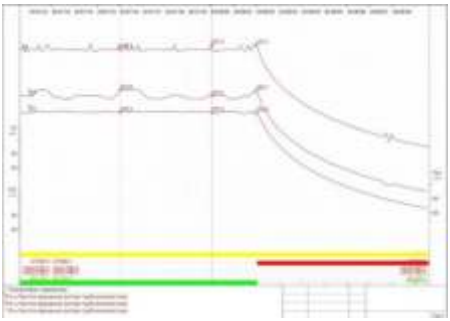


Рисунок 2 – Приклад відображення параметрів роботи двигуна під час відмови.

Впровадження новітніх методів діагностики сприяє підвищенню безпеки польотів, зменшенню витрат на ремонт та збільшення ресурсу авіаційних двигунів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ


1. Carter T. J. Common failures in gas turbine blades / T. J. Carter // Engineering Failure Analysis. – 2005. – Vol. 12, Issue 2. – P. 237–247.
2. Fentaye A. D. Aircraft Engine Performance Monitoring and Diagnostics Based on Deep Convolutional Neural Networks / A. D. Fentaye, V. Zaccaria, K. Kyprianidis // Machines. – 2021. – Vol. 9, Is. 12: 337.
3. Sharma R. K. A diagnostics tool for aero-engines health monitoring using machine learning technique / R. K. Sharma // Energy Procedia. – 2018. – Vol. 148. – P. 367–374.



УДК 629.735


Гвоздик Р.П.[1], Бабенко О.М.[2]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»


## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА ПРИ ВИКОРИСТАННІ КЕРОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ КЛАПАНАМИ

Осьові компресори є ключовими елементами багатьох промислових установок, зокрема газотурбінних двигунів (ГТД), газоперекачувальних агрегатів та систем стиснення повітря. Їхня ефективність безпосередньо впливає на загальну продуктивність та економічність цих систем. Одним із перспектив-

них напрямків підвищення ефективності осьових компресорів є впровадження керованих систем управління клапанами, які дозволяють оптимізувати їхню роботу в різних експлуатаційних режимах.

**Необхідність підвищення ефективності осьових компресорів.** Ефективність осьових компресорів є критично важливим параметром з кількох причин. По-перше, вища ефективність означає менше споживання енергії для досягнення необхідного ступеня стиснення та витрати повітря, що призводить до зниження експлуатаційних витрат. По-друге, підвищення ефективності може сприяти зменшенню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище, особливо в контексті ГТД. По-третє, оптимізація роботи компресора може покращити загальну надійність та довговічність установки, запобігаючи виникненню нестабільних режимів роботи, таких як помпаж.

**Традиційні методи регулювання осьових компресорів та їхні обмеження.** Традиційно для регулювання продуктивності та забезпечення стійкості осьових компресорів використовуються різні методи, включаючи:

1. Зміна частоти обертання ротора: Цей метод ефективний для широкого діапазону регулювання, але може призводити до зниження ефективності на часткових навантаженнях.

2. Поворотні вхідні напрямні апарати (ВНА): Зміна кута встановлення лопаток ВНА дозволяє змінювати кут атаки повітря на перші ступені компресора, регулюючи витрату та ступінь стиснення. Однак ефективність регулювання обмежена, особливо на значних відхиленнях від розрахункового режиму.

3. Перепуск повітря: відбір частини повітря з проміжних або кінцевих ступенів компресора дозволяє запобігти помпажу на низьких витратах. Проте цей метод призводить до втрати енергії та зниження загальної ефективності.

Зазначені методи, хоча й є загальноприйнятими, мають певні обмеження щодо діапазону ефективного регулювання та можуть призводити до втрат енергії, особливо на нестандартних режимах роботи.

**Керовані системи управління клапанами як інструмент підвищення ефективності.** Керовані системи управління клапанами представляють собою більш гнучкий та потенційно ефективний підхід до регулювання роботи осьових компресорів. Ці системи передбачають встановлення спеціальних клапанів у проточній частині компресора, які можуть оперативно змінювати свій стан (відкриватися або закриватися) під керуванням автоматизованої системи. Залежно від конструкції та розташування клапанів, вони можуть виконувати різні функції.

Перепуск повітря з оптимізованим керуванням: Замість постійного або дискретного перепуску повітря, керована система може точно регулювати об'єм та місце відбору повітря залежно від поточних умов роботи компресора. Це дозволяє запобігати помпажу з мінімальними втратами енергії.

**Принципи роботи керованих систем управління клапанами.** Керована система управління клапанами складається з таких основних елементів:

1. Датчики параметрів компресора: Датчики тиску, температури, витрати повітря та вібрації встановлюються в різних точках проточної частини компресора для безперервного моніторингу його стану.

2. Блок управління: На основі даних від датчиків, блок управління (зазвичай електронний контролер) аналізує поточний режим роботи компресора та приймає рішення про необхідність зміни стану клапанів. Алгоритми управління можуть бути засновані на емпіричних залежностях, математичних моделях компресора або методах штучного інтелекту.

3. Виконавчі механізми клапанів: Залежно від типу клапанів та вимог до швидкодії, використовуються різні виконавчі механізми, такі як електромагнітні, пневматичні або гідравлічні приводи.

4. Керовані клапани: Самі клапани можуть мати різну конструкцію (наприклад, поворотні заслінки, пелюсткові клапани, соленоїдні клапани) залежно від їхнього призначення та місця встановлення.

**Переваги використання керованих систем управління клапанами для підвищення ефективності.** Впровадження керованих систем управління клапанами в осьових компресорах може забезпечити ряд значних переваг:

1. Розширення діапазону стабільної роботи: Точне та оперативне керування перепуском повітря або міжступеневими перетоками дозволяє запобігати помпажу та забезпечувати стабільну роботу компресора на ширшому діапазоні витрат та ступенів стиснення.

2. Підвищення ефективності на часткових навантаженнях: Оптимізоване керування потоком та ступенем стиснення дозволяє зменшити втрати енергії при роботі компресора не на розрахунковому режимі.

3. Покращення перехідних характеристик: Швидке реагування керованих клапанів на зміни умов роботи може покращити динамічні характеристики компресора, наприклад, при різких змінах навантаження.

4. Зниження рівня шуму та вібрації: Оптимізація потоку повітря в компресорі може сприяти зменшенню аеродинамічного шуму та вібрацій.

5. Можливість інтеграції з інтелектуальними системами управління: Керовані клапани можуть бути легко інтегровані з сучасними системами автоматичного управління, що дозволяє реалізувати складні алгоритми оптимізації роботи компресора в реальному часі.

**Сучасні дослідження та розробки в галузі керованих систем управління клапанами.** У світі активно ведуться дослідження та розробки в галузі керованих систем управління клапанами для осьових компресорів. Основні напрямки включають:

1. Розробка нових типів швидкодіючих та надійних клапанів: Створення клапанів, здатних ефективно працювати в складних умовах експлуатації ком-

пресора (високі температури, тиски, вібрації) та забезпечувати необхідну швидкість спрацьовування.

2. Вдосконалення алгоритмів управління: Розробка адаптивних алгоритмів, які б враховували нелінійні характеристики компресора та забезпечували оптимальне керування клапанами в різних умовах

3. Інтеграція керованих клапанів з активними системами керування потоком: Комбінування керованих клапанів з іншими технологіями активного керування потоком, такими як синтетичні струмені або плазмові актуатори, для досягнення синергетичного ефекту.

**Практичні приклади застосування керованих систем управління клапанами.** Хоча технологія керованих систем управління клапанами для осьових компресорів ще перебуває на стадії активного розвитку та впровадження, вже існують певні практичні приклади та прототипи, що демонструють її потенціал. Наприклад, в авіаційних ГТД використовуються системи керованого перепуску повітря для забезпечення стійкої роботи компресора на різних режимах польоту. У промислових компресорах розробляються системи з керованими міжступеневими перетоками для оптимізації їхньої роботи при змінних навантаженнях.

**Висновок.** Використання керованих систем управління клапанами є перспективним напрямком підвищення ефективності роботи осьових компресорів. Забезпечуючи гнучке та оперативне регулювання потоку повітря в проточній частині, такі системи дозволяють розширити діапазон стабільної роботи, підвищити ефективність на часткових навантаженнях, покращити перехідні характеристики та знизити рівень шуму та вібрації. Подальші дослідження та розробки в цій галузі, спрямовані на створення надійних та швидкодіючих клапанів, вдосконалення алгоритмів управління та оптимізацію їхньої інтеграції в конструкцію компресорів, відкривають значні можливості для покращення характеристик осьових

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Boyce M. Gas Turbine Engineering Handbook / M. Boyce. – Butterworth-Heinemann, 2011. – 1000 p.

2. Михалевич М. Г. Оптимізація керуючих впливів на електропневматичний клапан виконавчого пристрою керування зчепленням / М. Г. Михалевич // Вісник ХНАДУ. – 2021. – Вип. 93. – С. 128–135.

УДК 629.7.067

Качан О.Я.[1], Пухловський С.В.[2]
[1] д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

# ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПИЛЕНОГО ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ В ТРУБКАХ-ЦИКЛОНАХ: ВАЛІДАЦІЯ CFD-МОДЕЛІ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Пилозахисні пристрої (ПЗП) вертольотів відіграють ключову роль у захисті їхніх двигунів від пилової ерозії. Водночас їх експлуатація супроводжується певними недоліками, зокрема зниженням потужності силової установки внаслідок аеродинамічного опору та ускладненням наземного технічного обслуговування. Мультициклонні ПЗП вважаються оптимальним рішенням для багатоцільових вертольотів завдяки високій ефективності очищення повітря та прийнятним габаритним розмірам. Основним елементом мультициклонного ПЗП є панелі з трубок-циклонів, що надають повітрю вихрового руху, сприяючи осадженню твердих частинок під дією відцентрових сил. Аеродинамічні характеристики та ефективність таких пристроїв значною мірою залежать від геометрії трубок і співвідношення їхніх розмірів.

У попередньому дослідженні було розроблено випробувальний стенд і виготовлено кілька прототипів трубок-циклонів методом FDM-друку. Прототипи циклонів відрізнялися геометричними параметрами, кількістю лопаток завихрювача, кроком витка спіральної частини та формою серцевини завихрювача. У результаті випробувань отримано аеродинамічні характеристики та показники ефективності трубок-циклонів в умовах, наближених до експлуатаційних [1].

Наразі триває розробка математичної моделі трубки-циклону в середовищі Ansys Fluent із використанням геометричних моделей, створених у Siemens NX, які раніше було виготовлено методом FDM-друку для натурних випробувань. Основною метою моделювання є отримання результатів, наближених до експериментальних, що дозволить у майбутньому прогнозувати аеродинамічні характеристики та ефективність очищення повітря для інших конфігурацій трубок-циклонів без необхідності виготовлення фізичних зразків.

У подальших дослідженнях планується вдосконалення CFD-моделі, її валідація на ширшому наборі експериментальних даних, а також оптимізація геометричних параметрів трубок-циклонів з метою підвищення ефективності очищення та зниження аеродинамічного опору. Такий підхід дозволить зробити процес розробки пилозахисних пристроїв більш ефективним, швидким і ресурсоефективним.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Качан О. Я. Визначення ефективності роботи мультициклонного пилозахисного пристрою газотурбінного двигуна вертольота / О. Я. Качан, С. В. Пухловський // Тиждень науки-2024: тези доповідей науково-технічної конференції, Запоріжжя, 15-19 квітня 2024 р. [Електронний ресурс] / Редкол. : Вадим ШАЛОМЄЄВ (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – С. 27–28.



УДК 629.7.03


Півень І.П.
асп. НУ «Запорізька політехніка»


# ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИМІЗОВАНОГО ВАРІАНТУ КОНСТРУКЦІЇ ВАЛЬНИЦІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ РЕСУРСУ У СКЛАДІ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

У сучасних умовах інтенсивної експлуатації авіаційної техніки питання підвищення ресурсу авіаційних двигунів набуває особливої актуальності. Зважаючи на високу вартість нових двигунів, обмежений доступ до виробників і складність заміни окремих компонентів, авіаційні підприємства дедалі частіше вдаються до заходів з оптимізації технічного обслуговування та подовження строку служби вже наявних агрегатів, деталей та вузлів ГТД.

Відповідно до положень [1] ресурс вальниць може бути підвищений:

- на основі оцінки їх розрахункової довговічності з наступним підтвердженням в підконтрольній експлуатації;
- на основі результатів їх ресурсних випробувань у складі двигуна або на спеціальному стенді.

**Особливості умов роботи вальниць у вузлах опор ГТД.**

1. Вимоги підвищення ККД компресора й турбіни призводять до підвищення частот обертання роторів і робочих температур, а необхідність забезпечення запасів по критичних оборотах збільшує габарити вальниці, в результаті росте швидкісний параметр $d{\cdot}n$;
2. Труднощі у визначенні фактичних радіальних навантажень, що діють на вальниці;
3. Змінні по величині, так і напрямку осьове й радіальне навантаження.
4. Роликові вальниці опор турбін встановлюються зі збільшеними діаметрами кілець і, як наслідок, працюють недовантаженими, що підвищує їхню схильність до роботи із проковзуванням;

5. Робота в умовах градієнтів температур як по ширині, так і по висоті вальниці, можливість виникнення "теплового розпору" на максимальних режимах роботи ГТД;

6. Перекоси кілець, викликані силовими й температурними деформаціями корпусів опор і валів. Величини й напрямок перекосів залежать від режиму роботи ГТД;

7. Вимоги мінімального відводу тепла в масло;

8. Необхідність забезпечення ресурсу порядку 15000...30000 годин.

**Конструкція оптимізованого варіанту вальниці передбачає вибір:**

- типу вальниці (із дво-, три- або чотирьохкрапковим контактом);
- параметрів внутрішньої геометрії.
- обгрунтування їхніх граничних відхилень, з урахуванням можливостей серійного виробництва;
- способу центрування сепаратора (бортики кілець, тіла кочення);
- матеріалів кілець, тіл кочення, сепаратора;
- твердості робочих поверхонь і чистоти їхньої обробки, антифрикційне й теплопровідне покриття сепаратора;
- мінімально припустимої кількості прокачування крізь вальницю масла, способу його підведення до вальниці (односторонне (двосторонне) за допомогою форсунок, під внутрішнє кільце), діапазон температур на вході у вальницю (мінімально й максимально припустимі), тонкість фільтрації тощо [2].

**Критерії оптимізації конструкції вальниці.**

1. Вирівнювання максимальних контактних напруг у контактах кульки з доріжками кочення внутрішнього й зовнішнього кілець і їх обмеження на режимі максимальної тривалості роботи;

2. Забезпечення максимального допустимого кута перекосу (для порівняння з робочими кутами перекосу, заданих у ТЗ на проектування вальниці);

3. Відсутність контакту кульок із протибазовою доріжкою кочення внутрішнього кільця на всіх режимах роботи включаючи й роботу вальниці при кутах перекосу зовнішнього кільця до 5 хвилин;

4. Мінімізація сил натиснення кульок на сепаратор і їх "набігання" на поперечні й бокові перемички сепаратора (за рахунок вибору зазорів кульки в гніздах сепаратора в окружному й осьовому напрямках і зазору плавання);

5. Забезпечення невиходу площадок контакту кульки за бортики внутрішнього й зовнішнього кілець при максимальних осьових навантаженнях, що діють на вальницю;

6. Забезпечення невиходу площадок контакту кульки на стики внутрішніх півкілець і на кромки отворів для підведення змащення на внутрішньому кільці;

7. Відсутності негативних кутів контакту кульок з доріжкою кочення зовнішнього кільця при роботі вальниці з перекосом);

8. Забезпечення максимальної номінальної довговічності по контактній утомі на режимі максимальної тривалості роботи.

Таким чином, застосування оптимізованого варіанту конструкції вальниці у виробництві ГТД відкриває нові перспективи для покращення якості та надійності авіаційних двигунів, підвищенню їх експлуатаційних характеристик та ресурсу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ (ISO 281:2017). Вальниці кочення. Динамічна вантажопідіймальність і номінальний ресурс. Надано чинності 2017-10-01. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.

2. Сертифікаційні вимоги для двигунів CS-E, EAAS [Електронний ресурс], 2005. – Режим доступу: https://www.easa.europa.eu/regulations

УДК 621.438.002.2

Уланов С.О.[1], Качан О.Я.[2] , Польнікова І.С.[3] , Алексєєнко М.І.[4]
[1] д-р філософії, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] д-р техн. наук, проф НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. М-714м НУ «Запорізька політехніка»
[4] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК РОБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД МЕТОДОМ ГАРЯЧОГО ВИДАВЛЮВАННЯ

У роботі досліджено процес гарячого видавлювання заготовок робочих лопаток компресора газотурбінного двигуна з титанового сплаву ВТ8.

Метою дослідження є підвищення якості виготовлення заготовок за рахунок оптимізації технологічних параметрів.

Дослідження проводилися з використанням кривошипного преса із зусиллям 1000 кН, у роз'ємних штампах відповідно до серійного технологічного процесу.

Штампи нагрівали до 150…200 °С, для поліпшення роботи при видавлюванні заготовок робочих лопаток з титанового сплаву ВТ8.

Товщину мідного покриття вимірювали магнітоіндукційним приладом ИТМП-3, що має похибку ± 2 мкм.

Рентгеноспектральний мікроаналіз проводили на растровому мікроскопі ISM-6360ALA.

Нагрівання заготовок проводили в печі МП-2У.

Встановлено, що на якість заготовок лопаток з титанового сплаву ВТ8, отриманих гарячим видавлюванням, впливає стан мідного покриття, яке заздалегідь наносять на поверхню вихідної заготовки.

Під час нагрівання вихідних заготовок мідь окислюється і в інтервалі температур 250...700 °С швидкість окиснення протікає за лінійною закономірністю, а після 700...750 °С – за параболічною закономірністю.

Окислення мідного покриття відбувається нерівномірно не тільки в межах однієї заготовки, а й у межах партії, що призводить до зниження стійкості та погіршення якості поверхні заготовок лопаток, які одержують гарячим видавлюванням.

Дослідження, проведене РСМА мідного покриття виявило наявність оксидів алюмінію різного ступеня дисперсності.

Джерелом цього матеріалу в мідному покритті є шаржування в поверхню заготовки корунду, який використовується під час обдування, що є причиною появи задирок на поверхні заготовки лопатки.

Встановлено також, що поздовжні риски на пері лопатки є наслідком прояву на робочій поверхні фільєри матриці бугорків (напливів), спричинених адгезією деформівного матеріалу лопатки до основи металу інструменту.

а – вихідна заготовка; б – попередня заготовка; в – лопатка.
Рисунок 1 – Технологічні переходи під час гарячого видавлювання заготовки робочої лопатки компресора.

а – у дзвоновій ванні; б – у корзині.
Рисунок 2 – Мікрорельєф поверхні мідного покриття на заготівлі, отриманій у дзвоновій ванні і в корзині.

Товщина і якісне нанесення мідного покриття на вихідну заготовку є одним із найважливіших чинників проведення процесу гарячого видавлювання заготовок лопаток із титанового сплаву ВТ8.

Найкращих результатів досягнуто при температурі нагріву 870 °С, товщині мідного покриття 9…18 мкм та застосуванні мастила на основі графіту (30%) і машинного масла (70%).

Встановлено, що при неякісному мідному покритті до 50% видавлених заготовок лопаток мають на поверхні риски.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Влияние параметров горячего выдавливания заготовок рабочих лопаток компрессора на качество изготовления / Ю. С. Кресанов, А. Я. Качан, В. В. Чигиринский, А. Н. Бень // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 2. – С. 108–115.

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

УДК 539
Кокотін В.І.
студ. гр. М-714м НУ «Запорізька політехніка»

## КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Композиційні матеріали (КМ) – це багатокомпонентні матеріали, що складаються з двох або більше фаз із різними фізико-механічними властивостями. Основною метою створення таких матеріалів є поєднання переваг їхніх складових компонентів для досягнення оптимального співвідношення міцності, жорсткості, стійкості до зношування та інших характеристик.

Компонент, який неперервний у всьому об’ємі, називається матрицею, а неоднорідно розташовані тверді фази – армуючими елементами («армуючий» означає введений у матрицю з метою зміни властивостей матеріалу). Матриця надає необхідну форму виробу, впливає на створення властивостей композитного матеріалу, захищає наповнювач від механічних пошкоджень і інших дій середовища . Таким чином, у композитному матеріалі кожний компонент виконує свою специфічну функцію: матриця забезпечує пластичність, армуючий елемент – міцність матеріалу. В якості матриць в композитних матеріалах можуть бути використані метали і їх сплави, полімери органічні і неорга-

нічні, керамічні, вуглецеві і інші матеріали. Армуючі або зміцнюючі компоненти рівномірно розподілені в матриці. Вони, як правило, мають високу міцність, твердість і модуль пружності, тому за даними показниками значно перевершують матрицю.

Полімерні композиційні матеріали. Полімерні композиційні матеріали (ПКМ) – це гетерофазні системи, які складаються із суцільної фази (зв'язуючий матеріал, матриця), що сприймає зовнішні навантаження і перерозподіляє їх на другу фазу – наповнювач; між фазами відбувається взаємодія. У ПКМ зв'язником, матрицею є синтетичні полімери, ефективність використання яких визначається не тільки технологічними властивостями, а й реалізацією низки специфічних властивостей (теплостійкості, радіаційної стійкості, пружно-міцнісних тощо). Одержання деталей із ПКМ може здійснюватися як процесами, характерними для формованих виробів із полімерів (лиття під тиском, пресування тощо), так і спеціальними процесами (намотка тощо), унікальними для цього класу матеріалів.

Органопластики. Органопластики – композити, у яких наповнювачами служать органічні синтетичні, рідше – природні та штучні волокна у вигляді джгутів, ниток, тканин, паперу тощо. У термореактивних органопластиках матрицею служать, як правило, епоксидні, поліефірні та фенольні смоли, а також поліїміди. Матеріал містить 40…70% наповнювача. Органопластики у вигляді легких тришарових (стільникових) конструкцій широко використовують для виготовлення низько- і середньонавантажених елементів – підлог, перегородок, елементів декору салонів літака. Органопластики досить стійкі до дії динамічних і вібраційних навантажень, а також механічних і ерозійних пошкоджень. Для зниження росту втомних тріщин в обшивці літака доцільно використовувати металополімерні системи, що складаються з почергових шарів органопластика і дюралюмінію. Висока міцність органопластиків при розтязі добре реалізується в динамічно навантажених лопатях несучих гвинтів гелікоптера.

Вуглепластики. Вуглепластик – композитний матеріал на основі смол та вуглецевих волокон. Складається з армувального наповнювача, із вуглецевого волокна і полімерної матриці. Вуглецеві волокна отримують з синтетичних та натуральних волокон на основі полімерів акрилонітрилу, целюлози та інших. Завдяки великій жорсткості, міцності, хімічній стійкості вуглепластики використовуються для виготовлення таких високонавантажених деталей, як лопатки вентилятора, кільць, горизонтальні опори, елерони керма, закрилки, обшивки кінцівок крила, обтічники тощо. Також ефективно застосовують для виготовлення допоміжних елементів – комунікаційних труб, гальмівних щитків, капота двигуна тощо.

Склопластики. Склопластик – це композитний матеріал, що складається з двох основних компонентів: синтетичного зв’язуючого і скляного волок-

на (наповнювача). Суть виготовлення склопластику полягає в тому, що в рідку смолу вводять скловолокно, а потім смолу піддають твердінню. Синтетичне зв'язуюче додає монолітність і забезпечує стабільність форми готового склопластику; забезпечує використання високої міцності скловолокна шляхом рівномірного розподілу зусиль між волокнами і забезпечення їхньої стійкості, захист волокон від атмосферних і інших зовнішніх впливів; сприймає частину зусиль, що виникають в експлуатаційних умовах. Зважаючи на їх високу радіопрозорість використовують для виготовлення обтічників, що оберігають антени від механічних і атмосферних впливів.

Боропластики. Боропластики – композиційні матеріали, що містять як наповнювач борні волокна, впроваджені в термореактивну полімерну матрицю, при цьому волокна можуть бути як у вигляді монониток, так і у вигляді джгутів, обплетених допоміжною скляною ниткою або стрічкою, в яких борні нитки переплетені з іншими. Завдяки великій твердості ниток, матеріал, що виходить, має високі механічні властивості (борні волокна мають найбільшу міцність при стисканні в порівнянні з волокнами з інших матеріалів) і великою стійкістю до агресивних умов, але висока крихкість матеріалу ускладнює їх обробку і накладає обмеження на форму виробів з боропластик. Застосування боропластиків обмежується високою вартістю виробництва борних волокон, тому вони використовуються головним чином в авіаційній та космічній техніці в деталях, що зазнають тривалих навантажень в умовах агресивного середовища.

УДК 539
Польнікова І.С.
студ. гр. М-714м НУ «Запорізька політехніка»

## МЕТОДИ ОТРИМАННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ НАНОПОРОШКІВ

Розрізняють два типи технологій отримання нанопорошків: основані на хімічних та фізичних процесах.

Існує ряд загальних підходів, характерних для всіх методів отримання нанопорошків, які відрізняють їх від методів отримання звичайних порошків:

– висока швидкість утворення центрів виникнення частинок;
– мала швидкість росту частинок;
– найбільший розмір отриманих частинок не більше 100 нм;
– вузький діапазон розподілу частинок по розмірах;
– стабільність отримання частинок заданого розмірного діапазону;
– відтворюваність хімічного та фазового складу частинок;
– збільшення вимоги до контролю та управління процесом отримання.

Технології отримання нанопорошків, основані на хімічних процесах: відновлення з наступним розкладанням, осадження з парової фази, високоенергетичний синтез (детонаційний, плазмохімічний), осадження з розчинів (хімічне осадження, золь-гель метод, рідинофазне відновлення, гідротермальний синтез, мікро-емульсійний метод, кріохімічний метод), розкладання нестабільних з'єднань (термічне, радіаційне), відновлювальні процеси (водневе відновлення з'єднань металів, хіміко-металургійний метод).

Технології отримання нанопорошків, основані на фізичних процесах: диспергування розплавів потоком рідини чи газу; ударне розпилювання розплаву; отримання методом термічного випаровування; методом електричного вибуху провідника (ЕВП); електрогідродинамічне розпилювання розплаву; компактування нанопорошків пресуванням під дією статичного, динамічного або вибухового тиску; електроліз тощо.

Розглянемо деякі технології, основані на фізичних процесах.

Диспергування розплавів потоком рідини чи газу. Це високоефективний процес, який легко реалізувати відповідно до безперервної схеми та автоматизації; він економічний та екологічно чистий. Цим методом отримують порошки металів та сплавів Fe, Al, Cu, Pb, Zn, Ti, W тощо, тобто матеріалів з невисокою температурою плавлення ($\leq 1600\ ^0$C). Реалізовано безліч схем із співвісними потоками розплаву і розпорошеного середовища, а саме: спрямованими під кутом один до одного, з відцентрованим розпиленням головками, що обертаються і електродами. Розподіляють наступні методи розпилення металевого розплаву: за видом енергії (нагрівання індукційне, електродугове, електронне, лазерне, плазмове); за видом силового впливу (механічний вплив, енергія газових потоків, енергія водяних потоків, гравітаційні сили, відцентрові сили, магнітогідродинамічні сили, вплив ультразвуку); за видом середовища для його створення (відновлювальне, окисне, інертне, контрольоване середовище, вакуум).

Метод розпилення струменя розплаву рідиною або газом є найбільш простим і продуктивним методом. Він дозволяє також збільшувати виробництво металевого порошку з контрольованими властивостями при відносно низьких енергетичних і матеріальних витратах та використовувати як вихідний матеріал відходи металообробної промисловості (стружка, обрізки, браковані деталі).

Ударне розпилювання розплаву. При цьому методі струмінь або краплі розплаву механічно розбиваються на дрібні частинки при зіткненні з інтенсивно охолоджуваними, швидко обертовими металевими лопатками. Забезпечується швидкість охолодження до $10^7$ К/с.

Метод електричного вибуху провідника (ЕВП). Одержання порошків електровибухом провідника діаметром 0,1…1 мм при проходженні по ньому потужного імпульсу струму тривалістю $10^4$…$10^6$ с, напругою 10…15 кВ і з

густиною $10^4 \ldots 10^6$ А/мм$^2$. На стадії вибуху, коли температура металу стає вищою за температуру плавлення, розширення провідника йде з швидкістю до $5 \cdot 10^3$ м/с і перегрітий метал дуже швидко диспергує. Тиск на фронті виникаючої ударної хвилі досягає декількох сотень тисяч атмосфер, а температура досягає $10^4$ К. Регулюючи умови вибуху, отримують частинки розміром від 100 мкм до 50 нм. Середній розмір частинок спадає із зростанням густини струму і зі скороченням тривалості імпульсу.

Електрогідродинамічне розпилювання розплаву. У цьому методі для розпилювання розплаву використовуються електростатичні сили. Струмінь розплаву подається в сопло з діаметром отвору порядку 80 мкм, перед яким розташовано кільцевий електрод. До нього прикладається постійна напруга 3...20 кВ. У результаті із сопла вилітають позитивно заряджені дрібні краплі розплаву, що утворюють частинки порошку після охолодження. Розмір частинок залежно від матеріалу і технологічних параметрів може становити 100 нм...10 мкм.

Нанопорошки, як самостійний матеріал, в диспергованому стані мають досить широкі області застосування. Вони застосовуються в якості компонентів низькотемпературних високоміцних припоїв для пайки в електронній промисловості; при дифузійному зварюванні. Застосовуються також в якості присадок до мастильних матеріалів для вузлів тертя насосів і гідроагрегатів; присадок до моторних мастил для легкового і вантажного автотранспорту; як наноабразиви (для надтонкого полірування); в якості каталізаторів в ряді хімічних виробництв; як порошкові легуючі матеріали (наповнювачі полімерів, гум).

В авіаційній сфері нанопорошки можна застосовувати в зварювальному процесі, що дозволить зварювати різнорідні матеріали, в тому числі важкозварювальні сплави металу з керамікою, що забезпечить зменшення температури зварювання, тиску пресування і підвищить міцність зварного з'єднання.

УДК 620.178.3:629.7.036.3:669.295
Двірник Я.В.[1], Єсауленко С.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## ПОСТУПОВИЙ РОЗВИТОК ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ ТА ФОРМУВАННЯ БОРОЗЕНОК В ДЕТАЛЯХ АВІАЦІЙНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗІ СПЛАВІВ НА ТИТАНОВІЙ ОСНОВІ

Деталі та конструкції авіаційних газотурбінних двигунів зазнають складних навантажень – високу амплітуду напруг і низьку частоту, а також високочастотні вібраційні навантаження зазвичай при досить високих напругах. У

силу специфіки умов експлуатації цих деталей, матеріал, що застосовується для їхнього виробництва, працює в умовах циклічного навантаження [1].

Систематичні дослідження деталей авіаційних двигунів, що вироблені з титанових сплавів, дозволили встановити, що найчастіше розвиток руйнування в них відбувається у області багатоциклової втоми. Саме в цій області швидкість зростання втомної тріщини не перевищує $10^{-8}$ м/цикл. Причина такого сценарію руйнування пов'язана з тим, що у багатьох випадках воно відбувається при частоті коливань від кількох сотень $10^2$ до кількох тисяч $10^3$ Герц.

Перехід у область зростання тріщини зі швидкостями, що суттєво перевищують $10^{-8}$ м/цикл, супроводжується формуванням типового рельєфу зламу у вигляді втомних борозенок. Формування борозенок зумовлює принципово іншу морфологію рельєфу зламу. Це може бути використано для однозначного трактування процесу втомного руйнування за частотними характеристиками та рівнем напруги.

Реалізований механізм втомного руйнування визначається лише властивостями матеріалу і видом його напруженого стану перед вершиною тріщини. Тому до одного й того ж виду рельєфу зламу, що відображає певний механізм руйнування, можна віднести різні поєднання умов та параметрів циклу навантаження деталей.

За морфологією рельєфу зламу можна однозначно встановити, в якій області втоми реалізовано руйнування і визначити тривалість процесу зростання тріщини. Наприклад, можна визначити максимальну швидкість зростання тріщини $10^{-8}$ м/цикл для всієї області, де реалізовано псевдоборозенчастий рельєф. Окрім того, аналіз морфологічних особливостей рельєфу зламу дозволяє здійснити кількісну оцінку рівня напружень, за яких відбувався процес розвитку втомної тріщини в матеріалі деталі [2].

Поступовий розвиток втомної тріщини в металах супроводжується послідовним ускладненням процесів її еволюції у вершині. Це пов'язано з певною послідовністю дискретних переходів внаслідок зміни домінуючих механізмів руйнування. Спочатку має місце розвиток руйнування з формуванням елементів рельєфу, що відповідають процесам ковзання. Цей етап характеризується типовими елементами псевдоборозенчастого рельєфу або стрічковості. Далі, при переході до другої стадії зростання тріщин, відбувається реалізація процесу формування втомних борозенок.

Поява втомних борозенок у сплавах на різній основі свідчить про універсальність закону послідовної зміни механізмів руйнування. Це особливо помітно при переході до другої стадії, коли може бути реалізований процес сталого підростання тріщини з формуванням регулярного рельєфу.

Перехід до формування втомних борозенок пов'язаний з реалізацією більш складного процесу ротаційної нестійкості матеріалу до деформації та

руйнування. Обумовленість початку ротаційної нестійкості пов'язана із зростаючим масштабним рівнем локалізації деформацій, руйнуванням матеріалу та досягненням певної величини приросту тріщини у циклі навантаження [3].

Висновки. Дослідження поступового розвитку втомних тріщин та формування борозенок у деталях авіаційних газотурбінних двигунів, виготовлених зі сплавів на титановій основі, дозволяє не лише глибше зрозуміти механізми руйнування, але й застосувати ці знання для підвищення надійності та довговічності відповідальних деталей. Встановлення закономірностей між морфологією зламів та умовами експлуатації відкриває перспективи для розробки ефективних методів діагностики та прогнозування ресурсу деталей авіаційних двигунів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cyclic behavior of ultrafine-grain titanium produced by severe plastic deformation / A. Y. Vinogradov, V. V. Stolyarov, S. Hashimoto, R. Z. Valiev // Materials Science Engeneering A. – 2001. – Vol. 318. – P. 163-173.

2. Shaniavski A. A. Fatigue crack growth in aeroengine compressor disks made of titanium alloys / A. A. Shaniavski, A. I. Losev // Fatigue Engng. Mater. Struct, – 1999. – Vol. 22. – P. 949–966.

3. Au J. J. Correlation Between Fatigue Crack Growth Rate and Fatigue Striation Spacing / J. J. Au, J. S. Ke // Fractography and Materials Science. – ASTM International, 1981. – P. 202–235.

## СЕКЦІЯ «МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ ТА СИСТЕМИ»

УДК 621.9.06
Фролов М.В.[1], Танченко С.В.[2], Штанкевич В.С.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

# КАРТИ ШУХАРТА ЯК ІНСТРУМЕНТ ОЦІНКИ СТАНУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО РЕГЛАМЕНТУ ЙОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Стан металорізального обладнання має найбільший вплив на якість оброблюваних на ньому виробів. Виходячи з цього, підтримання та прогнозування працездатного стану обладнання та інших елементів виробничої системи має безпосередній вплив на її продуктивність та інші економічні аспекти. В умовах сучасної економіки, у зв'язку з розвитком технологій Індустрії 4.0, промислові компанії потребують підходів, які зможуть прогнозувати поведінку обладнання та запобігати виникненню аварійних ситуацій шляхом його технічного обслуговування.

Проведення комплексу робіт з технічного обслуговування і ремонту верстатів (ТОіР) завжди пов'язане з необхідністю зупинки обладнання та виключенням його з виробничого циклу. Існує три основні стратегії управління технічним обслуговуванням і ремонтом: планово-попереджувальне обслуговування (ППР); технічне обслуговування за фактичним станом (ТОФС); ремонт/обслуговування за подіями (РОП). Наслідки вибору того чи іншого підходу, пов'язані зі збільшенням міжремонтного періоду, будуть варіюватися від перевитрат на ТОіР до раптових відмов критичних елементів металорізального обладнання з пошкодженням заготовки в цей момент. Обидва крайні підходи є витратними для бюджету та іміджу компанії. Тому компанії прагнуть поєднати переваги всіх основних стратегій ТОіР, використовуючи комбіноване обслуговування (КО), спрямоване як на зменшення загального обсягу ТОіР і максимізацію терміну служби обладнання, так і на зменшення витрат, пов'язаних зі збільшенням міжремонтних періодів і зменшенням частоти проведення ремонтів/обслуговування на основі подій.

На діючому виробництві постала задача зменшення витрат на експлуатацію верстата з ЧПК моделі PUMA 600M. Під час дослідження вироблялася однотипна деталь «колесо» на якій контролювався критично важливий розмір - посадковий діаметр зовнішнього кільця підшипника кочення. Для отримання даних про стан верстата використовувалися наступні методи: геометричний аналіз критичного розміру; вимірювання похибки позиціонування, що фіксувалася в журналі виправлення помилок та які опосередковано вказують на фізичний стан обладнання; статистичний аналіз.

У досліджуваному випадку відділ контролю якості контролював параметри 5 випадкових виробів з кожної 30-штучної партії, і таких підгруп було відібрано 60. Динаміка моніторингу стану верстата задається необхідним періодом збору даних, який визначається виходячи з його технічних характеристик та режиму експлуатації. Виходячи з вимог експлуатаційної документації, для цілей даного дослідження дані збиралися протягом 1120 годин. За цей же період було виконано в цілому 20 коригувань на основі обробки тестових деталей. Для розробки оптимальної стратегії ТОіР, поряд з виконанням робіт за графіком, проводився моніторинг відхилень критичної величини і за отриманими даними будувалися контрольні карти середніх абсолютних відхилень (X-діаграма), а також розмаху відхилень (R-діаграма) у відповідності з ДСТУ ISO 7870-2:2023, які показані на Рис. 1.

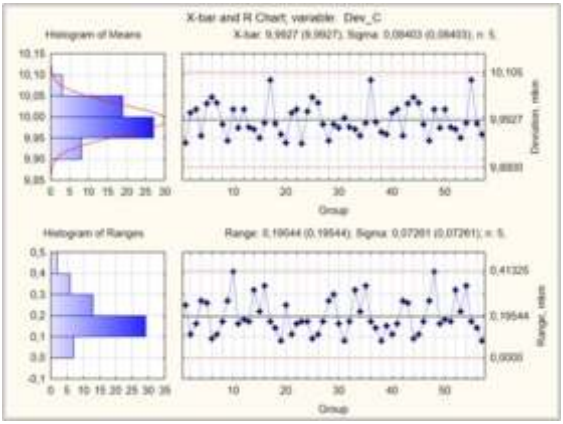



Рисунок 1 – Приклад контрольної карти Шухарта для оцінки стану обладнання.

Аналіз даних показав, що процес був стабільним протягом усього періоду спостережень, особливих тенденцій не спостерігалося. У поєднанні з підпорядкуванням поправок нормальному закону розподілу похибка позиціонування підпорядковується виключно випадковим варіаціям і немає ніяких істотних змін у фізичному стані верстата. Те ж саме було підтверджено під час планових технічних оглядів.

Визначення термінів проведення операцій технічного обслуговування на основі аналізу статистичних даних з використанням X- та R- діаграм Шухарта не призвело до зниження надійності обладнання і стало основою для розроблення моделі ТОіР

При подальшій експлуатації верстатів з ЧПК з використанням розробленої моделі ТОіР для оцінки фактичного стану обладнання кількість ремонтно-обслуговуючих заходів було скорочено на 35 - 50%.

УДК 004.92:621.9
Танченко С.В.[1], Фролов М.В.[2], Смагін Р.Г.[3]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. М-212сп НУ «Запорізька політехніка»

## ВИБІР МЕТОДУ РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ РОЗГОРТКИ МАКЕТУ

Перед початком виготовлення будь-якого макета слід визначитись з вихідною інформацію про об’єкт макетування, далі, в залежності від його детальності, підготувати необхідну технічну документацію, яку потім використовується для виготовлення його елементів. Послідовність дій, що виконується при розробці макетів наступна: вивчення вихідної інформації; 3D-моделювання; виготовлення деталей; фарбування; встановлення необхідного додаткового обладнання; збірка елементів; остаточне складання. Для створення макету на початкових етапах, для отримання повної інформації, може бути використано методи реверс-інжинірингу (зворотного проєктування). Вибір методу зворотного проєктування буде залежати від складності самого вихідного об’єкту та від необхідної візуальної точності.

Розроблюємий макет, виготовляється з листового алюмінієвого композиту. Складання об’ємних елементів з такого матеріалу передбачає створення оптимальних розгорток для гнуття листів. Це дозволяє забезпечити жорсткість конструкції та зменшити витрати на матеріал. Така особливість роботи з матеріалом є ключовою для вибору методу реверс-інжинірингу.

Зворотне проектування імітує основні характеристики об’єкта для створення точних, наближених або вдосконалених віртуальних/фізичних моделей. Це вимагає складних пристроїв, обчислювальних засобів і високих людських навичок. Отримання повної інформації про об’єкт проходить в декілька етапів: розбирання готового виробу на деталі; вимірювання і контроль традиційними методами вимірювання з використанням штангенциркулів, мікрометрів та інших інструментів; функціональний аналіз; визначення застосовуваних у виробництві матеріалів; тривимірне сканування й отримання CAD-моделі; зняття розмірів інших елементів пристрою; створення робочої моделі; розробка креслень.

Традиційний метод реверс-інжинірингу, передбачає використання спеціального обладнання (лазерні 3D сканери, КВМ, спеціальне програмне за-

безпечення). Сутність методу полягає в скануванні об’єкта, отримання даних у вигляді хмар точок, створення та редагування віртуальної моделі за отриманими даними. Такий спосіб доречно використовувати при моделюванні об’єктів які мають багато вільних форм, та складно-пов’язаних поверхонь, чи коли об’єкт важко розділити на складові елементи.

Ще один метод зворотного проектування який називається сталий реверс-інжиніринг полягає в наступному: використовуються скоординовані хмари точок окремих фігур, змодельованих аналітичними підходами та складається з основних кроків:

- об’єкт розглядається як набір елементарних геометричних фігур;
- представлення геометричних фігур за допомогою елементарних хмар точок.
- створення скоординованих хмар точок шляхом поєднання елементарних хмар точок.
- створення віртуальної моделі об’єкта за допомогою пакета САПР, де вхідною інформацією є вибрані елементарні та скоординовані хмари точок.

Даний метод використовується при створенні моделей об’єктів які легко розкладаються на основні фігури та не мають складних поверхонь, або коли деталізація отриманої моделі може бути спрощена.

Для макету, розгортка якого показана на Рис. 1 було використано другий метод реверс-інжинірингу. Це дозволило отримати оптимальну розгортку, зменшити витрати на матеріал, час на складання, зберегти візуальну точність з реальним об’єктом та забезпечити жорсткість всієї конструкції.

Результат складання розгортки представлено на Рис.2.

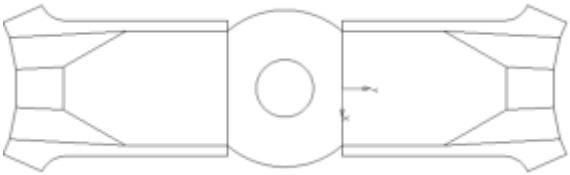


Рисунок 1 – Розгортка макету.

Рисунок 2 –Макет складений за розгорткою.

УДК 621.9
Циганов В.В.[1], Первєєв Д.В.[2]
[1] д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асист. НУ «Запорізька політехніка»

## РІШЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ ЗАДАЧІ ОПОРУ МЕТАЛУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ТЕРМОПЛАСТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

У процесах термопластичного навантаження поверхні металів при обробці деталей тиском, а також тертя в трибоспряженнях для оцінки напружено-деформованого стану, енергосилових параметрів, зносостійкості важливою характеристикою є опір деформації. Умови деформації роблять значний вплив на енергосилові параметри процесу, мікроструктуру і механічні властивості поверхневого шару. В якості математичного інструментарію для дослідження напружено-деформованого стану велике поширення отримало моделювання методом кінцевих елементів. Цей метод реалізований в різних програмних комплексах, таких як Deform - 2D/3D та ін. Для коректної постановки завдання, а, отже, і адекватності отримуваних результатів розрахунків в цих програмних комплексах, необхідно задати точний опис властивостей реологій досліджуваного матеріалу.

У загальному вигляді напружений і деформований стан металу в кожній точці осередку деформації різний. Це призводить до неоднорідності фізичних і механічних властивостей металу, неоднозначності визначення силових параметрів процесу, витрати енергії. Аналіз математичних моделей різних авторів показав, що найбільш прийнятною формулою для визначення напруги текучості при різних термомеханічних параметрах являється вираження Хензеля-Шпиттеля, яке може описувати криву залежності напруги, від термомеханічних параметрів з різною зміною значень. Для багатоопераційних (багатоперехідних) процесів було використано математичний вираз Г.А. Смирнова-Аляєва, згідно з яким загальна (результуюча) міра деформації за увесь

технологічний процес, визначається як арифметична сума мір деформації окремих операцій, значення яких, у разі монотонного протікання процесу деформації, чисельно дорівнює інтенсивності головних деформацій.

Виходячи з умови пластичної деформації, відповідно до гіпотези Губера-Мизеса про рівність інтенсивності нормальної напруги і напруги текучості встановлений зв'язок параметрів напруженого стану точки і термомеханічних характеристик процесу. Отримано вираз  що дозволяє  зв'язати параметри напруженого стану точки (коефіцієнт тертя, чинник форми) з термомеханічними параметрами процесу (ступінь, швидкість і температура деформації). Представлений аналітичний зв'язок, який безпосередньо пов'язує чинники виробництва і навантаження. Задаючи параметри напруженого стану, при відомих коефіцієнтах,  можна визначити термомеханічні параметри процесу.

Використання запропонованих гармонійних функцій дозволяє аналітично отримати замкнуте рішення просторової задачі, як з урахуванням статистичної, так і кінематичною складових. У свою чергу розвиток методів розрахунку оцінки поверхневої міцності є необхідною передумовою розробки більш зносостійких трибовузлів.

Представлені моделі підтверджують актуальність математичного опису комплексного ушкодження вузлів тертя. Оцінка механіки контактного руйнування повинна робитися на основі вивчення поведінки поверхневих шарів матеріалів у зв'язку з особливостями термомеханічного навантаження трибоспряження в реальних умовах експлуатації.

УДК 004.94
Танченко С.В.[1], Фролов М.В. [2], Вишенко Г.А. [3]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. М-214м НУ «Запорізька політехніка»

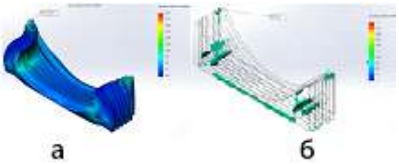
## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ ПРИСТОСУВАННЯ ГНУТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ САЕ СИСТЕМИ

Існує виробниче питання виготовлення деталі типу «Щиток», особливістю геометрії деталі є наявність великого радіусу R=178 мм. Для забезпечення оптимізації виконання операції гнуття було поставлене завдання розробити спеціальне оснащення яке складається з трьох основних елементів (рис. 1): матриці, пуансону і кріплення пуансону.

1 – матриця, 2 – пуансон, 3 – кріплення пуансону, 4 – заготовка.
Рисунок 1 – Спеціальне оснащення для гнуття.

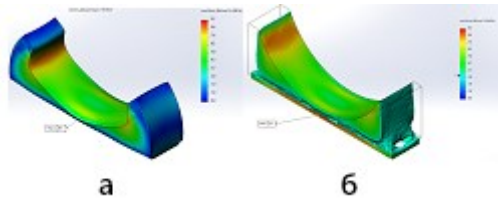
Першочергова конструкція нового оснащення передбачала розділення цільних елементів конструкції на тонкі листи які в подальшому зварювались в нахлест один до одного. Елементи конструкції виготовлялись зі сталі 3. Для напруженого стану розробленої конструкції застосовувалося програмне забезпечення SOLIDWORKS із додатковим модулем SOLIDWORKS Simulation. Для проведення розрахунків використовуємо статичний метод аналізу.

Для забезпечення точності розрахунків було задано властивості матеріалу конструкцій , такі як: модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, густина матеріалу, тощо. Результати дослідження представлені на рисунку 2.




а – зварна матриця в деформованому вигляді; б – епюра зварної матриці.
Рисунок 2 – Результати дослідження зварної конструкції.

Отже недоліком даної конструкції є низька довговічність, оскільки зварювальні шви є потенційними точками напруги в яких під дією динамічних навантажень або вібрацій можуть виникати осередки руйнування. Тому було запропоновано нову цільну конструкцію в якій також передбачалось створення додаткових елементів у вигляді напрямних для фіксації заготовки. Елементи нової конструкції виготовлялись зі сталі 45  Для дослідження нової конструкції було проведено за тим самим алгоритмом як і для зварної конструкції.




а – монолітна матриця в деформованому вигляді;
б – епюра монолітної матриці.
Рисунок 3 – Результати дослідження цільної конструкції.

Порівняльний аналіз дослідження напруженого стану обох конструкції наведено на рисунку 4.

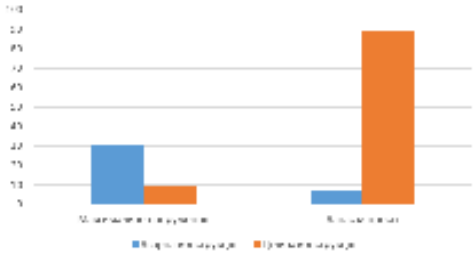


Рисунок 4 – Порівняльна діаграма характеристик міцності обох конструкцій.

Виходячи з результатів проведеного дослідження було прийнято рішення використовувати цільну конструкцію оснащення для забезпечення операції гнуття при виготовлені деталі «Щиток». Дане оснащення використовується в практичних цілях на сучасному вітчизняному підприємстві.

УДК 621.9.06-187.4
Солоха В.В.[1], Танченко С.В. [2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ В КГП НА ТОЧНІСТЬ КООРДИНАТНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Основними вимогами, що висуваються до верстатів з ЧПК в ході обробки деталей, є забезпечення високої точності і продуктивності обробки. Дося-

гнення високої продуктивності забезпечується високими швидкостями різання і швидкостями подачі, скороченням часу на допоміжні переходи (високі швидкості прискорених переміщень, зменшення часу на заміну інструментів і оброблюваних заготовок тощо). Високі швидкості координатних переміщень (робочих подач і прискорених рухів) в верстатах з ЧПК отримують застосуванням кулькових гвинтових передач (КГП) в якості тягових пристроїв.

Точність верстатів з ЧПК характеризується як показниками геометричної точності, так і точністю координатних переміщень, на яку впливають похибки інтерполяції системи ЧПК, похибки приводу координатних переміщень: серводвигуна, пружні деформації кулькової гвинтової передачі, температурні деформації гвинта тощо. Зростання швидкості координатних переміщень веде до зростання тепловиділення в опорах гвинта і в гайці кулькової передачі.

Як показують дослідження, в прецизійних верстатах що працюють з високими швидкостями та інтенсивними режимами похибки обробки, похибки зумовлені температурними деформаціями компонентів верстатів, складають від 40% до 70% загальної похибки обробки [1].

Температурні деформації гвинта призводять до погіршення точності позиціонування виконавчих органів. Теплове розширення валу гвинта розраховується за виразом:

$$\Delta L_\theta = \rho \cdot \theta \cdot L \text{ (мм)}, \qquad (1)$$

де $\rho$ – коефіцієнт теплового розширення, ($12{,}0 \times 10^{-6}$ °C$^{-1}$);
$\theta$ – надмірна температура ходового гвинта, °C;
$L$ – довжина гвинта, мм.

Виходячи з формули (1) нагрівання ходового гвинта довжиною 1 метр лише на 1 градус зумовлює його температурне видовження на 12 мкм.

В ході обробки деталей на верстат діють як зовнішні так і внутрішні джерела тепла. До внутрішніх джерел відноситься тепловиділення в зоні різання, тепловиділення внаслідок тертя в механізмах верстата, тепло від роботи електрообладнання тощо. Їх вплив на точність обробки визначається інтенсивністю тепловиділення, розміщенням стосовно елементів конструкції верстата, які формують похибки обробки.

Враховуючи це основними джерелами тепла, що спричиняють нагрівання і температурні деформації гвинтів кулькових гвинтових передач є тепловиділення в опорах гвинта та тепловиділення в гайці передачі.

Тепловиділення в опорах гвинта можна оцінити за виразом [2]:

$$Q_{оп} = 1{,}047 \cdot 10^{-4}\, n \cdot M; \qquad (2)$$

де $Q_{оп}$ – тепло, що виділяється в підшипнику внаслідок тертя;
$n$ – частота обертання гвинта кульково-гвинтової передачі;

$M$ – загальний момент тертя підшипника.

Кількість тепла, що виділяється внаслідок тертя в гайці кулькової гвинтової передачі може бути визначена за емпіричною залежністю [3]

$$Q_г = 0{,}12\pi\, n f_0\, \nu_0\, M_г, \qquad (3)$$

де $Q_г$ – теплота, що виділяється в гайці;
$f_0$ - коефіцієнт, пов'язаний з типом гайки і способом змащування;
$\nu_0$ – кінематична в'язкість мастила;
$M_г = M_{пн} + M_{дн}$ - загальний момент тертя гайки (попередній натяг і динамічне навантаження).

Зниження зростання температури елементів КГП, зокрема ходового гвинта може бути досягнуте зменшенням тепловиділення в гайці і опорах та шляхом збільшення тепловідведення від елементів передачі, особливо від гайки, як найбільшого джерела тепла.

Для зниження температури гайки і впливу тепла на точність КГП може бути запропонована конструкція кулькової гайки з охолодженням рідиної, що циркулює в корпусі гайки.

Вибір конструктивних елементів каналів охолодження та оптимальної кількості рідини дозволить знизити нагрівання гайки і гвинта, що позитивно вплине на точність позиціювання, що буде показане далі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mayr J. Thermal issues in machine tools / J Mayr, J Jedrzejewski, E Uhlmann, et al // CIRP Ann. – Manuf. Technol. – 2012. – 61 (2). – P.771–791.

2. Harris T. A. Rolling Bearing Analysis / T. A. Harris // Wiley & Sons, – New York. – 1991. – P. 540–560.

3. Verl A. Correlation between feed velocity and preloading in ball screw drives / A. Verl, S. Frey // Ann. CIRP. – 2010. – 59 (2). – P. 429–432.

УДК 621.891:669
Циганов В.В.[1], Первєєв Д.В.[2]
[1] д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асист. НУ «Запорізька політехніка»

## ВПЛИВ ПОЛІМЕРНИХ СПОЛУК МОТЗ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ШЛІФУВАННЯ

У сучасних умовах стрімкого науково-технічного прогресу розробка та впровадження новітніх технологічних рішень, зокрема мастильно-охолоджуючих технологічних засобів (МОТЗ), стає ключовим чинником підвищення ефективності та продуктивності промислових процесів. Це особ-

ливо актуально в контексті оптимізації використання обладнання, впровадження передових методів обробки та забезпечення високих технічних і економічних показників. Одним із перспективних напрямів удосконалення МОТЗ є введення функціональних присадок, які розширюють їхні властивості відповідно до потреб сучасного виробництва. Раціональний вибір МОТЗ під час металообробки дозволяє істотно підвищити стійкість ріжучого інструменту, покращити якість оброблюваних поверхонь та знизити енерговитрати, одночасно забезпечуючи сприятливі санітарно-гігієнічні умови праці.

Особливу увагу привертає використання полімерів як активних присадок у складі МОТЗ. Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, полімери здатні при механо-термічній деструкції утворювати хімічно активні продукти які взаємодіють з оброблювальними та інструментальними поверхнями. Можна припустити, що ефективність впровадження полімерної складової відбувається за рахунок деструкції полімеру, яка залежать від числа його молекул, тобто від їх молекулярної маси.

Було проведено 8 досліджень. З яких 4 з використанням розпилення водного розчину зшитого сополімерома акрилата та акриламіду калію під час плоского шліфування та 4 з розпиленням у зону шліфування води. Дослідження проводили на плоскошліфувальному верстаті 3Г71М. При цьому використовували комплекс приладів, а саме: динамометр УДМ 300, для проведення активного контролю двох складових сил різання (Pz, Py) з реєстрацією показників на комп'ютері, мультиметр UT61A з термопарою ТР-01А для визначення температури у зоні різання, профілометр-профілограф мод. 170311 для визначення знятого шару металу з заготовки і її шорсткості.

Для дослідження використовувалася заготовка зі сталі 40Х розміром 50×36×20 мм. В якості МОТЗ застосовували водний розчин зшитого сополімеру акрилату та акриламіду калію з концентрацією 0,02%, який добре розчиняється у воді. Шліфування проводили кругом 1 250×32×76 14А 25П СТ1 К7 35 м/с А1кл (ДСТУ 2424-83). У зразку просвердллено отвір діаметром 3 мм для введення спайки термопари. Режими різання: поздовжні переміщення заготовки 1 м/хв, швидкість шліфування 33м/с, зусилля навантаження 10 Н/мм, машинний час роботи 2,50 хв.

У розглянутих умовах шліфування при використанні розчину полімеру у порівнянні з рідиною без полімеру відбувається збільшення сили різання до 4%, а також зниження температури різання до 5%. При цьому шорсткість обробленої поверхні знизилась на 10%. Продуктивність обробки підвищилась на 3%.

Отримані результати вказують на доцільність проведення подальших досліджень з виявлення оптимального складу та концентрації полімерів у МОТЗ, комплексного впливу на підвищення якості обробленої поверхні, економічністі шліфування.

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

УДК 621.873.874
Мартовицький Л.М.[1], Глушко В.І.[1], Шаніна З.М.[1]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

# ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЇЗДОВИХ БАЛОК РУДНО-КОЗЛОВИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЧІВ

На відміну від інших сучасних машин моральне застарівання унікальних вантажо-підйомних кранів, особливо важкого та надважкого режимів, йде значно повільніше. Це пов'язано з вартістю, складністю виготовлення, та, особливо, з серйозними технологічними проблемами, що виникають при втручанні у виробничий процес при заміні таких кранів, як рудно-козловий перевантажувач. Заміна кранів з видатними технічними характеристиками та металоємністю – дороговартісна операція. Подовження строку роботи таких кранів призводить до економії ресурсів. Такі крани зазвичай працюють в умовах агресивних середовищ, важких та надважких режимних груп, великих змінних навантажень та Д'аламберових сил. Всі ці експлуатаційні умови впливають на зміну динамічних характеристик металоконструкцій рудно-козлових перевантажувачів, які можливо діагностувати.

Пропонується оцінювати вплив значних корозійних пошкоджень на довговічність металоконструкцій рудно-козлових кранів через зміну вібраційних характеристик їздових балок, як основного несучого елементу, таких кранів. Вважаючи масу балки повільно-змінною через тривалу корозію, повне диференційне рівняння вільних коливань їздового двохопорного стрижня може мати наступний вигляд:

$$d^2(EJ\frac{d^2y}{dx^2})-\frac{d}{dx}(J_x\frac{d^2\theta}{dt^2}+N\frac{dy}{dx})+m\frac{d^2y}{dt^2}=0\,, \qquad (1)$$

де $m(x,t)$, $EJ(x,t)$ – прогінна маса балки та жорсткість на згин;
$J_x(x,t)$ – масовий прогінний момент.

При незначних амплітудних коливань можна прийняти поздовжні сили $N=0$ та відсутність інерційного впливу від повертання поперечних перетинів балки. Припущення дозволяють спростити диференційне рівняння до наступного виду:

$$\frac{d^2}{dx^2}(EJ\frac{d^2y}{dx^2})+m\frac{d^2y}{dt^2}=0\,. \qquad (2)$$

В такому вигляді рівняння зручно вирішити за допомогою методу Фур'є, приймаючи жорсткість балки $EJ = \varphi_1(\xi) \cdot \psi_1(t)$ та прогінну масу балки $m = \varphi_2(\xi) \cdot \psi_2(t)$.

Аналіз рішень диференційного рівняння вільних коливань їздової балки рудно-козлового перевантажувача дозволяє по власним частотам та амплітудам з часом експлуатації крана оцінювати несучу здатність та довговічність металоконструкції

УДК 621.862
Фролов Р.О.[1] , Сидоренко М.В.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Контактне викришування робочих поверхонь зубчастих коліс є однією з основних причин їх виходу з ладу. Допускні контактні напруження в більшій степені залежать від твердості зубців. Часто для виготовлення зубчастих коліс використовують матеріали, які дозволяють отримати у поверхневому шарі високу твердість. Широко застосовують методи підвищення твердості поверхневого шару, наприклад хіміко-термічна обробка. Передові технології, що застосовуються для зміцнення зубчастих коліс, мають забезпечувати не лише належну точність, але й високу якість поверхневого шару. Зокрема, під час цементації через значну температурну дію спостерігається жолоблення зубчастих коліс, що призводить до зниження їхньої точності на 2…3 ступені й потребує подальшого шліфування. Азотування має переваги у вигляді нижчої температури процесу та відсутності фазових перетворень. Однак газове азотування не позбавлене недоліків, серед яких відносна крихкість зміцненого шару, варіативність властивостей і тривалість процесу. Перспективним варіантом є процес іонного азотування, що використовує дифузійне насичення у плазмі тліючого розряду й позбавлений вказаних недоліків. Водночас, попри впровадження нових технологій, у виробництві редукторів для підйомних машин в Україні продовжують широко застосовувати відверто застарілі методи. На вітчизняному ринку фактично відсутні послуги з іонного азотування та ультразвукового зміцнення зубчастих коліс, які є доступними та популярними в багатьох країнах. Однією з важливих задач залишається вдосконалення технології обробки зубчастих коліс, враховуючи їхню складну експлуатацію й значні навантаження. Іонне азотування набуває поширення у машинобудуванні для зміцнення різноманітних деталей, однак наразі мало застосовується для зубчастих коліс саме підйомно-транспортних машин.

Саме тому викладачами кафедри ДМ і ПТМ спільно з Podem Gabrovo Ltd було проведено роботу з випробування високонавантажених зубчастих коліс та впровадження прогресивних технологій їх хіміко-термічної обробки. Розподіл вмісту елементів визначали багатоцільовим растровим мікроскопом JSM-6360LA з приставкою для рентгеноспектрального енергодисперсійного аналізу JED 2200. Слабкотравний змінний шар представляв собою збиткову ε – фазу, що відповідає технології іонного азотування. На всіх запропонованих режимах добивалися рівномірного розподілу легуючих елементів. Для визначення глибини азотованого шару був використаний замір мікротвердості по перерізу зуба від поверхні до серцевини.

Встановлено, що при виробництві зубчастих передач підйомно-транспортних машин, на відміну від рекомендацій для авіаційної промисловості, необхідно застосовувати менш крутий градієнт твердості. Питання визначення ефективної глибини азотованого шару залишається дискусійним через різне розуміння порогового значення величини твердості, тому наразі запропоновано один із компромісних підходів. У співпраці з партнерами вже розроблено технології іонного азотування зубчастих коліс для електричних талей. Для досягнення необхідної точності циліндричних зубчастих коліс із внутрішнім та зовнішнім зачепленням їх виготовляють на високопродуктивних зубообробних верстатах фірми Gleason-Pfauter Maschinenfabrik GmbH (Німеччина).

Були розроблені методики контролю твердості приладом ERNST ESATEST MTR (Швейцарія), який дає змогу вимірювати твердість як на робочій поверхні зубців, так і в їхніх западинах. Прилад реєструє значення твердості під час безперервного вдавлювання конічного індентора, покритого високопровідним шаром. Вимірювання дозволяли отримувати залежність твердості від величини навантаження на індентор, забезпечуючи більш достовірну оцінку якості хіміко-термічної або зміцнюючої обробки. Результатом проведеної комплексної роботи стало забезпечення технологічної надійності зубчастих коліс вже на цьому етапі.

УДК 620.169.1
Козак Д.С.[1]
[1]старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ВИПРОБУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ РС-1

Випробування матеріалів на опір втомі здійснюється експериментальним шляхом на дослідних зразках, за допомогою машин повторнозмінного навантаження. В даному випадку дослідження проводяться на установці РС-1 побудованій в Національному університеті «Запорізька політехніка», яка

дозволяє здійснювати навантаження з будь-яким коефіцієнтом асиметрії цикла. Методика проведення випробувань відповідала ДСТУ 2824-94.

Штатні захватні пристрої установки РС-1, обумовлюють використання плоских зразків довжиною 150 мм, товщиною 5 мм, і шириною 24 мм. Вартість всього дослідження зумовлена високою вартістю сировини, складністю її видобутку та обробки, а також виготовленням й обробкою дослідного зразка такого розміру.

Для зниження вартості дослідження та розширення номенклатури можливих випробувальних зразків було розроблене та виготовлене перехідне кріплення, яке дозволяє проводити дослідження зразків розміром 55 мм у довжину, 2 мм у товщину і 10 мм у ширину.

Використання перехідного кріплення дозволить суттєво зменшити масу випробовуваних зразків. Зокрема, маса зразка з легованої сталі у стандартному виконанні становила 131 грам, тоді як маса зменшеного зразка – лише 8 грам. Таким чином, застосування модернізованого кріплення забезпечує зниження маси зразків у понад 16 разів, що сприяє зменшенню витрат матеріалу та підвищенню економічної ефективності досліджень.

УДК 621.86/87
Мартовицький Л.М.[1], Євдокімов І.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-311 НУ «Запорізька політехніка»

## СПОСІБ ДІАГНОСТУВАННЯ КРАНОВИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Діагностуємий елемент металоконструкції (без демонтажу та руйнування) підлягає випробувальним або експлуатаційним навантаженням, які викликають пружній розтяг (стиск) стрижнів або пружний згин балочних конструкцій. В кожному циклі вимірюється величини навантажень та відповідних деформацій елементів. Різниця в жорсткості при розтягу та стиску (як відношення навантаження до деформації) свідчить про наявність пошкодження в елементі. Чим більше ця різниця, тим більший його вплив на несучу здатність елемента.

Найбільшу небезпеку представляють пошкодження , що розміщенні перпендикулярно до вектору розтягуючих експлуатаційних навантажень. Такі умови характерні для розтягнутих стрижнів ферменних конструкцій та нижніх поясів коробчастих балок мостових кранів.

В цьому випадку при стиску тріщина закривається, та в роботу включається повний перетин елемента. Тріщини, напрям яких співпадає з вектором зовнішнього навантаження, не мають рішучого впливу на працездатність та живучість елемента. Статичні випробування на розтяг та стиск зразків без

тріщин та з поперечними тріщинами (пошкодження 10…30 % поперечного перетину зразка) проведені на розривній машині з реєстрацією зусиль та деформацій. Динамічні випробування зразків з тріщинами проводилися на пульсаторі з поступовим збільшенням амплітуди пульсуючого зусилля до моменту руйнування зразка. Параметри сили та деформації фіксувалися на осцилографі.

В процесі циклічних навантажень зразка на пульсаторі, особливо при поступовому додаванні амплітуди, проявляється збільшення різниці амплітуд розтягу та стиску зразка. Амплітуди навантажень зберігають симетрію жорсткості, при розтягу та стиску, а для зразка із пошкодженням можна вирахувати та по їх різниці оцінити рівень пошкодження.

УДК 620.178.32
Фролов Р.О.[1], Осаулко Р.С.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-313 НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЕФІЦІЄНТА КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ НА ОПІР ВТОМІ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 09Г2С В УМОВАХ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень показує підвищення максимальних напружень у зоні концентратора над напруженнями у поперечному перетині зразка. Для розрахунків на втому доцільніше використовувати ефективний коефіцієнт концентрації напружень, оскільки він реально вказує на ступінь зниження довговічності матеріалу. Загальновідомо, що ефективний коефіцієнт концентрації напружень визначається як відношення границі витривалості зразка без концентрації до границі витривалості зразка із концентратором.

Проведені дослідження на опір втомі низьколегованої сталі 09Г2С з теоретичним коефіцієнтом концентрації напружень К = 2,5 в умовах асиметрії циклу, із середніми напруженнями від -100 МПа до 300 МПа з кроком у 100 МПа. Отримані результати показали, що ефективний коефіцієнт концентрації напружень $К_б < 1,9$. Це свідчить про те, що у зоні концентратора протікають пластичні деформації, які суттєво перерозподіляють максимальні напруження у поперечному перетині зразка, покращуючи його загальний напружено-деформований стан. Також можна зазначити, що ефективність концентрації напружень зростала з довговічністю, тобто при зменшенні максимальних напружень циклу, а також ефективний коефіцієнт концентрації напружень максимальний при симетричному навантаженні. Можна зробити висновок, що при асиметричному навантаженні процеси зміцнення у тілі

деталі протікають більш інтенсивно, ніж процеси руйнування. Як відомо, ці процеси одночасні і неперервні при дії циклічного навантаженнях.

З вище сказаного можна зробити висновок, що ефективний коефіцієнт концентрації напружень максимальний при симетричному циклі навантаження. При асиметричних циклах ефективний коефіцієнт концентрації зменшується у зв'язку з релаксацією, оскільки в зоні концентратора напруження можуть значно перевищувати границю текучості.

УДК 621.762.793:669.15
Кононов В.В.[1], Махінов Ф.К.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-311 НУ «Запорізька політехніка»

## АНАЛІЗ УМОВ 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. Одним із 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 оксисульфідної корозії відбувається зниження службових властивостей металу, що призводить до обмеження їх ресурсу експлуатації.

Підвищення корозійної стійкості лопаток може бути отримане різними методами, що включають вдосконалення хімічного складу сплавів, застосування захисних покриттів, здійсненням конструкторських і експлуатаційних заходів тощо. Конструктивні елементи ГТУ в процесі експлуатації схильні до, як правило, дії декількох видів навантажень, кожен з яких викликає характерний йому вид ушкодження. Так, на робочі і напрямні лопатки ГТД і ГТУ діють напруги, що визначаються комплексом статичних, вібраційних і циклічних температурних навантажень.

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. Рівень цих напруг визначається конструктивними та експлуатаційними чинниками і може становити 100 МПа, а сумарні (еквівалентні) – 150 МПа. На пошкодження, спричинені статичними, втомними і термосталостними навантаженнями, накладається вплив робочого середовища, під дією якого протікають корозійні процеси.

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. Ця концепція абсолютно вірна при використанні суцільних деталей. З використанням полегшених, тобто порожнистих лопаток ГТУ, перш за все 1-го ступеня турбін, вона вимагає всебічного (комплексного) підходу в розгляді корозійних пошкоджень.

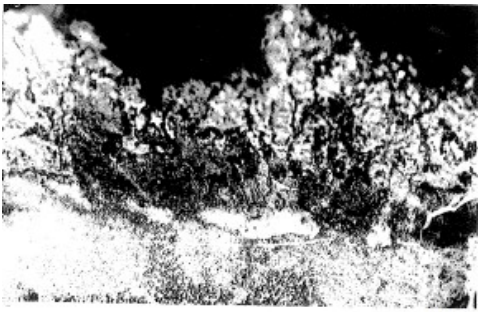
Тривала експлуатація робочих лопаток ТВД ГТК-10І і ГТН-16 без захисних покриттів показала, що до оксисульфідної корозії в рівній мірі схильні як зовнішня так і внутрішня порожнина.

Зовнішній вигляд лопатки ГТН-16 після тривалої напрацювання (більше 17 тис. год) в умовах оксисульфідної корозії представлений на рисунку 1. Велика частина поверхні профільної частини покрита тонким щільним шаром окалини і продуктів корозії. Найбільш сильне корозійне пошкодження металу спостерігається на вхідній кромці і центральній частині корита, де верхній шар окалини відшаровується. Уздовж вхідної крайки, з боку спинки і з боку корита відбувається локальне відділення окалини.

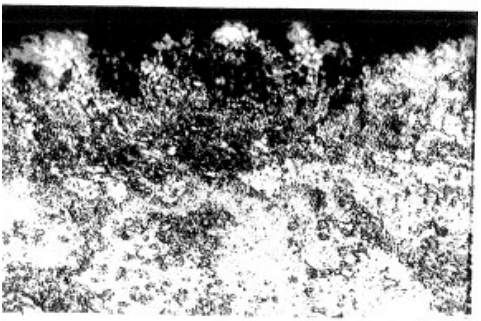
Рисунок 1 – Робоча лопатка газотурбінного нагнітача ГТН-16 після тривалої експлуатації (більш 17 тис. год).

Металографічним аналізом корозійного стану поверхні лопаток встановлено, що у верхній і середній 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 2.



а x 600



б x 600

а – зовнішня поверхня; б – внутрішня поверхня.

Рисунок 2 – Мікроструктура корозійного пошкодження поверхонь профільної частини робочих лопаток ГТК-10І.

Відмітимо деякі закономірності, прийнятні при розгляді загального механізму оксисульфідної 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 Ni - $Ni_3S_2$ з низькою температурою плавлення веде до порушення захисної плівки оксидів. Надалі відбувається розвиток автокаталітичного процесу з утворенням і окисненням евтектики.

Таким чином, комплексній підхід в аналізі корозійного руйнування диктує нагальну необхідність захисту не лише зовнішньої, але і внутрішньої поверхні профільної частини порожнистих лопаток ГТУ.

УДК 621.873
Кравченко Є.О.[1], Сидоренко М.В.[2], Фролов Р.О.[3]
[1] асп. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[3] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КІНЦЕВИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ

Кінцеві балки в мостових кранах є одними з найбільш пошкоджуваних вузлів. Причини зниження довговічності після тривалої експлуатації можна розділити на дві основні групи: великі горизонтальні навантаження на ходові колеса та недостатня втомна міцність кінцевих балок існуючої конструкції.

Для визначення довговічності кінцевих балок було побудовано математичну модель довговічності кінцевих балок, що враховує горизонтальні навантаження та конструктивні параметри кінцевих балок. Проведено аналіз впливу факторів для усунення таких, що є несуттєвими.

Так встановлено, що на горизонтальні навантаження суттєво впливають відхилення кранової колії від проектного положення та відхилення установки ходових коліс. Такі фактори як відмінність пускових характеристик кранових двигунів, величин пускових опорів в межах допусків, а також відхилень ходових коліс крана в вертикальній площині не суттєво впливають на величину навантаження та на довговічність. Крім того із переходом на системи керування на основі перетворювачів частоти фактори віднесені до електричної частини крана стають ще менш значущими.

Діючі нормативні документи щодо точності улаштування шляхів та установки ходових коліс насамперед були продиктовані неспроможністю на час написання цих документів підтримувати допуски в більш жорстких діапазонах. Навіть якщо провести порівняння із європейськими нормами стає очевидним, що необхідно удосконалювати як методики вимірювання положення ходових коліс так і контроль за станом підкранових шляхів. Узагальнення досвіду передових виробників кранового обладнання (DEMAG, KONECRANES та ін.) показує, що чималі зусилля вони віддають вирішенню контроля положення коліс та кранових рейок. Так відомі лазерні системи із рухомими візками, які дозволяють проводити високоточні вимірювання кранових шляхів в дистанційному режимі. Щодо визначення положення ходових коліс, то всі потужні виробники вклали ці можливості ще на етапі конструю-

вання вузлів кріплення ходових коліс до кінцевих балок. Таким чином використати їх досвід напряму не є можливим. Однак використання власних розробок приладів для вивірення ходових коліс в НУ «Запорізька політехніка» дозволило отримати сучасні методики визначення положення колеса в плані. Метрологічна оцінка методики дозволила стверджувати, що точність установки ходових коліс в плані в умовах цеху становить 0,05 мм, чого достатньо на даному етапі проведення досліджень. Таким чином ми підійшли до другої частини дослідження, по визначенню впливу конструктивних факторів на довговічність кінцевих балок. Балки було розділено на дві групи. Прямі та із кутом нахилу перехідної частини 135°. Такий поділ і раніше вважався за доцільне. Раніше складені авторами прогнозні моделі теж в неявному вигляді підтримували такий поділ, бо вірогідність пошкодження визначалася по заводам-виробникам кранів, які мали незмінні конструкції кінцевих балок протягом багатьох років.

За результатами досліджень встановлена недостатня довговічність кінцевих балок існуючих конструкцій для кранів важких режимів робіт. Встановлена раціональна межа між зниженням навантажень за рахунок зменшення сумарного кута перекосу ходового колеса та необхідністю підсилення конструкцій кінцевих балок. Встановлено несуттєві фактори впливу, що дозволило розвантажити експлуатаційний персонал.

УДК 621.865
Козак Д.С.[1], Козак В.С.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ МОСТОВОГО КРАНА

Модель мостового крана використовується для вивчення принципів роботи мостового крана здобувачами вищої освіти. Вона складається з металоконструкції крана, візка, гака та аналогової системи керування. Простота та надійність стенду зумовлює його широке використання у освітньому процесі у якості лабораторного стенду. Метою роботи була модернізація системи керування крана шляхом встановлення програмованого мікроконтролера Arduino Nano з Bluetooth-модулем HC-05, і 4-х канальний модуль реле, що дозволило здійснювати бездротове керування краном використовуючи смартфон.

Механізми моделі приводиться в рух за допомогою подачі цифрового радіосигналу на мікроконтролер, а з нього вже передається на відповідне реле яке вмикає або вимикає визначений двигун. Модель крана має два осно-

вних механізми: привод пересування візка, що переміщує його по горизонтальній осі та привод підйому та опускання гака для переміщення вантажів.

Для реалізації управління було використано:

- Мікроконтролер Arduino Nano на базі ATmega328 для обробки команд керування.
- Bluetooth-модуль HC-05 для зв'язку мікроконтролера зі смартфоном.
- 4-х канальний модуль реле для керування електродвигунами.
- Мобільний додаток для надсилання команд.

Мікроконтролер Arduino Nano базі ATmega328 для обробки команд керування, було обрано через цілий ряд переваг:

- компактність, розміри плати дозволяють розмістити її в середині корпусу моделі стенду;
- наявність досить великого числа цифрових виходів, що дає можливість під'єднати велику кількість датчиків та реле;
- вбудований завантажувач програм;
- проста та розповсюджена мова програмування C++.

Програмування здійснювалося в середовищі Arduino IDE мовою C++. Було розроблено програму, що приймає сигнали від смартфона через Bluetooth з'єднання та активує відповідні механізми крана. Користувач може керувати візком та гаком за допомогою мобільного застосунку. Оскільки всі елементи керування під'єднані паралельно, а живлення двигунів береться із зовнішнього джерела, залишається можливим керування маніпулятора як від вбудованого пульта керування так і від мікроконтролеру - дистанційно.

Запропонована модернізація моделі козлового крана значно розширює можливості його використання в освітньому процесі, дозволяючи студентам краще ознайомитись в інтерактивному способі з основними принципами роботи мостових кранів.

УДК 621.873
Сидоренко М.В.[1], Єманов М.Ф.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ВИМІРУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ХОДОВИХ КОЛЕСАХ КРАНІВ

Зазвичай більшість кранових коліс виготовлювались із сталі 65Г (65Mn). Сучасні крани обладнано ходовими колесами із різноманітних матеріалів, таких як: 42CrMo4, AISI4140, 41Cr4, A504, SSW-Q1R, 1045, 1055, 1060, 1070 та інші. При цьому геометричні параметри коліс значно відрізняються від тих, що випускалися раніше та розповсюджені в Україні. Таким

чином, на відміну від добре досліджених коліс з сталі 65Г актуальним стає дослідження напруженого стану коліс на виробництві та при експлуатації.

Для перевірки міцності ходових коліс було використано метод кінцевих елементів. В порівнянні із раніше виготовленими колесами загальна тенденція зменшення металоємності викликала збільшення напружень від згину та стиску.

Одним з перспективним напрямів аналізу кранових коліс, де механічна і термічна обробка призводить до великих значень залишкових напружень, які на сьогодні не аналізуються через відсутність оперативних і достатньо точних методик, є метод шумів Баркгаузена.

Для визначення залишкових напружень на ТОВ «Запоріжкранзавод» було зібрано випробувальний стенд із приводом обертання колеса та переміщення прохідного електромагнітного датчика. Реєстрація середньоквадратичного значення амплітуди шумів Баркгаузена (rms) здійснювалась приладом Rollscan 200 (виробництва Stresstech OY, Фінляндія). Перехід на колеса інших розмірів виконувався за рахунок горизонтально переміщення привідних роликів. Для градуювання пристрою використовували визначення залишкових напружень методом свердлення глухого отвору на колесах діаметром 250 мм, які можна було досліджувати в лабораторних умовах. Слід зазначити, що на значення rms крім величини залишкових напружень впливає також твердість поверхневого шару коліс. Твердість коліс по доріжці кочення вимірювали портативним твердоміром Т-УД2 (NOVOTEST, Україна). Слід зазначити, що розкид величини твердості коліс при сталій технології виготовлення є незначним та досить стабільним в партії. Водночас відхилення по твердості свідчить про порушення технології виготовлення коліс. Така сумісна дія факторів дозволяє використовувати rms як комплексний параметр оцінки якості коліс.

На відміну від використовуваного раніше контролю твердості в певних точках запропонований спосіб дозволяє проводити контроль всієї доріжки кочення, а також отримати комплексний параметр, що залежить від твердості та напруженого стану колеса.

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

УДК 621.771.1
Матюхін А.Ю.[1], Доновський І.О.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

# ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МІТЧИКІВ ЗАСОБАМИ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ

Мітчики є незамінними інструментами для нарізання внутрішньої різьби в деталях із металів та сплавів. Від їх якості залежать точність, продуктивність і надійність різьбових з'єднань. Високі вимоги до механічних властивостей – міцності, твердості, втомної стійкості – диктують необхідність пошуку нових технологічних рішень для підвищення довговічності та надійності мітчиків.

Пластичне формування на етапах виготовлення мітчиків відкриває нові можливості для значного поліпшення їхніх механічних та експлуатаційних характеристик. Завдяки контрольованій деформації матеріалу вдається отримати більш щільну, однорідну структуру металу, що підвищує стійкість інструменту до зношування і руйнування.

Мета дослідження:

Вивчити вплив методів пластичного формування на формування мікроструктури мітчиків.

Визначити оптимальні параметри процесу для підвищення міцності, твердості, втомної стійкості та ресурсу роботи інструменту.

Методи дослідження:

Холодне та гаряче обтиснення для модифікації об'ємної структури матеріалу.

Використання методів об'ємної та поверхневої пластичної деформації.

Мікроструктурний аналіз (оптична і електронна мікроскопія).

Випробування на твердість (за Роквеллом), міцність на вигин і стійкість до абразивного зношування.

Основні результати:

Підвищення щільності матеріалу: Завдяки інтенсивному пластичному деформуванню зменшено кількість пор, мікротріщин і дефектів у структурі металу.

Залишкові напруження: Створення сприятливих залишкових напружень на поверхні збільшує втомну міцність інструментів.

Підвищення зносостійкості: Поверхневе наклепування зміцнює різальні крайки мітчика, знижуючи темпи їх зношування при роботі у важких умовах.

Ресурс роботи: Мітчики, оброблені методами пластичного формування, демонструють збільшення експлуатаційного ресурсу в 1,5–2 рази порівняно зі стандартними виробами.

Економічна ефективність: Впровадження технології дозволяє підвищити якість інструменту без істотного збільшення вартості його виготовлення.

Методи пластичного формування довели свою високу ефективність у підвищенні механічних та експлуатаційних характеристик мітчиків. Подальша оптимізація режимів обробки відкриває перспективи для серійного виробництва більш якісного, довговічного інструменту, що забезпечить підвищення продуктивності різьбонарізних операцій у промисловості.

УДК 621.73.043
Обдул В.Д.[1], Єпішкін О.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## ГВИНТОВИЙ ПРЕС З МУФТОВОЮ ВКЛЮЧЕННЯ: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ПІДХІД ДО ШТАМПУВАННЯ СКЛАДНИХ ВИРОБІВ

У роботі розглянуто удосконалення конструкції гвинтового преса шляхом впровадження приводу з муфтою включення, що дозволяє накопичувати кінетичну енергію у ведучій маховій масі. Такий підхід забезпечує зменшення пікових навантажень на електромережу, підвищення коефіцієнта корисної дії у перехідних режимах та зниження теплових перевантажень, характерних для традиційних конструкцій пресів, зокрема типу RZS.

Основні положення та інженерні рішення:

Розділення ведучої махової маси на декілька частин дозволяє зменшити момент інерції та зменшити масу конструкції при збереженні енергетичних характеристик;

Кінематичне з’єднання маховиків через муфту включення дозволяє реалізувати поступовий розгін робочого маховика та знизити навантаження на електродвигуни;

Автономний привід зворотного ходу повзуна (гідро- або пневмопривод) забезпечує стабільну роботу преса без додаткових втрат енергії;

Інженерна схема дозволяє знизити вагу верхньої частини преса, що покращує його стійкість та зменшує навантаження на опорну структуру.

Запропоновані рішення спрямовані на підвищення енергоефективності, надійності та прецизійності роботи гвинтових пресів, що є актуальним для

обробки тугоплавких і важко деформованих матеріалів у сучасному машинобудуванні.

УДК 621.77.04
Матюхін А.Ю.[1], Єрмоленко А.В.[2], Жолнірчук О.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ВУГЛЕЦЕВО-ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Інтенсифікація економічного розвитку диктує впровадження нових досконаліших технологічних процесів, сучасних машин і систем.

Подальше прискорення науково-технічного прогресу, підвищення економічності та надійності різної апаратури, приладів, машин і верстатів нерозривно пов'язане з дозволом виробництва виробів з антифрикційних і конструкційних матеріалів на основі вуглець - полімерних композицій.

Застосуванням матеріалів з ВПК досягається економія великої кількості дорогих кольорових і чорних металів, підвищення стійкості деталей, що працюють на тертя і в агресивних середовищах, зниження ваги апаратури і машин, і зменшення трудомісткості виготовлення самих деталей.

Таким радикальним рішенням є нова конструкція кульового клапана, у якому кульовий елемент разом із кільцями ущільнювачів виготовляється з вуглець-полімерної композиції відповідних складів.

Останнім часом дедалі більший інтерес виникає до антифрикційних і конструкційних матеріалів на базі графіту зі сполучною речовиною. Такі матеріали можуть працювати в різних умовах і середовищах без традиційних мастил. Відмінною особливістю цих матеріалів є можливість прогнозування їхніх експлуатаційних властивостей стосовно конкретних умов роботи. Це досягається варіюванням якісно-кількісних показників наповнювача - коксу, графіту, сполучної речовини і специфіки умов виготовлення.

На кафедрі «Обробка металів тиском» НУ «Запорізька політехніка» проводилися дослідження з добору складів, технології виготовлення, визначення експлуатаційних характеристик і сфер застосування вуглецево-полімерних композицій (ВПК) як підшипникових і конструкційних виробів. Наразі отримано пріоритетну довідку на один зі складів УПК і спосіб виробництва. Вуглець - полімерними композиціями займаються фірми Німеччини, США та Японії. Наприклад, японські пресобудівельні фірми "Аіда", "Хітачі" оснащують напрямні штампів штампів багатопозиційних прес-автоматів вставками з відповідних ВПК. Є відомості про широке використання зарубіжними фірмами подібних композицій у вузлах тертя, а також для конструк-

ційних виробів. Зокрема, як конструкційні вироби аналогічні композиції застосовуються в кульових клапанах конструкції фірми "Naval". Нами розроблено власну конструкцію, яка ввібрала найкращі якості конструкції фірми "Naval", але має і ширші можливості та в якій враховано запити споживачів.

До цього моменту підібрано деякі склади ВПК і відпрацьовано дослідну технологію отримання виробів. Проведено випробування матеріалу на стандартній машині тертя СМ 14-2, оснащеній теристорним перетворювачем і апаратурою, що реєструє. Отримані результати свідчать про високу зносостійкість досліджуваних вуглець-полімерних композицій. Проведено і проводяться натурні випробування підшипників з ВПК, встановлених у машинах і механізмах під час роботи в реальних умовах. Показано можливість використання ВПК у вигляді антифрикційних вставок у вузлах тертя ковзання штампів, гідро-пневмо-циліндрах, що розширює їхню сферу застосування. Тривають опрацювання щодо впровадження ВПК як конструкційних матеріалів для деталей машин і приладів, що працюють насамперед у несприятливих умовах.

Як уже зазначалося, розроблено нову конструкцію кульового клапана, в якому кульовий елемент (клапан) і кільця ущільнювачів виконано з ВПК. Клапан пройшов промислові випробування і наразі здійснено конструкційне доопрацювання, а також технологію виготовлення. Нову конструкцію кульових клапанів відзначає висока надійність, універсальність і широкі технологічні можливості.

Розроблена дослідна технологія одержання виробів із вуглець-полімерних композицій відрізняється від відомих простотою, надійністю, потребує мінімум операцій, забезпечує стабільність їхніх фізико-механічних характеристик і розмірів.

УДК 621.762.4
Матюхін А.Ю.[1], Кривопустов І.Є.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ ВИРОБІВ

Безперервний розвиток техніки постійно висуває завдання вишукування нових матеріалів з високими експлуатаційними властивостями та розроблення нових конструктивних і технологічних рішень отримання виробів різного функціонального призначення з вуглець-полімерних композицій.

Головне завдання цих розробок – підвищення надійності, довговічності тертя і конструкцій виробів, зокрема, гідропневмотичних циліндрів, з одно-

часним їхнім здешевленням завдяки застосуванню дешевої вихідної сировини і простої високопродуктивної, екологічно чистої технології. Мета роботи, здебільшого, переслідує радикальні рішення - заміна традиційних підшипників течії, які погано працюють у несприятливих умовах, на дешевші з вуглець-полімерної композиції, які не відторгають вологу і не потребують змащення.

Таким самим радикальним рішенням є нова конструкція кульового клапана, у якому кульовий елемент разом із кільцями ущільнювачів виготовляється з вуглець-полімерної композиції відповідних складів.

Останнім часом дедалі більший інтерес виникає до антифрикційних і конструкційних матеріалів на базі графіту зі сполучною речовиною. Такі матеріали можуть працювати в різних умовах і середовищах без традиційних мастил. Відмінною особливістю цих матеріалів є можливість прогнозування їхніх експлуатаційних властивостей стосовно конкретних умов роботи. Це досягається варіюванням якісно-кількісних показників наповнювача-коксу, графіту, сполучної речовини і специфіки умов виготовлення.

Однак, наявна на сьогодні інформація вказує на відсутність промислового досвіду виробництва. Ці обставини пов'язані як із суб'єктивними, так і об'єктивними чинниками. Останні, почасти, зумовлені відносною складністю наявної технології та нестабільністю одержуваних властивостей.

У порошковій металургії нині використовують різні преси та установки для формування виробів, які загалом можна розділити на спеціалізовані та неспеціалізовані.

До неспеціалізованого обладнання відноситься обладнання, яке в основному використовують як передавач тиску і отримувати на ньому формування з порошків можна тільки за умови застосування спеціального оснащення і пристосувань. До цього виду обладнання належать універсальні гідравлічні преси (які здебільшого призначені для пресування виробів із пластмас) і різні механічні преси.

До спеціалізованого пресового обладнання відносять таке обладнання, яке забезпечує:

- отримання достатнього тиску в необхідних напрямках формування;
- регулювання наповнювача прес-форм порошком і автоматичного видалення спресованих виробів із зони формування;
- застосування декількох пуансонів і синхронізування їхніх ходів;
- регулювання робочих ходів силових передач;
- жорсткість конструкції, необхідну для отримання заданої точності виробів;
- швидкість і зручність заміни пресувального інструменту;
- зносостійкість проти абразивного впливу матеріалу, що формується.

Вибір установки для формування визначається насамперед типом виробів, що виготовляються, їхньою геометрією і розмірами, а також такими властивостями, як щільність і рівномірність її розподілу за висотою і перерізом формованого виробу.

Для розроблення пресів у порошковій металургії прийнято вихідну шестизначну шкалу зусилля: 10; 16; 25; 40; 63; 100 КН.

Помноживши число вихідної шкали зусиль на 10, отримують другий порядок зусиль 100; 160; 250; 400; 630; 1000 КН. Для отримання третього порядку зусиль отримані числа множать ще на 10.

УДК 621.318.572
Матюхін А.Ю.[1], Ляшенко Ю.А.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## МАГНІТНІ ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ

Відповідно до магнітних властивостей матеріали, призначені для виготовлення виробів електротехнічного призначення, поділяють на магнітно-м'які та магнітно-тверді.

Магнітно-тверді матеріали володіють великими коерцитивною силою і магнітною енергією і застосовуються для виготовлення постійних магнітів.

Магнітно-м'які матеріали призначені для роботи в змінних електромагнітних полях і залежно від складу і способу отримання мають специфічні службові характеристики.

Під час вибору магнітно-м'якого матеріалу доцільно керуватися визначальними властивостями, розробленими в ІПМ НАН України. Для виготовлення статора електродвигуна тенденція визначальних властивостей магнітного матеріалу має такий вигляд: максимальна намагніченість $I_m \to max$ , залишкова намагніченість $I_r \to min$ , питомі сумарні втрати $P \to min$ , питомий електроопір .$\rho \to max$

Способи формування можна розділити на два види: переривчасте і безперервне. Переривчастим називається таке формування, за якого кількість циклів подачі шихти в порожнину пресформи відповідає кількості циклів формування, а вироби, що виготовляються, обмежені в трьох вимірах. У процесі переривчастого формування порушується зв'язок між черговою порцією шихти і готовим виробом.

При безперервному формуванні періодична або безперервна подача шихти здійснюється незалежно від кількості циклів пресування. Між ущільненою частиною виробу і неущільненою шихтою існує постійний перехід. Вироби обмежені у двох вимірах (ширина і висота) і практично необмежені в

третьому. Для цього техпроцесу застосовується переривчасте холодне пресування.

Можна виділити 3 схеми холодного переривчастого пресування.

Одностороннє пресування

Двостороннє пресування

Двостороннє пресування з рухомою матрицею.

УДК 621.771.23

Матюхін А.Ю.[1], Мисник В.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЗАГОТОВОК ІЗ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ СПОСОБАМИ ПРОКАТУВАННЯ

Технологія виробництва за проєктом заготовок з вуглецевої сталі передбачає посадку злитків після розливання в сталеплавильних цехах гарячим всадом з температурою посадки 900-9300С.

Зливки повинні відповідати ВЗТУ 143-14-2000.

Посадку злитків у нагрівальні колодязі проводять відповідно до аналітичної та робочої карти. Перед посадкою злитків гарячим всадом і після її закінчення контролер ВТК спільно з нагрівальником визначають температуру поверхні металу.

Після нагрівання до температури 12500С кліщовим краном злиток опускають у злитковоз, який транспортує злиток від нагрівальних колодязів до приймального рольганга й укладає злиток на рольганг.

Приймальний рольганг, що складається з 10 секцій, подає метал на поворотний стіл. Загальна довжина приймального рольганга 17400 мм.

Поворотний стіл призначений для повороту злитків на 1800 у горизонтальній площині та направлення злитків у кліть донною частиною і розташований на відстані 39500 мм від стану.

Надалі злиток за допомогою транспортного рольганга, що складається з трьох секцій завдовжки 28500 мм, передається на ділянку робочих клітей.

На ділянці робочих клітей злиток направляється на підвідний рольганг, який, будучи продовженням робочого рольганга, передає злиток на робочий рольганг.

Паралельно підвідному і транспортному рольгангам розташований розкатний рольганг довжиною 17520 мм.

Безпосередньо в кліть злиток (розкат) задають за допомогою маніпулятора, що забезпечує напрямок металу з калібру в калібр і правку розкату, і кантувальника, що забезпечує кантування злитка або розкату на 900.

Після проходу злитка через 1 калібр метал подається на ножиці гарячого різання тиском 900 тс з нижнім різом. Ножиці здійснюють обрізку і порізку прибуткової частини злитка, а в разі потреби і для обрізки донної розпушеної частини перед прокаткою на заготівельній кліті. Ножиці розташовані в лінії обтискної кліті на відстані 19700 мм від осі стану і мають максимальний переріз, що розрізається, - квадрат 300 мм на першій швидкості при температурі металу не менше 8000С. Метал до ножиць подається відвідним рольгангом, що має довжину 8400 мм. Заготівлю (злиток) прокочують за 15 проходів. Систему калібрування обрано ящикових калібрів в обтискній кліті, яка дає змогу максимально зробити витяжку і дає хорошу заповнюваність калібрів і ромб-квадрат у заготівельній кліті.

Злиток після ножиць прокатується згідно зі схемою прокатки (схема наведена в розрахунковій частині). Отриманий розкат подається передавальними шлепперами на лінію заготівельної кліті та за допомогою здвоєного рольганга передається до заготівельної кліті. Швидкість прокатки в заготівельній кліті становить 5,5 м/с. "Завдання" металу в кліть здійснюється за допомогою підпільних кантувальників, які розташовані під підйомними столами з переднього і заднього боку кліті, виконують кантування металу на 450 або 900 і переміщують розкат від одного калібру до іншого.

Після виходу розкату із заготівельної кліті метал розподільчим рольгангом завдовжки 61200 мм подається на ножиці зусиллям 1250 тс ліві або праві, на яких здійснюється розрізання розкату на мірні довжини, відрізка проб, а також передніх і задніх кінців металу. Максимальний перетин різу квадрата 220х220 мм, максимальна температура різу 7000С. Обріз металу від ножиць забирається за допомогою конвеєрів збирання обрізу. Для різання в гарячому стані квадратних заготовок із вуглецевої сталі наприкінці розподільного рольганга встановлені роторні пили. Максимальний розмір перерізу різу Ø360 мм, максимальна температура різу: для Ø80-270 мм - 8000С, Ø270-360 мм - 9800С.

Охолодження після прокату сталі 3кп квадрат 185, що є заготівлею для перекату у споживача і не потребує УЗК, виробляють на стелажах невеликими партіями з укладанням врозкид.

Потім метал для подальшої обробки і відвантаження на склад готової продукції передають на ад'юстаж оздоблювальних ліній 80-180. На ад'юстажі метал піддається таким операціям:

-усунення кривизни штанг;

-зачищення задирок на торцях і освітлення;

-зачищення поверхневих дефектів;

-сортування з метою відбракування штанг, що не відповідають вимогам нормативно-технічної документації;

-зважування;

-маркування, пакування в пачки з навішуванням бирок;

-відвантаження.

Метою обробки прокату є доведення його до розмірів, форми поперечного перерізу, якості поверхні відповідно до вимог технічної документації.

Метал, що не відповідає вимогам ГОСТів і ТУ, підлягає забракуванню або піддається додатковій обробці. На поверхні прокату не повинно бути поверхневих дефектів у вигляді тріщин, плівок, рванин, шлакових включень та інших дефектів, що порушують суцільність металу.

Правка квадрата 185 проводиться на правильному пресі моделі К108. Кривизна штанг після правки не повинна перевищувати допустимі ГОСТ.

Дефекти прокату, що утворюються в процесі правки: вм'ятини гвинтоподібні, підігнуті кінці штанг, відколи, підвищена кривизна штанг, поломка прутків у процесі правки. Задирки утворюються під час різання розкатів на пилах і ножицях гарячого різання. Видалення задирок на штангах проводиться на підвісних наждачних верстатах.

Світління проводиться з метою місцевого видалення окалини з поверхні прокату для подальшого виявлення поверхневих дефектів. Світління квадрата 185 проводиться на верстатах М7400 або підвісних наждачних верстатах.

Зачищенню піддається практично весь товарний прокат. Залежно від призначення прокат піддається вибірковій або суцільній зачистці. Виявлені поверхневі дефекти зачищаються на прокаті до повного видалення.

УДК 621.771.1

Матюхін А.Ю.[1], Пакета І.М.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## АНАЛІЗ НЕДОЛІКІВ ЗАВОДСЬКОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ КРУГЛОГО ПЕРЕРІЗУ

Технологію прокатки круга діаметром 230-265 мм з нержавіючої сталі типу Х18Н10Т на блюмінгу ПАТ "Днепропроспецсталь" розробляли з урахуванням результатів дослідних прокаток кіл діаметром 265 мм на першій кліті стану за технологією заводу і виявлених при цьому її недоліків.

Метою розробки нової технології було підвищення стабільності процесу прокатки, усунення скручування розкатів і отримання правильної геометрії профілю.

У результаті проведеної роботи виконано аналіз принчин нестабільності процесу прокатки та розроблено заходи щодо їх усунення.

Основними недоліками технології є:

- недостатньо рівномірний нагрів злитків, зумовлений конструкцією нагрівальних колодязів блюмінга;
- нераціональний режим обтиснень і нерівномірне заповнення калібрів металом, спричинені конструкцією наявних ящикового та овального калібрів;
- слабке самоцентрування розкатів в овальному і круглому калібрах, що призводить до втрати стійкості та звалювання розкатів у процесі прокатки з невиконанням висоти профілю й утворенням значних лампасів по ширині, тобто невиконання геометрії профілю;
- нерівність діаметрів верхнього і нижнього валків, що зумовлює асиметрію процесу прокатки;
- низький рівень установки нижнього валка, що призводить до асиметрії обтиснень з боку верхнього і нижнього валків і створює додатковий перекидний момент;
- відсутність необхідної для прокатки кіл привалкової арматури;
- труднощі утримання розкатів лінійками кантувальника та ін.

Для реалізації нової технології необхідно здійснювати кантування злитків навколо осі на 180° під час нагрівання в колодязях для здійснення рівномірнішого прогрівання металу за перерізом.

Прокатку кругів 230 - 265 мм можна здійснювати за двома варіантами:
- варіант 1 - з видачею готового прокату з першої кліті;
- варіант 2 - з видачею готового прокату з другої кліті.

УДК 621.771.016
Обдул В.Д.[1], Шевчук Д.О.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПРОКАТУВАННЯ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ НА БЛЮМІНГУ

У роботі розглянуто питання отримання трубної заготовки діаметром від 230 до 265 мм із нержавіючої сталі зі злитків масою 3,69 або 4,36 т на прокатному стані типу блюмінг 1050/9-0. Запропонована технологія дозволяє ефективно використовувати наявне прокатне обладнання для виготовлення великогабаритної трубної заготовки, що, у свою чергу, сприятиме збільшенню обсягів її виробництва та частковому розвантаженню ковальсько-пресового устаткування, яке раніше використовувалося для цих цілей. Кування на пресах є значно більш енерго- та трудомістким процесом порівняно з прокатуванням, тому перехід до прокатної технології є економічно доцільним.

Під час впровадження нової схеми прокатування були враховані особливості механічних властивостей нержавіючих марок сталі. Спроби прокатування у наявних калібрах виявили нестачу стійкості розкату «овал» у круглому калібрі, що негативно впливало на якість готової заготовки. Це стало однією з причин перегляду схеми деформації та необхідності удосконалення технологічного процесу.

З метою усунення виявлених недоліків до схеми прокатування була введена додаткова операція плющення, яка дала змогу суттєво знизити рівень вісевої пористості у злитках. Зменшення вісевої пористості позитивно впливає на якість металу, підвищує його однорідність і забезпечує необхідні характеристики для подальшого виробництва безшовних труб. У результаті реалізації запропонованої технології вдалося досягти стабільних геометричних параметрів трубної заготовки та покращити її якість.

Разом із тим, собівартість продукції зросла на 4 % у зв'язку з впровадженням нових операцій і адаптацією технології під особливості нержавіючих сталей. Однак, з урахуванням зниження загального навантаження на пресове обладнання, а також зростання продуктивності та якості готової продукції, ці витрати є виправданими з економічної точки зору.

УДК 621.771.016
Обдул В.Д.[1], Карпов В.Д.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПРОКАТУ КРУПНОГО СОРТУ ЗІ СТАЛЕЙ АУСТЕНІТНОГО КЛАСУ

На сьогоднішній день отримання крупного сортового прокату, особливо з середньо- та високолегованих марок сталей і сплавів, у більшості випадків здійснюється шляхом деформування на ковальських агрегатах, насамперед – на гідравлічних пресах. Такий процес є малопродуктивним, супроводжується значними втратами металу як у процесі кування, так і на стадії ад'юстажної обробки. Його основною перевагою є висока якість структури поперечного перерізу прокату – зокрема, практично повна відсутність анізотропії механічних властивостей. Це особливо актуально при виробництві прокату з поперечним перерізом у межах 0,04–0,9 м², який є найбільш затребуваним.

У даній роботі розроблено деформаційно-швидкісні параметри прокатування вказаного виду прокату зі сталей аустенітного класу на стані типу блюмінг 1050/950. Об'єктом дослідження є сортовий прокат діаметром від 200 до 270 мм.

У рамках роботи розроблено калібрування валків для забезпечення стабільного формоутворення металу, визначено оптимальні режими обтиснення, а також температурно-швидкісні параметри прокатування, що дозволяють забезпечити необхідні механічні властивості прокату.

Окрему увагу приділено питанням запобігання скручуванню розкатів навколо поздовжньої осі, що є критичним для забезпечення прямолінійності заготовки та мінімізації внутрішніх напружень у виробі. Запропоновано комплекс заходів технологічного характеру, які дозволяють значно зменшити ймовірність виникнення даного дефекту.

УДК 621.77.04
Бень А.М.[1], Неклеса М.Е.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## ГАРЯЧЕ ШТАМПУВАННЯ СТАЛЕЙ НАДВИСОКОЇ МІЦНОСТІ

Деталі зі сталі надвисокої міцності все частіше виготовляються методом гарячого штампування гартувальних сталевих листів. При гарячому штампуванні сталеві листи, що гартуються, нагрівають приблизно до 900 °С для перетворення листів в аустеніт. Потім листи загартовуються шляхом утримання в нижній мертвій точці за допомогою штампів у процесі, який називається загартуванням штампів. Деталі гарячого штампування мають міцність на розрив приблизно 1,5 ГПа. При гарячому штампуванні формувальне навантаження невелике, пластичність велика, а пружинна віддача значно мала. Деталі гарячого штампування використовуються для автомобільних деталей. Деталі високої міцності необхідні для підвищення безпеки автомобільної аварії. Тому гарячештамповані деталі в основному використовують як арматуру. Більшість деталей зігнуті, а гравюра частково міститься на краях деталей, наприклад середніх стійок. Безпека при аварії оцінюється програмою оцінки нових автомобілів (NCAP), і автомобілі розроблені для підвищення балів у NCAP. Гаряче тиснення має на меті підвищити безпеку при зіткненні зі зменшенням або без збільшення ваги автомобіля.

Основна перевага процесів гарячого штампування полягає у виготовленні надвисокоміцних сталевих деталей без пружинного зворотного ходу з високою міцністю на розрив. Як висока міцність, так і точність розмірів досягаються шляхом загартування штампу при гарячому штампуванні. Це призводить до вирішення проблем холодного штампування високоміцних сталевих листів. Крім того, навантаження при штампуванні невелике, а пластичність підвищена. Ідеальними є процеси гарячого штампування, оскільки під час штампування листи м’які, а виготовлені деталі тверді.

Сучасні процеси гарячого штампування все ще мають деякі недоліки. Інвестиційні витрати дуже високі через, серед іншого, вартість печі, преса та машини для лазерного різання. Об'єм обладнання великий, а енергоефективність печей низька. Продуктивність низька через утримування в нижній мертвій точці преса для гартування матриці, два-три постріли в хвилину. Механічні властивості гарячих штампованих деталей фіксовані через один сорт сталі, а покриття для захисту від окислення нагрітих листів є дорогими. Вихід інструменту з ладу та змащування при підвищеній температурі проблематичні. Сфера застосування гарячого штампування обмежена виготовленням деталей кабіни для захисту пасажирів від зіткнень автомобілів через недостатнє поглинання енергії. Розроблено складні підходи для усунення цих недоліків.

Отже, бажано розширити застосовний діапазон до порожнистих, зубчастих, середніх і малих деталей. Крім того, застосування технології до алюмінієвих сплавів, титанових сплавів, є привабливим.

УДК 621.77.07
Бень А.М.[1], Фролов Є.В.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ШТАМПІВ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ

Кування – це процес формування металів за допомогою сили стиснення. Удари наносяться молотом або пресом. За температурою рекристалізації процес кування поділяють на три типи. Температура рекристалізації металу або матеріалу – це температура, яка знаходиться прямо нижче температури плавлення металу або матеріалу. Процес кування, який здійснюється нижче температури рекристалізації, вважається холодним куванням, а процес, виконаний при температурі рекристалізації, вважається теплим куванням, а процес, який здійснюється вище температури рекристалізації, вважається гарячим куванням. У наведених тезах пояснюється матеріал штампової сталі на основі його хімічних властивостей і твердості для гарячого кування.

Куванням можна виготовляти порівняно міцніші деталі, ніж ті, які відливають або виготовляють обробкою різанням. Для точного потоку зерна часто віддають перевагу гарячому куванню, це забезпечує кращі характеристики та довговічність готового виробу, економію матеріалу, що є найбільш помітними перевагами, у порівнянні з литими деталями, ковані деталі можуть піддаватися високим навантаженням. Кування набагато економічніше, ніж лиття.

Залежно від заготовки, що застосовується, матеріал матриці, його хімічні властивості та твердість відрізняються. Детально для алюмінієвої матриці використовуються матеріали з твердістю приблизно (44–48) HRC. Алюмінієві заготовки не швидко зношують штамповий інструмент, оскільки твердість зберігається за допомогою цементування та загартування маслом. Якщо порівнювати з алюмінієм, латунний сплав швидко зношуєть штамповий інструмент, оскільки цей матеріал потребує твердості в діапазоні (48–52 HRC), для латунного сплаву краще використовувати сталь зміцнену сталь. Сталь є найскладнішим матеріалом для процесу кування, оскільки кращим матеріалом матриці є 5ХНВ і в межах діапазону твердості 58–60 HRC, де індукційне гартування є кращим для надмірної вимогливості. Вибір матеріалу матриці дуже важливий для продовження терміну служби матриці.

Висновки:

- ковані деталі, як правило, міцніші та дуже надійні, оскільки змінюється потік зерна матеріалу;
- штампи для кування, можуть бути виготовлені за допомогою лиття або кування;

УДК 621.771.016

Бень А.М.[1], Щербина А.Д.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ВИДАВЛЮВАННЯМ

Штампування видавлюванням дозволяє виготовляти поковки з малопластичних високоміцних сталей і проводити обробку з найменшими відходами металу. Залежно від напрямку течії металу розрізняють штампування прямим видавлюванням і штампування прошивкою (зворотне видавлювання). При прямому видавлюванні течія металу відбувається в напрямку руху пуансона. При зворотному видавлюванні метал тече в напрямку, протилежному руху пуансона. На практиці застосовують комбіноване видавлювання, при якому метал тече в прямому і зворотному напрямках.

Одними з найбільш перспективних процесів сучасного заготівельного виробництва є процеси точного об'ємного штампування (ТОШ). У деталей, виготовлених холодним видавлюванням, відношення площі необроблюваних поверхонь заготовки до площі всієї поверхні деталі може досягати 0,85 ... 1,0 [1].

Основні тенденції удосконалення процесів холодного видавлювання знаходяться у площині пошуку резервних можливостей деформування за

базовими схемами та розвитку процесів на основі їхнього поєднання із додаванням ступенів свободи течії металу. Розробка та застосування нових способів послідовного та суміщеного радіально-поздовжнього видавлювання для виготовлення деталей зі складним профілем покладає основу для інтенсифікації процесів об'ємного штампування за рахунок скорочення кількості технологічних переходів та зниження енергетичних витрат [2].

Можливості класичних аналітичних і сучасних чисельних методів в даний час реалізовані для одно- та двосторонньої течії металу. В області формозмінювання з деякими напрямками течії металу технологічні розрахунки досі представляють значні труднощі. Отже, одною з основних задач розвитку процесів точного об'ємного штампування видавлюванням є розробка і спрощення розрахункових методів для деталей зі складним профілем, що будуть використовуватись на підприємствах у масовому виробництві.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алієва Л. И. Перспективи розвитку процесів точного об'ємного штампування / Л. И. Алієва, Я. Г. Жбанков // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 1(11). – С. 13–19.

2. Грудкіна Н. Особливості проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі енергетичних моделей розрахунку / Н. Грудкіна, В. Левченко, П. Абхарі, К. Коцюбівська, К. Малий // Обробка матеріалів тиском. – 2022. – № 1(51). – С. 38–45.

УДК 621.771.01
Єпішкін О.В.[1], Нікітенко А.Л.[2]
[1] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ ОБЛАДНАННЯ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

Автоматизація процесів проектування займає ключове місце в розвитку сучасного машинобудування, особливо в галузі прокатного виробництва, де технічні рішення потребують високої точності, гнучкості та адаптивності. Для розробки високоефективного обладнання важливо забезпечити надійне цифрове середовище, в якому процес створення моделей, перевірки розрахунків та підготовки документації реалізується як єдиний безперервний цикл.

Системи автоматизованого проектування (САПР) дозволяють створювати 3D-моделі основних компонентів прокатних станів – клітей, опорних валків, редукційних механізмів, направляючих систем тощо. Важливою пере-

вагою таких систем є можливість автоматичного генерування креслень, специфікацій і технічної документації на основі побудованих моделей.

Для реалізації складних проектів усе ширше використовуються програмні платформи, такі як *SolidWorks*, *Siemens NX*, а також CAE-інструменти для розрахунків міцності та теплових навантажень. Це дає змогу на ранньому етапі виявляти потенційні зони деформацій і втомного руйнування, а також здійснювати аналіз конструкційних параметрів з метою їх оптимізації.

Розробка бібліотек стандартних вузлів і елементів, а також налаштування макросів для автоматизації рутинних операцій у САПР середовищах сприяє скороченню часу на проектування, підвищенню точності та уніфікації рішень. Крім того, формування зв'язку між CAD і розрахунковими модулями дозволяє забезпечити ефективну перевірку працездатності обладнання в умовах наближених до реальних.

Інформаційна інтеграція на базі цифрових моделей відкриває перспективи для переходу до концепції цифрового двійника прокатного обладнання. Такий підхід дозволяє вивчати поведінку систем у динаміці, моделювати робочі навантаження та прогнозувати знос окремих елементів.

Таким чином, впровадження систем автоматизованого проектування на всіх етапах створення прокатного обладнання значно підвищує ефективність інженерної праці, зменшує кількість помилок та скорочує час виходу нових технічних рішень на виробництво.

УДК 621.77.01
Бень А.М.[1], Мережко Б.В. [2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ

Використання надвисокоміцних сталевих компонентів швидко зростає в автомобільній промисловості через потребу у підвищенні пасивної безпеки та зменшенні ваги. Гаряче штампування сталей, легованих бором, є одним з методів виробництва надвисокоміцних сталевих компонентів з відкритим перерізом. Прогнозування процесу виробництва продукту та продуктивності вимагає детального знання відповіді матеріалу та еволюції протягом усього процесу виробництва, включаючи деформацію під час швидкого охолодження приблизно від 900◦C до кімнатної температури. Поєднаний термомеханічний аналіз використовується для прогнозування поведінки матеріалу під час процесу гарячого штампування. Щоб зафіксувати стан залишкової напруги,

який відповідає за зміну готового компонента, дуже важливо зафіксувати термомеханічну історію в моделі матеріалу.

Коли аустенітизована сталь охолоджується з різною швидкістю, залежно від деталей контакту з інструментом, аустеніт розкладається на різні фази продукту. Для борної сталі можливими дочірніми продуктами є ферит, перліт, бейніт і мартенсит. Морфологія цих мікроструктурних компонентів дуже різна, і, отже, їхні механічні властивості відрізняються. Таким чином, вивчення макроскопічної поведінки матеріалу стає важкою проблемою гомогенізації через те, що нові фази безперервно еволюціонують і необхідно враховувати історію деформації.

Конститутивна модель, запропонована Леблондом та ін., починається з поведінки кожної фази та повертається до макроскопічної поведінки матеріалу. Тут будуть описані основні частини моделі для випадку зміцнення деформацією. У оригінальній моделі передбачається, що аустеніт розкладається на одну фазу продукту. У поточній обробці передбачається, що модель справедлива навіть для випадків, коли аустеніт розкладається на кілька фаз продукту. Загальний приріст деформації, Δεij, вважається адитивно розкладеним і записується як

$$\Delta\varepsilon ij = \Delta\varepsilon^{e}_{ij} + \Delta\varepsilon^{th}_{ij} + \Delta\varepsilon^{tr}_{ij} + \Delta\varepsilon^{p}_{ij}$$

Представлено чисельну реалізацію механічної конститутивної моделі для моделювання гарячого штампування. Конститутивна модель має на меті дати розробникам продукту корисний інструмент для прогнозування здатності до формування, а також точності форми та пружності для термомеханічних тонких листових заготовок. Для подальшої оцінки прогнозованих можливостей реалізованих моделей необхідно провести додаткові експерименти для різних історій термомеханічного навантаження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Akerstrom P. Numerical implementation of a constitutive model for simulation of hot stamping / P. Akerstrom, G. Bergman, M. Oldenburg // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. – 2007. – Vol. 15, No 2. – DOI: 10.1088/0965-0393/15/2/007.

2. Leblond J. B. A theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformations. I. Derivation of general relations / J. B. Leblond, G. Mottet, J. Devaux // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1986. – Vol. 34. – P. 395–409.

УДК 621.9.05
Єпішкін О.В.[1], Четверик О.О.[2]
[1] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

# ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ІНЖИНІРИНГУ У СТВОРЕННІ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ

Сучасна наука про штампування металів невід'ємно пов'язана з комп'ютерним інжинірингом, який забезпечує фундаментальну теоретичну базу для розробки штампового оснащення. Завдяки застосуванню систем автоматизованого проектування (CAD), таких як SolidWorks та Siemens NX, можливо створювати детальні 3D-моделі, що дозволяють аналізувати геометричні та фізичні характеристики конструкцій уже на етапі проектування.

Основні теоретичні положення та підходи:

*Моделювання геометричних та фізичних характеристик:*
CAD-системи забезпечують можливість створення точних 3D-моделей штампового оснащення, що відкриває перспективу для аналізу впливу критичних зон навантаження та інших параметрів, важливих для попереднього прогнозування експлуатаційних характеристик.

*Інтеграція чисельного аналізу:*

Використання CAE-систем, зокрема QForm, дозволяє застосовувати чисельні методи для моделювання нелінійних деформацій та термомеханічних процесів у матеріалі. Теоретичний підхід до чисельного аналізу забезпечує можливість оптимізації конструктивних рішень за допомогою попередніх розрахунків.

*Концепція мультидисциплінарного підходу:*

Інтеграція CAD і CAE засобів у спільне інформаційне середовище сприяє комплексному аналізу як геометричних, так і механічних характеристик штампового оснащення. Такий підхід дозволяє виявити потенціал для підвищення точності проектування та оптимізації витрат на розробку.

*Аналіз потенціалу оптимізації:*

Теоретичне обґрунтування застосування комп'ютерного інжинірингу включає розгляд критеріїв ефективності, таких як мінімізація напружено-деформованого стану та підвищення довговічності матеріалів, що лежить в основі сучасних теорій машинобудування.

Підсумовуючи, розглянута концептуальна методика формує теоретичну основу для розробки оптимізованих конструкцій штампового оснащення. Інтеграція інструментів SolidWorks, Siemens NX та QForm відкриває нові перспективи як для подальших емпіричних досліджень, так і для практичного впровадження теоретично обґрунтованих рішень.

УДК 621.77.02

Єпішкін О.В.[1], Панченко К.Є.[2]
[1] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-814м НУ «Запорізька політехніка»

# ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ НАГРІВУ НА ЯКІСТЬ ШТАМПУВАННЯ МЕТАЛІВ

Теоретичний аналіз процесів штампування металів передбачає детальне дослідження етапу нагріву заготовок, оскільки саме теплообробка формує передумови для подальших фаз деформації та фазових перетворень у матеріалі. Важливим завданням даного дослідження є встановлення залежності між технологічними параметрами нагріву та формуванням мікроструктури заготовок, що безпосередньо впливає на якість кінцевої продукції.

Основні теоретичні положення та підходи:

*Контроль температурного режиму та інтерфейс нагріву:*

Різні методи нагріву (газовий, електричний, індукційний тощо) характеризуються своїми особливостями у формуванні температурного поля. Теоретичний аналіз показує, що точний контроль температурного градієнту є ключовим для забезпечення однорідності нагріву заготовок та запобігання виникненню локальних дефектів.

*Вплив нагріву на фазові перетворення металів:*

При нагріванні заготовки спостерігаються критичні процеси, пов’язані з розчиненням легуючих елементів та зміною фазового складу матеріалу. Теоретичні моделі дозволяють прогнозувати вплив температури та часу нагріву на утворення потрібних або небажаних фаз, що в кінцевому рахунку визначає механічні властивості відпрацьованих штампів.

*Моделювання термомеханічних процесів:*

Використання чисельних методів дозволяє аналізувати нелінійні аспекти деформації і розподілу температурних полів у заготовках. Інтеграція даних математичних моделей до технологічного процесу сприяє розробці оптимальних режимів нагріву, що забезпечують мінімізацію залишкових напружень та поліпшення якості штампування.

*Оптимізація технології нагріву:*

Аналіз літературних даних підтверджує, що впровадження сучасних систем контролю температурного режиму та використання індукційного нагріву дозволяє досягти більш високої однорідності нагріву, що позитивно впливає на якість кінцевого виробу. Теоретична модель оптимізації нагріву базується на порівняльному аналізі різних технологій з урахуванням їх енергетичної ефективності та впливу на структурні зміни матеріалу.

Підсумовуючи, теоретичне обґрунтування процесу нагріву як одного з ключових чинників якості штампування дає можливість сформувати науково

обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації технологічного процесу. Це є передумовою для подальшого практичного впровадження методів комп'ютерного моделювання у розробку та удосконалення штампового оснащення.

## СЕКЦІЯ «МАТЕМАТИКА»

УДК 517.9
Онуфрієнко В.М. [1], Килимник І.М.[2] , Слюсарова Т.І.[3], Зіненко І.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»

# ПРИПОВЕРХНЕВИЙ АНОМАЛЬНИЙ ФРАКТАЛЬНИЙ СКІН-ЕФЕКТ В МЕТАМАТЕРІАЛЬНОМУ ШАРІ

Теорія фрактального шару [1] на межі розділу двох середовищ базується на визначенні дробового диференціала $d^{\alpha}x = \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\frac{dx}{(t-x)^{1-\alpha}}$, його зв‘язку з дробовою похідною $d^{\alpha}L(x)={}_{a}D^{\alpha}_{x_i}L(x)d^{\alpha}x$, де дробова похідна ${}_{a}D^{\alpha}_{x_i}L(x)$ використовується у формі Рімана-Ліувілля [2].

Моделі аномального скін-ефекту, що базуються на дифузійних уявленнях про перебіг явищ у металах, для широкого діапазону частот були розроблені і експериментально перевірені дослідниками [3]. Високочастотні експерименти часто демонструють зниження ефективності математичної моделі суцільного середовища у порівнянні з теоретичними передбаченнями, навіть на низьких частотах, де шорсткість поверхні речовини не повинна бути проблемою.

Матеріалознавці зацікавлені методами підвищення експлуатаційних характеристик метаматеріалів шляхом реалізації структур, що мають суттєво нелінійні та аномальні деформаційні властивості і застосовні для одержання адаптивної реакції на зовнішній вплив. До таких матеріалів відносяться речовини з від‘ємним коефіцієнтом Пуассона в кристалах та відомих і штучно конструйованих композиційних матеріалах.

Така ситуація збуджує інтерес дослідників до опису скін-ефекту за схемою дифузійної моделі для фрактально структурованого шару в квазідвовимірних системах, де окремі шари атомів лаштуються у двовимірних сітках. Прикладом такого метаматеріалу можуть бути кристали зі структурою кагоме, коли окремі шари розміщені по вузлах трикутно-гексагональної сітки, що теоретично пов‘язане з утворенням електронної з діраковськими конусами структури, що є аналогічною графену.

Для кількісного опису явища нормального та аномального скін-шару в об‘ємному метаматеріалі розглядаємо фізико-геометричну модель фрактального шару і поширюємо результати дослідження на фрактально конфігуровані графенові плівки.

З цією метою вводимо диферінтеграли в опис фрактальних множин та в зв‘язок між похідними дробового порядку одиничної функції та дельта-функції. Таким чином враховуємо наявність в точках компакту неінтегровної густини кластерів з зарядами (струмами), імпедансу та ємності фрактально конфігурованого компакту з наявним скін-шаром (локалізацією поля у тонкому шарі поверхні), що характеризується глибиною проникнення і законом розподілу струмів (деформацій).

Для моделювання поля у фрактально структурованому метаматеріалі спираємось на висновки теорії, що базується на рівняннях Максвелла (Бернуллі) у дробових диферінтегралах з відомими наближеннями, що дають можливість моделювати розв‘язки хвильового рівняння в $\alpha$-характеристиках.

Ідею Б. Піппарда про те, що в умовах скін-ефекту основну роль в утворенні екранувального поверхневого струму відіграють електрони, що рухаються під малими кутами до поверхні, та класичне означення глибини скін-шару обчислюємо глибину фрактального скін-шару.

Результати проведеного чисельного експерименту на основі нашої теоретичної моделі свідчать про сильну залежність товщини скін-шару від величини скейлінгового показника, яким характеризується ступінь фракталізації структури метаматеріалу. Зміна товщини скін-шару зі значеннями скейлінгу від $\alpha = 0$ (у моделі суцільної неструктурованої речовини) до $\alpha = 1$ співвідносимо з фізичним ущільненням точок до зерен.

Чисельним варіюванням скейлінгового показника у межах від 1 до 2 теоретично виявлено збільшення/зменшення товщини скін-шару (фізично це може пов‘язуватись структуризацією зерен в ланцюжки (фрактальні домени)).

Степенева залежність фізичних параметрів (частоти, проникності, провідності, напруження, деформації) від величини скейлінгу $\alpha$ демонструє також можливість прогнозування перебігу аномального скін-ефекту в умовах координатної зміни скейлінгового показника $\alpha(y)$, що значно розширює використання розвиненої теорії для проєктування імпедансів пристроїв мікроелектроніки і механіки, що функціонують на основі або всупереч скін-ефекту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

2. Samko S. G. Integrals and fractional order derivatives and some of their applications / S. G. Samko, A. A.Kilbas, O. I. Marichev // Science and technology. – 1987. – 457 p.

3. Hayt W. H. Engineering Electromagnetics / W. H. Hayt. – 5th ed. – McGraw-Hill College, 1989. – 496 p.

УДК 372.862
Сніжко Н.В.[1], Анпілогов Д.І. [2]
[1] канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## МАТЕМАТИКА В ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ: МІЖДИСЦИПЛІНАРНИЙ ПІДХІД

В сучасному світі роль міждисциплінарного підходу як в процесі навчання, так і в наукових дослідженнях невпинно зростає [1; 2]. Зв'язок математики з природничими, загальнотехнічними та спеціальними фаховими дисциплінами дозволить забезпечити більш повне засвоєння знань, сформує вміння та навички, які допоможуть майбутнім інженерам вирішувати завдання, пов'язані з їхньою професійною діяльністю.

На жаль, більшість студентів не усвідомлюють повною мірою мети вивчення фундаментальних дисциплін, до яких входить математика, вважаючи їх «непотрібними». Це пов'язано, насамперед, з невмінням застосовувати знання, отримані при вивченні однієї дисципліни, для пояснення процесів, які вивчаються в інших дисциплінах. Адже при вивченні вищої математики досить часто формування математичного апарату не спрямовано на його подальше використання у професійній діяльності. Саме тому актуальною є проблема ефективної реалізації міжпредметних зв'язків у вищих технічних навчальних закладах, оскільки саме ці зв'язки об'єднують у єдине ціле всі структурні елементи навчального процесу (зміст, форми, методи та засоби навчання) та сприяють підвищенню його ефективності.

Проблема реалізації міжпредметних зв'язків здійснюється шляхом вирішення таких завдань, як:

– проведення аналізу програм курсів з метою виявлення випереджаючого, паралельного та наступного викладу тем;

– виявлення вузлових тем курсів, при вивченні яких застосування інтегрованих підходів було б найбільш ефективним;

– виявлення професійно значущих умінь студентів та побудова системи міжпредметних завдань для формування цих умінь;

– встановлення характеру взаємозв'язку курсу математики та курсів природничих, загальнотехнічних та спеціальних фахових дисциплін;

– формулювання критеріїв реалізації перспективних, синхронних та наступних міжпредметних зв'язків під час проведення аудиторних занять. Роз-

робка змісту та методики проведення інтегрованих лекцій та практичних занять на основі цих критеріїв;

– розробка методик створення інтегрованих тематичних тестів для перевірки ефективності реалізації міжпредметних зв'язків курсів.

В [3] сформульовано умови, за яких ці завдання можуть успішно вирішуватись. Досліджено існуючі зв'язки між вищою математикою та природничими і загальнотехнічними дисциплінами, які вивчаються на першому та другому курсах технічного університету. Розглянуто дисципліни електротехніка, опір матеріалів, теоретична механіка, фізика. Співставлено учбові теми вказаних дисциплін з їхнім математичним змістом. Нижче наведено фрагмент таблиці, в якій відображено відповідність між в темою, що вивчається в курсі теоретичної механіки, і її математичним забезпеченням.

| Учбова тема | Математична база |
|---|---|
| Основи статики. | Вектор. Лінійні операції над векторами. Розкладання векторів. Напрямні косинуси. |
| Момент сили. Пара сил. | Лінійні операції над векторами. Векторний добуток. |
| Центр тяжіння. | Інтегрування функцій однієї та кількох змінних. |
| Способи задання руху точки. | Функція. Векторний та параметричний способи задання функції. Годограф вектор-функції. |
| Обертальний рух. Лінійні та кутові швидкості та прискорення. | Диференціювання функцій однієї змінної. Векторний добуток. |
| Динаміка матеріальної точки. | Звичайні диференціальні рівняння першого та другого порядків. Диференціальні рівняння у частинних похідних. |
| Моменти інерції твердого тіла. | Кратні інтеграли. |
| Робота сили, прикладеної до точки. | Скалярний добуток векторів. Криволінійні інтеграли. |
| Потенціальне силове поле. | Скалярні та векторні поля. Градієнт скалярної функції. Ротор та циркуляція векторного поля. |
| Власні, згасаючі, вимушені коливання. | Лінійні диференціальні рівняння другого порядку зі сталими коефіцієнтами. |

Посилення міждисциплінарних зв’язків при вивченні вищої математики та загальнотехнічних і спеціальних фахових дисциплін в технічному університеті є однією з важливих та необхідних умов формування

професійних компетентностей майбутніх інженерів. Систематичне та узгоджене опрацювання задач фізики, механіки, електротехніки та інших загальнотехнічних дисциплін в курсі вищої математики, і навпаки, опрацювання математичних методів при вивченні загальнотехнічних дисциплін, – все це формує компетенції для розв'язання у подальшому професійно орієнтованих задач, і таким чином готує майбутнього фахівця-інженера до викликів сучасного виробництва.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ


1. Richard Van Noorden. Interdisciplinary research by the numbers / Nature. – 2015. – Vol. 525. – P. 306–307.
2. Anpilohov D. Interdisciplinary links in teaching higher mathematics at a technical university. / D. Anpilohov // CAIM-2024, September 19-22, 2024, Oradea, Romania. Book of Abstracts. – 2024. – P. 62.
3. Анпілогов Д. І. Міжпредметні зв'язки при викладанні вищої математики в технічному університеті / Д. І. Анпілогов, Н. В. Сніжко // Наука і техніка сьогодні. Серія «Педагогіка». – 2024. –№ 7(35). – С. 256–264.



УДК 539.3



Антоненко Н.М. [1]

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


## ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є ДО ЗАДАЧІ ТЕРМОПРУЖНОСТІ ДЛЯ ШАРУ НА ЖОРСТКІЙ ПІВПЛОЩИНІ ЗА ВІДСУТНОСТІ ДОТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА ЙОГО МЕЖАХ

Розглядається термопружна деформація пружного однорідного та ізотропного шару, що лежить на абсолютно жорсткій півплощині. Шар характеризується товщиною $h$, коефіцієнтами Ламе $\lambda$ та $\mu$, коефіцієнтом теплопровідності $k_T$ та приведеним коефіцієнтом теплового розширення $\alpha_T = \tilde{\alpha}_T (3\lambda + 2\mu)/(\lambda + 2\mu)$, де $\tilde{\alpha}_T$ – коефіцієнт теплового розширення матеріалу.

Крайові умови задачі:

$$\sigma_z(x,0) = \sigma(x)\,,\ \tau_{xz}(x,0) = 0\,,\ T(x,0) = f(x),$$
$$w(x,h) = 0\,,\ \tau_{xz}(x,h) = 0\,,\ T(x,h) = 0\,.$$

Задача розв'язується за допомогою одномірного інтегрального перетворення Фур'є. Трансформанти компонент термонапружено-деформованого стану шару, які задовольняють заданим крайовим умовам подано у вигляді лінійної комбінації таких функцій:

$$\alpha = \bar{\sigma}(\xi,0),\ \beta = \frac{\mu p \bar{w}(\xi,0)}{1-\nu},\ \eta(\xi) = \bar{T}(\xi,0),\ p\varepsilon(\xi) = \frac{d\bar{T}}{dz}(\xi,0),$$

де $\xi$ – параметр інтегрального перетворення, $p = |\xi|$.

Наприклад, формула для знходження транформанти нормальних напружень в будь-якій точці шару має вигляд:

$$F \cdot \bar{\sigma}_z(\xi,z) = \left[(\tilde{p}C + S)\operatorname{ch} pz - pzS\operatorname{sh} pz\right]\alpha +$$

$$+\left[(-\tilde{p}pzC - pzS)\operatorname{ch} pz + (\tilde{p}C + (1+\tilde{p}pz)S)\operatorname{sh} pz\right]\beta +$$

$$+\alpha_T \mu\left[(\tilde{p}pzC + pzS)\operatorname{ch} pz + (-(1+\tilde{p}pz)S - \tilde{p}C)\operatorname{sh} pz\right]\varepsilon,$$

де $\tilde{p} = ph$, $S = \operatorname{sh}\tilde{p}$, $C = \operatorname{ch}\tilde{p}$, $F = S + \tilde{p}C$, $\varepsilon = -\operatorname{cth}\tilde{p}\eta$,

$$\beta = -\frac{\operatorname{ch}2\tilde{p} - 1}{\operatorname{sh}2\tilde{p} + 2\tilde{p}}\alpha - \frac{\alpha_T \mu(\tilde{p}\operatorname{sh}2\tilde{p} + (1-\tilde{p}\operatorname{cth}\tilde{p})(\operatorname{ch}2\tilde{p} - 1))}{\operatorname{sh}2\tilde{p} + 2\tilde{p}}\eta.$$

Застосувавши до трансформант напружень, переміщень та температури обернене перетворення Фур'є, отримуємо розв'язок поставленої задачі.

УДК 517.9

Онуфрієнко В.М. [1], Антоненко Н.М.[2] , Засовенко А.В.[3], Фасоляк А.В.[2]
[1] д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[3] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ЗАДАЧА ШТУРМА-ЛІУВІЛЛЯ ДЛЯ ДИФЕРІНТЕГРАЛЬНИХ ГРАНИЧНИХ УМОВ ДІРІХЛЕ-ДІРІХЛЕ, ДІРІХЛЕ-НЕЙМАНА, НЕЙМАНА- НЕЙМАНА

Для моделювання поля у фрактально структурованому метаматеріалі спираємось на висновки теорії, що базується на рівняннях Максвелла (Бернуллі) у дробових диферінтегралах з відомими наближеннями, що дають можливість моделювати розв'язки хвильового рівняння в $\alpha$-характеристиках [1].

Дивергентні процеси у фрактальному середовищі призводять до все більшої дисперсності середовищ, а конвергентні - до ущільнення об'єктів. Ці відомі визначення дозволяють моделювати оператор збіжності на фізико-геометричних фрактальних множинах векторів $\vec{P}(P_x, P_y, P_z)$ у вигляді

$$(-1)^{\alpha} div^{\alpha} \vec{P}(P_x, P_y, P_z) = (-1)^{\alpha} \left( \frac{\partial^{\alpha} P_x}{\partial x^{\alpha}} + \frac{\partial^{\alpha} P_y}{\partial y^{\alpha}} + \frac{\partial^{\alpha} P_z}{\partial z^{\alpha}} \right) \qquad (1)$$

Розглянута нами модель елементарного фракталу «джерело-стік» [2] (поняття «стік» (приймає випромінювання), на відміну від «джерела» (випромінює поле), і «джерело-стік» (приймає, та випромінює поле)) використовується нами для постановки і побудови чисельного алгоритму розв‘язування задачі Штурма-Ліувілля на власні функції і числа оператора Гельмгольця для об‘єднання/перетину двох областей. На умовних лівій і правій точках доменних областей формуємо фрактальне покриття у вигляді, що узагальнює у диферінтегральній формі відомі граничні умови Діріхле-Діріхле, Діріхле-Неймана та Неймана-Неймана у термінах $\alpha$ – характеристик.

Побудуємо стоко-джерельну функцію Гріна $G^{(\alpha)}(x,x') = D_x^{\alpha} G(x,x')$ для скалярного рівняння Гельмгольця $(u^{(\alpha)}(x))'' + k^2 u^{(\alpha)}(x) = 0,\ (k \neq 0)$ за відомою класичною схемою, але в термінах $\alpha$ – характеристик $u^{(\alpha)}(x) = D_x^{\alpha} u(x)$ шуканих власних функцій з граничними умовами $u^{(\alpha_1)}(x_1) = 0;\ u^{(\alpha_2)}(x_2) = 0$ на відрізку $x_1 \le x \le x_2$. У такій постановці виникає можливість розгляду задачі з граничними умовами Діріхле-Діріхле (скейлінгові показники порядку похідних: $\alpha_1 = 0; \alpha_2 = 0$), Діріхле-Неймана ($\alpha_1 = 0; \alpha_2 = 1$ або $\alpha_1 = 1; \alpha_2 = 0$) та Неймана- Неймана ($\alpha_1 = 1; \alpha_2 = 1$).

Для умов типу Діріхле-Діріхле доменної області у вигляді відрізка $0 \le x \le l$ маємо функцію Гріна

$$G^{(\alpha)}(x,x') = D_x^{\alpha} G(x,x') = \begin{cases} \dfrac{\sin k(x'-l)\sin kl}{k \sin k}, & 0 \le x \le x'; \\ \dfrac{\sin k(x')\sin k(x-l)}{k \sin k}, & x' \le x \le l. \end{cases} \qquad (2)$$

Для двох виділених доменних областей (відрізків $0 \le x \le b$, $a \le x \le l$, $a < b$), що об‘єднанням/перетином утворюють область $0 \le x \le l$, застосовуємо другу формулу Гріна та визначаємо розв‘язки $u_k(x)$ в $k-$х доменних областях через граничні значення на межах $S_k$:

$$u_k(x) = \int_{S_k} u_k(x,x'\big|_{S_k}) dG_k(x,x') \equiv L_k(u_k, dG_k) \qquad (3)$$

Через диференціально-інтегральні оператори $L_k(u_k, dG_k)$, які зв'язують поля в доменних областях 1 та 2, отримуємо систему диференціально-інтегральних рівнянь

$$\begin{aligned} u_1^{(\alpha_1)} &= L_{1,2}\left(u_2^{(\alpha_2)} d^{(\alpha_1)} G_1\right), \\ u_2^{(\alpha_2)} &= -L_{2,1}\left(u_1^{(\alpha_1)} d^{(\alpha_2)} G_2\right), \end{aligned} \tag{4}$$

звідки і визначаються власні функції та числа як окремих складових доменів, так і усієї області, що є їх об‘єднанням/добутком.

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

Результати моделювання для нефрактальних границь областей збігаються з відомими даними [2].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Онуфрієнко В. М. Потенціали фрактальних зарядів і струмів у штучному середовищі / В. М. Онуфрієнко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2004. – №1(1). – С. 18–21.

2. Онуфрієнко В. М. Диференціальна модель фрактального хвилеводного трансформатора / В. М. Онуфрієнко, І. М. Килимник, Т. І. Слюсарова, І. І. Зіненко // Grail of Science. – 2024. – (36). – С. 282–286. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.16.02.2024.046.

УДК 539.312
Фасоляк А.В.[1]
[1] канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## НЕСТАЦІОНАРНА ДИНАМІКА ПРУЖНОГО СЕРЕДОВИЩА З ЦИЛІНДРИЧНОЮ ПОРОЖНИНОЮ ТА ПОВЕРХНЕЮ, ПІДКРІПЛЕНИМИ ТОНКОСТІННИМИ СТРУКТУРАМИ

Розглядається необмежене пружне однорідне середовище, яке віднесено до декартової системи координат. Припускається, що середовище має поверхню, яка задається площиною, паралельною координатній площині Ozx. Вздовж описаної поверхні розташована тонка пружна плита, яка жорстко зчеплена з середовищем. Нехай середовище містить циліндричну порожнину, вісь якої співпадає з віссю Oz. Дана порожнина підкріплена тонкою пружною оболонкою. Контакт між оболонкою та середовищем припускаємо жорстким. Відстань від осі порожнини до поверхні контакту середовища та плити в

межах від двох до шести радіусів порожнини. Вивчається випадок, у якому до внутрішньої поверхні оболонки прикладене динамічне навантаження, яке залежить від часу як одинична функція Хевісайда, а поверхня плити вільна від напружень. Також використовується припущення, що навантаження не залежить від осьової координати (Oz), тобто задача зводиться до плоскої задачі теорії пружності.

Для розв'язку задачі застосуємо метод скінченних елементів (МСЕ). Дискретизація області проводиться шляхом розбиття її на трикутники. В якості скінченно-елементної схеми для оболонки та середовища обираємо трикутний елемент із шістьма ступенями свободи. Плита моделюється одновимірними елементами, які ґрунтуються на класичній теорії тонких пластин (елемент має чотири ступені свободи). На основі отриманої дискретизації будуємо матриці жорсткості та мас. Для розв'язання динамічної задачі використовуємо θ-метод Вілсона, який дозволяє звести диференціальне матричне рівняння до послідовності квазістичних матричних рівнянь, для розв'язку яких використовується метод спряжених градієнтів.

Досліджено вплив глибини розташування оболонки на динамічний НДС розглянутої механічної системи. Проведено порівняння отриманих результатів з аналогічними, отриманими у роботі [1], де розглянута механічна система з вільною поверхнею. Встановлено, що при глибині залягання оболонки понад чотири радіуси оболонки взаємний вплив є незначним, тому без значної втрати точності можна розглядати задачу для необмеженого середовища з порожниною [2].

Таким чином, отримано та проаналізовано розв'язок динамічної задачі для пружного середовища з циліндричною порожниною та поверхнею, що підкріплені тонкостінними структурами. Отримані результати і запропоновані алгоритми можуть використовуватись при динамічному розрахунку підземних споруд, зокрема трубопроводів та тунелів неглибокого залягання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пожуєв В. І. Нестаціонарна деформація циліндричної оболонки у пружному півпросторі з вільною поверхнею / В. І. Пожуєв, А. В. Пожуєв, А. В. Фасоляк // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – № 1. – С. 119–126.

2. Пожуєв А. В. Нестаціонарна невісесиметрична деформація циліндричної оболонки у пружному просторі під дією рухомих поверхневих навантажень / А. В. Пожуєв, А. В. Фасоляк // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – № 2. – С. 108–114.

УДК 631.316.022
Шаніна З.М. [1], Засовенко А.В. [1]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

# ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОБОВОЇ ПОВЕРХНІ ЗУБЧАСТОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ

Рівняння поверхні зубчастого робочого органу подається у вигляді

$$y_i = Ax_i$$

де $x_i$ – координата точок логарифмічної спіралі поверхні зуба, що виробляє ($M_i$);

$y_i$ – координата точок на западині або виступі кромки ріжучого леза ($N_i$).

Тоді рівняння поверхні робочого органу у матричній формі буде представлено як:

$$\begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 & \vdots & \Delta x_1^{N_i} \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & \vdots & \Delta x_2^{N_i} \\ 0 & 0 & 1 & \vdots & \Delta x_3^{N_i} \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & & \ldots\ldots \\ 0 & 0 & 0 & & 1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} x_1^{M_i} \\ x_2^{M_i} \\ x_3^{M_i} \\ 1 \end{vmatrix} \qquad (1)$$

Отримана математична модель (1) для опису поверхні зубчастого робочого органу дозволяє для різних умов з урахуванням глибини обробки, агротехнічних вимог, фізико-механічних властивостей ґрунту та геометрії ріжучої кромки отримати сімейство зубчастих робочих органів, які будуть працездатними у цих умовах. Тобто форма робочої поверхні змінюється при встановленні функціональної залежності параметрів $k, \mu, \theta, \psi$:

$k$ – коефіцієнт $k = \dfrac{1}{\cos\alpha}$, вводиться у зв'язку з подовженням логарифмічної спіралі;

$\mu$ – коефіцієнт стиснення логарифмічної спіралі;

$\theta$ – кут нижньої частини бокового профілю;

$\psi$ – поточний кут логарифмічної спіралі.

Елементи матриці (1) можуть бути функціями деякого змінного $t$. Щоб підкреслити функціональну залежність $A$ від $t$, будемо позначати цю матрицю як $A(t)$, а її загальний елемент $a_{ij}(t)$.

Необхідність диференціювання матриць виникає для визначення локальних властивостей поверхні.

Нехай функції $a_{ij}(t)$ безперервно диференційовані на проміжку $(a;b)$. Тоді під похідною матриці $A(t)$ розумітимемо матрицю, отриману з вихідної матриці шляхом заміни елементів $a_{ij}(t)$ похідними $\frac{da_{ij}(t)}{dt}$, тобто $\frac{A(t)}{dt} = \left(\frac{da_{ij}(t)}{dt}\right)$.

Похідна матриці $A$ визначиться як

$$\frac{dA}{dt} = \begin{vmatrix} \frac{da_{11}}{dt} & \frac{da_{12}}{dt} & \frac{da_{13}}{dt} & \vdots & \frac{da_{14}}{dt} \\ \frac{da_{21}}{dt} & \frac{da_{22}}{dt} & \frac{da_{23}}{dt} & \vdots & \frac{da_{24}}{dt} \\ \frac{da_{31}}{dt} & \frac{da_{32}}{dt} & \frac{da_{33}}{dt} & \vdots & \frac{da_{34}}{dt} \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & & \ldots\ldots \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \end{vmatrix}$$

Отримана матриця дозволяє досліджувати диференціальні характеристики у будь-якій точці поверхні зубчастого робочого органу.

УДК 519.25
Нечипоренко Н.О. [1]
[1] канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ОЦІНЮВАННЯ ПЕРІОДУ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Різноманітні дані в техніці, економіці, соціології, медицині та інших сферах часто надходять у вигляді часових рядів типу

$$y_t = x_t + \varepsilon_t,$$

де $x_t$ – детермінована періодична функція часу $t$, тобто $x_t = x_{t+T}$, де $T$ – довжина періоду (мінімальна з можливих), а $\varepsilon_t$ – випадкові погрішності, що спотворюють періодичний сигнал. Потрібно оцінити (мінімальну) довжину періоду $T = T0$ і періодичну складову $x_t$. При цьому не передбачається, що функція $x(t)$ входить у яке-небудь параметричне сімейство, наприклад, кін-

цевих сум синусів і косинусів, тобто розглядається задача непараметричного оцінювання (мінімальної) довжини періоду й періодичної складовій сигналу.

Для знаходження довжини циклу зазвичай послідовно обчислюють коефіцієнти автокореляції відхилень від тренду різних порядків, тобто. з лагом 1, 2, 3 ,.. періодів часу. Найбільший за абсолютною величиною коефіцієнт автокореляції відзначить довжину циклу.

Розглянемо інший підхід до встановлення періоду часового ряду.

Нехай розглянуті функції $x_t, y_t, \varepsilon_t$ визначені на відрізку [0; $A$]. При фіксованому $T$ розглянемо "шматки" сигналу $y_t$ на послідовних відрізках довжини $T$, тобто на відрізках [$0;T$], [$T;2T$], [$2T;3T$],.... Зручно ввести послідовність функцій на відрізку [$0;T$], отриману переміщенням цих шматків до початку координат: $y_{1t} = y_t, y_{2t} = y_{t+T}, y_{3t} = y_{t+2T}, \ldots$ .

Усі вони визначені на відрізку [$0;T$]. Число цих функцій дорівнює числу повних періодів довжини $T$, що укладаються на відрізку [0;$A$].

Для оцінювання $T$ вводять два показники:

$F(T;Y)=F(T; y_{1t}, y_{2t}, y_{3t}, \ldots)$ -показник розкиду множини функцій $\{y_{1t}, y_{2t}, y_{3t}, \ldots\}$ на відрізку [0;$T$];

$G(T;Y)=G(T,y_{cp}(t))$ - показник розмаху функції $y_{cp}(t)$ на відрізку [0;$T$].

Символ $Y$ означає тут, що показники розкиду й розмаху будуються по функції $y_t$, а функція $y_{cp}(t)$ –це середнє арифметичне функцій $\{y_{1t}, y_{2t}, y_{3t}, \ldots\}$.

Нехай $k$=[$A/T$]. В якості показника розкиду використовувались два різних функціонала.

Функціонал

$$F_1(T;Y) = \max_t \left| y_{it} - y_{jt} \right|, \quad i,j = 1,2,\ldots,k, \quad t = 0,1,..T ,$$

він задає максимальний розкид між значеннями функції.

Функціонал

$$F_2(T;Y) = \max_t \left| y_{it} - y_{cp}(t) \right|, \quad i = 1,2,\ldots,k, \quad t = 0,1,..T ,$$

він буде враховувати не довільні відхилення, а тільки відхилення від " середньої функції".

Показники розмаху також можна ввести різним чином. Розглядались такі:

$$G_1(T;Y) = \max_{t,s} \left| y_{cp}(t) - y_{cp}(s) \right|, \quad t = 0,1,\ldots,T, \quad s = 0,1,2,\ldots,T ;$$

$$G_2(T;Y) = \sum_{t=0}^{T} \sum_{s=0}^{T} \left( y_{cp}(t) - y_{cp}(s) \right)^2 .$$

Список показників розкиду, як і список показників розмаху, може бути значно розширений.

Визначення періоду $T$ зводиться до розв'язання таких задач оптимізації зазначених вище функціоналів:

$$\min_{T} \frac{F_i(T;Y)}{G_j(T;Y)}, \quad i = 1,2,\ldots, \quad j = 1,2,\ldots .$$

Чисельна мінімізація виконувалась перебором зростаючих значень періоду від 1 до значення $T$, при якому вперше досягається мінімум.

Для оцінки якості алгоритму були проведені розрахунки за реальними та змодельованими даними, що показали, що алгоритми здатні оцінювати довжину періоду та відновлювати періодичну складову часового ряду достатньо точно з практичної точки зору. Порівняння різних функціоналів поміж собою показало близькі результати. Одночасне використання всіх або частини функціоналів дозволило встановити чутливість оцінок до вибору методу оцінювання, знайти інтервал їх розкиду, який виявився в межах допустимої помилки.

УДК 539.3
Левицька Т.І. [1], Пожуєва І.С. [1]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ МІНІМАЛЬНОЇ МАСИ КОЛОН, ЯКІ ПІДПИРАЮТЬ ОБОЛОНКУ

Розглядувана задача являє собою частинний клас задач нелінійного програмування. Поведінка оболонки, яка підперта колонами може бути описана системою рівнянь стану оболонки під дією реакцій у місцях стику колон та оболонки. Тому для побудови схеми оптимального розрахунку маси колон можна виділити змінні стану та змінні проектування. Змінні стану, при заданих проектувальником змінних проектування, можна визначити з сумісного розглядання взаємодії оболонки та колон.

При розгляданні задачі оптимального проектування будемо вважати , що відомі функція Гріна $w = G(x,\xi)$ прогину оболонки під дією зосередженого навантаження та прогин оболонки $w = w_0(x)$ під дією розподіленого навантаження , де $x = (x_1, x_2)$ , $\xi = (\xi_1, \xi_2)$ - координати точок.

Тоді з умов рівності переміщень точок контакту оболонки та колон будемо мати систему рівнянь

$$\frac{R_i}{E_i S_i} l_i + \sum_{j=1}^{n} R_j G(x^{(i)}, x^{(j)}) = w_0(x^{(i)}) \quad , (i = 1,\ldots,n) \tag{1}$$

де $n$ – кількість колон, $x^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$ – координати основ колон, $R_i$ – реакція колони у верхній точці дотику, $E_i$ – модуль Юнга, $S_i$ – площа поперечного перерізу, $l_i$ – довжина колони.

Накладемо обмеження на реакції, напруги та стійкість колон

$$\begin{aligned} & R_i \geq 0 \\ & \frac{R_i}{S_i} - \sigma_{i\max} \leq 0 \qquad (i = 1,\ldots,n) \\ & R_i - \frac{\pi^2 E_i I_i}{l_i^2} \leq 0 \end{aligned} \tag{2}$$

Розглянемо випадок коли колони являють собою трубчасті стержні радіуса $r_i$ і товщиною $h_i$, яка припускається малою величиною. Для такого перерізу $I_i$ можна обчислити за формулою $I_i = \pi r_i^3 h_i$. Функцією цілі, яку треба мінімізувати є маса всіх колон

$$\phi_0 = \sum_{i=1}^{n} \rho_i S_i l_i \tag{3}$$

де $\rho_i$ - густина матеріалу колон.

Введемо позначення $z_i = \frac{R_i}{S_i}; b_i = S_i$. Тоді вирази (1), (2), (3) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} & h(z,b) = 0 \\ & \phi(z,b) \leq 0 \quad , \\ & \phi_0 = \sum_{i=1}^{n} \rho_i l_i b_i \end{aligned} \tag{4}$$

де $z^T = (z_1, z_2, \ldots, z_n)$ - змінні стану, $b^T = (b_1, b_2, \ldots, b_n)$ - змінні проектування.

Функції $h(z,b)$, $\phi(z,b)$ та $\phi_0$ мають вигляд

$$h(z,b)=\begin{cases} z_1(\frac{l_1}{E_1}+b_1G_{11})+z_2b_2G_{12}+\ldots+z_nb_nG_{1n}-w_{01} \\ z_1b_1G_{21}+z_2(\frac{l_2}{E_2}+b_2G_{22})+\ldots+z_nb_nG_{2n}-w_{02} \\ - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \\ z_1b_1G_{n1}+z_2b_2G_{n2}+\ldots+z_n(\frac{l_n}{E_n}+b_nG_{nn})-w_{0n} \end{cases}, \ \phi(z,b)=\begin{cases} -z_1 \\ \vdots \\ -z_n \\ z_1-\sigma_{1\max} \\ \vdots \\ z_n-\sigma_{n\max} \\ z_1-\beta_1b_1^2 \\ \vdots \\ z_n-\beta_nb_n^2 \end{cases},$$

$$\phi_0=\sum_{i=1}^{n}c_ib_i\ , \tag{5}$$

де $\beta_i=\dfrac{E_i}{8h_i^2l_i^2}$, $c_i=\rho_il_i$.

Використання методу проекції градієнта дає можливість в ітеративному режимі будувати наближення до оптимального проекту. Для розглядуваної схеми обчислень слід знайти матрицю $J=\dfrac{\partial h}{\partial z}$, яка з урахуванням (5) буде мати вигляд

$$J=\begin{pmatrix} \frac{l_1}{E_1}+b_1G_{11} & b_2G_{12} & \ldots & b_nG_{1n} \\ b_1G_{21} & \frac{l_2}{E_2}+b_2G_{22} & \ldots & b_nG_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_1G_{n1} & b_2G_{n2} & \ldots & \frac{l_n}{E_n}+b_nG_{nn} \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Далі треба скласти вектор з функцій набору $\phi(z,b)$ які задовольняють так званим $\varepsilon$ - активним обмеженням

$$\widetilde{\phi}=[\phi_i]\,,(\phi_i\geq-\varepsilon)\ .$$

Для подальшого формування алгоритму знаходимо $l^0$, $l^i$.

$$l^{0T} = \left[\frac{\partial \phi_0}{\partial b}\right]^T = (c_1, c_2, \ldots, c_n) \;\; ; \;\; l^i = \left[\frac{\partial \phi_i}{\partial b} + \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial b}\right]^T = \frac{\partial \phi_i^T}{\partial b} - \frac{\partial h^T}{\partial b} \cdot J^{-1} \cdot \frac{\partial \phi_i^T}{\partial z} \; .$$

При цьому вважається, що система векторів $l^i$, які є стовпцями матриці $\widetilde{l}$, лінійно незалежні.

Важливу роль відіграють матриці $M_{\phi\phi}$ та $M_{\phi\phi_0}$ які обчислюються за формулами

$$M_{\phi\phi} = \widetilde{l}^T \cdot \widetilde{l} \;\; ; \;\; M_{\phi\phi_0} = \widetilde{l}^T \cdot l^0 \; .$$

З їх допомогою знаходяться вектори $\mu_1, \mu_2$, компоненти яких є розв'язками двох систем лінійних рівнянь

$$M_{\phi\phi} \cdot \mu_1 = -M_{\phi\phi_0} \, , \qquad M_{\phi\phi} \cdot \mu_2 = -\Delta\widetilde{\phi} \; .$$

Векторні величини $\mu_1, \mu_2$ використовуються для знаходження $\delta b^1, \delta b^2$.

$$\delta b_1 = l^0 + \widetilde{l} \cdot \mu_1 \, , \quad \delta b^2 = -\widetilde{l} \cdot \mu_2 \; .$$

Величину $\gamma$, яка входить в формулу для обчислення вектора $\mu$

$$\mu = \mu_1 + 2\gamma\mu_2 \, ,$$

визначимо із співвідношення

$$\gamma = -l^{0^T} \cdot \delta b^1 / (2 \cdot \Delta\phi_0) \; ,$$

де $\Delta\phi_0$ - від'ємна величина , яка задає зменшення величини $\phi_0$ на 3-20 % тобто її можна обчислювати за формулою

$$\Delta\phi_0 = -k \cdot \phi_0 / 100 \, ,$$

де *k* потрібний процент зменшення величини $\phi_0$.

Далі треба перевірити компоненти вектора $\mu$. Якщо якась компонента є від'ємною, то відповідне обмеження $\phi_i$ виключається із розглядання і обчислення починається з початку з тим же самим вектором змінних проектування $b^0$. По знайдених $\delta b^1, \delta b^2$ підраховується вектор

$$\delta b = -\frac{1}{2\gamma}\delta b^1 + \delta b^2 \ .$$

Поліпшене наближення для змінних проектування визначається таким чином

$$b^1 = b^0 + \delta b \, .$$

Якщо всі обмеження виконуються і величина $\left(\sum_{i=1}^{n}\left(\delta b_i^1\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}$ досить мала то робота алгоритму закінчується.

УДК 539.3
Засовенко А.В. [1]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКІСНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ДВОХ БАЛОК ПІД ДІЄЮ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО УДАРНИКА

Велику роль у сучасній техніці відіграють контактні взаємодії стержньових конструктивних елементів. Розглядом цієї проблеми займались вже довгий час та їй присвячено багато досліджень. Розрахунки таких задач, як правило, проводилися аналітичними методами, що ґрунтувалися зазвичай або на «стаціонарному» розв'язані, або у вигляді рядів Фур'є. Важливим є питання дослідження, на етапах проектування і виготовлення елементів конструкцій, їх міцності і стійкості під дією ударних навантажень.

Для аналізу швидкісно-хвильового деформування багатошарових елементів у пружно-пластичній стадії при контактному ударному навантаженні, застосовано підхід заснований на узагальненні сітково-характеристичного методу та ітераційного підходу [1].

Розглядається елемент, що складається з двох шарнірно-опертих балок з прямокутними поперечними перерізами. Ударник моделюється як пружно-пластичне тіло. При моделюванні використовується динамічний варіант деформаційної теорії пластичності, в якій враховуються залежності інтенсивностей напружень від інтенсивностей деформацій та їх швидкостей. При цьому враховуються динамічні властивості різних матеріалів кожної балки. Проблема є геометрично і фізично нелінійною. Виявляються особливості динамічного напружено-деформованого стану кожного елемента конструкції. Отримані результати не суперечать очікуваної фізичної картини поширення хвиль в складених стержньових конструкціях. Даний підхід дозволяє визна-

чати шукані розв'язки для розглянутих елементів повністю через всі геометричні і фізико-механічні параметри досліджуваної стержньової конструкції.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Antonenko N. M. Dynamic deformation of the fairing under the action of an external distributed load / N. M. Antonenko, D. V. Danylchenko, A. V. Zasovenko // International Journal of Advanced Engineering and Management Research (IJAEMR). – 2024. – Vol. 9, Issue 3. – P. 89–98. doi.org/ 10.51505/ ijaemr.2024.9307

УДК 539.3:621.39
Онуфрієнко В.М.[1], Слюсарова Т.І. [2], Козак В.С.[3]
[1] д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[3] студ. гр. М-314 НУ «Запорізька політехніка»

## ДИФЕРІНТЕГРАЛЬНА МОДЕЛЬ МЕМРИСТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ІМПЕДАНСУ ФРАКТАЛЬНОКОНФІГУРОВАНОГО МЕТАМАТЕРІАЛУ

Необхідність побудови механічних моделей для метаматеріалів обумовлена незастосовністю звичайних рівнянь пружності і в‘язкості для такої фізико-геометричної конфігурації тіл, поведінка яких в одних випадках моделюється засобами теорії пружних тіл, а в інших - в‘язких.

Механічна поведінка метаматеріалів не задовольняється ні виконанням закону Гука $\sigma = E \cdot \varepsilon$, ні закону Ньютона $\sigma = \eta \cdot d\varepsilon / dt$, де $\sigma$ – напруга, $\varepsilon$ – деформація, $E$ – модуль пружності, $\eta$ – коефіцієнт в‘язкості. Найпростіші механічні моделі в‘язко-пружного матеріалу у вигляді послідовного з‘єднання пружного елемента (пружини) і в‘язкого елемента (демпфера) (модель Максвелла) та у вигляді паралельного з‘єднання пружного елемента і в‘язкого елементів (модель Фойгта) узагальнюються стандартною математичною моделлю в‘язко-пружного тіла [1] з дробовими похідними у вигляді $\sigma(t) + \sum_{k=1}^{n} a_k D^{\alpha_k} \sigma(t) = E_0 \varepsilon(t) + \sum_{k=1}^{m} b_k D^{\beta_k} \varepsilon(t)$, де $\sigma = \sigma(t)$ та $\varepsilon = \varepsilon(t)$ – напруга і деформація тіла в момент часу $t$; $a_k, b_k, E_0$ - величині, що задаються; $D^{\alpha}$ і $D^{\beta}$ - оператори дробового диференціювання. Застосування емпіричної моделі Капуто і Майнарді [2] найбільш точно описує поведінку реальних

в‘язко-пружних матеріалів і асоціюється з дробовими аналогами моделей Максвелла, Фойгта і Кельвіна.

Історично індуктор $L$ був відомим пристроєм третього роду. Для метаматеріального фрактально конфігурованого середовища з виявленими магнітними властивостями відгук на зовнішні збурення вимагає введення в механічний імпеданс четвертої складової мемристичного типу, що спонукало висуненню гіпотези про мемристор $M$ .

Безмасовий механічний досконалий резистор пам‘яті є точним механічним аналогом $M$ і був знайдений до введення інертної маси, яка є аналогом реального індукторного пристрою $L$ .

Мемристор – це двоконтактний пристрій, опір якого залежить за законом Ома від однієї або декількох внутрішніх змінних стану пристрою. Вперше його математично описав теоретик Леон Чуа [3]. Опір мемристора залежить від усієї минулої форми сигналу прикладеної напруги або струму через мемристор. Завдяки мемристору можна досягти функціональності, яка неможлива за допомогою існуючих елементів схеми.

Теорії механічних кіл з інертною масою $m$ і без неї є за своєю конструкцією математично точними аналогами теорій електричних кіл з індукованим магнетизмом і без нього.

Схему механічного мемристора Бернуллі розглядаємо далі для вводу фрактально конфігурованого елемента, що керується сигналом управління $q(t)$, напругою $v(t)$ і вихідним сигналом та мемристансом $M(q(t))$:

$$\frac{d^{\alpha}q(t)}{dt^{\alpha}} = \frac{v(t)}{M(q(t),\alpha)};\ D^{\alpha}i(t) = \frac{d^{\alpha}q(t)}{dt^{\alpha}}. \qquad (1)$$

В теорії електричних кіл з індукованим магнетизмом у відповідності до закону електромагнітної індукції Фарадея і Максвелла вводиться у розгляд коефіцієнт взаємоіндукції контурів $M = \frac{E}{I}$, як відношення е.р.с. у контурі до струму. У межах схеми Бернуллі для визначення взаємоіндукції між фрактально конфігурованими контурами (елементами) з (1) маємо зв‘язок $v(t,\alpha) = D^{\alpha}i(t)M(q(t),\alpha)$.

Використанням закону повного струму у фрактально конфігурованих провідних множинах [4], що випливає з розгляду закону Біо-Савара-Лапласа, для фрактальних контурів з діаметрами $\delta$ і розташованими на відстані $h$ один від одного отримуємо формулу для обчислення коефіцієнта взаємоіндукції

$$M = R(\alpha)\frac{\delta^{1-\alpha}}{1-\alpha}\left[1 - 2\left(1+\frac{h}{\delta}\right)^{1-\alpha} + \left(1+\frac{2h}{\delta}\right)^{1-\alpha}\right]. \qquad (2)$$

Розрахунки за формулою (2) збігаються з експериментальними даними для значень скейлінгового показника $\alpha = 2$. Порівняння даних обчислення за формулою (2) з різними значеннями скейлінга і збіг з експериментальними для кожного окремого випадку надає можливості оцінювати фрактальні властивості множин зарядів і струмів. Механічна інтерпретація отриманих залежностей надає можливостей для оцінки механічного імпедансу метаматеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ


1. Bagley R. L. A theoretical basis for the application of fractional calculus to viscoelasticity / R. L. Bagley, P. J. Torvik // Journal of Rheology. – 1983. – No 27. – P. 201–210. doi: 10.1122/1.549724.
2. Caputo M. A new diddipation model based on memory mechanism / M. Caputo, F. Mainardi // Pure and applied geophysics. –1971. – Vol. 91. – P. 134–137.
3. Chua L. O. Memristor- the missing circuit element / L. O. Chua // IEEE Trans. Circuit Theory. – 1971. – Vol. CT-18. – No 5. – P. 507–519.
4. Onufriyenko V. M. Physical and Geometric Interpretation of $\alpha$-Characteristics / V. M. Onufriyenko // Telecommunication and Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53, No 4. – P. 136–139.



УДК 621.391


Сніжко Н.В.[1], Гаврик В.М.[2]
[1] канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. ІФ-514 НУ «Запорізька політехніка»


## ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ЧИСЛЕННЯ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ДЕЯКИХ ЗАДАЧ ГІДРОСТАТИКИ

Інтегральне числення дає математичний апарат для моделювання та дослідження фізичних процесів. Визначення інтегральної суми дозволяє використовувати поняття визначеного інтеграла при розв'язанні фізичних задач. Його застосування засноване на тому, що будь-яка фізична величина, що змінюється, може бути інтерпретована як неперервна, прирости якої досить близькі до нуля.

Розглядаються фізичні задачі гідростатики, розв'язки яких отримані із застосуванням методів інтегрального числення.

1. Визначити тиск рідини на занурену в неї вертикальну пластину-півколо, якщо його радіус $R$, а центр знаходиться на вільній поверхні рідини (рис. 1).

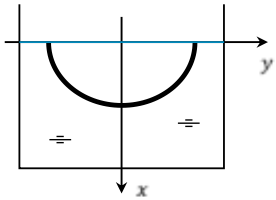



Рисунок 1 – Пластина, занурена у рідину.

Початок системи координат розташований у центрі півкола, напрям осей показано на рис. 1. Тиск рідини з питомою вагою $\gamma$ на один бік зануреної в неї вертикальної пластини, якщо відстань $x$ точок пластини до рівня рідини змінюється від $a$ до $b$, визначається за формулою $\int_a^b \gamma x y dx$, де $y$ – довжина горизонтального перерізу пластини. В даному випадку пластина обмежена лініями $x = 0$, $x = R$, $y_{1,2} = \pm\sqrt{R^2 - x^2}$. Одержуємо

$$P = \int_0^R \gamma\left(\sqrt{R^2 - x^2} - \left(-\sqrt{R^2 - x^2}\right)\right) x dx = 2\gamma \int_0^R x\sqrt{R^2 - x^2}\, dx = \tfrac{2}{3}\gamma R^3 .$$

Таким чином, за допомогою інтегрального числення ми отримали формулу визначення тиску рідини на вертикальну пластину вказаної форми.

2. Розглянемо задачу про витікання рідини з резервуару під впливом сили тяжіння. Нехай є резервуар із початковим рівнем рідини $h_0$ із невеликим отвором поблизу дна. Потрібно знайти, як рівень змінюється згодом через витікання рідини через отвір, та знайти час, за який рідина повністю витече з резервуару.

Рівняння Бернуллі для рівня води $h(t)$ у кожен момент часу $t$ має вигляд $p + g\rho h(t) = p + \rho\dfrac{v^2}{2}$, звідки $v = \sqrt{2gh(t)}$, де $v$ –швидкість витікання рідини, $\rho$ – питома вага рідини, $p$ – тиск.

Умова збереження об'єму рідини, що витікає за час $dt$: $S_1 dh = -S_0 v(t) dt$, де $S_0$ – площа отвору, $S_1$ – площа дна резервуару, $dh$ – зниження рівня води протягом часу $dt$. Ділячи обидві частини на $S_1$, отри-

муємо диференціальне співвідношення $dh = -\alpha\sqrt{h}dt$, або $\frac{dh}{\sqrt{h}} = -\alpha dt$, де $\alpha = \frac{S_0}{S_1}\sqrt{2g}$. Інтегруємо обидві сторони цього співвідношення від $t = 0$ до довільного $t$.

$$\int_{h_0}^{h(t)} \frac{dh}{\sqrt{h}} = 2\left(\sqrt{h(t)} - \sqrt{h_0}\right), \int_0^t (-\alpha)dt = -\alpha t,$$

тобто $2\left(\sqrt{h(t)} - \sqrt{h_0}\right) = -\alpha t$. Одержали $h(t) = \left(\sqrt{h_0} - \frac{\alpha t}{2}\right)^2$. Ця формула дає рівень рідини в резервуарі в довільний момент часу $t$.

З одержаної формули випливає, що витікання рідини з резервуару відбувається за скінченний час $\tau = \sqrt{2\frac{h_0}{g}} \cdot \frac{S_1}{S_0}$.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анпілогов Д. І. Інтегральне числення / Д. І. Анпілогов, Н. В. Сніжко // навч. посібник. – Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2021. – 254 с.

2. Загальний курс фізики : у 3 т. 2-ге вид. випр. / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук. – Київ : Техніка, 2006. – 536 с.

УДК 004.04; 512.62

Пожуєва І.С. [1], Шабля Д.О. [2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. КНТ-514 НУ «Запорізька політехніка»

## ВИКОРИСТАННЯ МАТРИЦЬ У ШИФРІ ХІЛЛА

На сьогоднішній день є дуже багато онлайн-сервісів, яким ми довіряємо свої персональні дані. Але доступ до цих даних мають мати тільки авторизовані особи. Саме для цього і використовується шифрування. Шифрування - це процес кодування інформації з метою запобігання несанкціонованого доступу. Є дуже багато способів за допомогою яких можна зашифрувати дані, але у цій доповіді ми розглянемо саме шифр Хілла. Проаналізуємо як він працює: як закодувати та декодувати інформацію та як у ньому використовуються матриці.

Почнемо з того, що дамо визначення шифру Хілла. Це симетричний алгоритм шифрування, який використовує лінійну алгебру та матричні перетворення. Він ґрунтується на множенні вектора відкритого тексту на ключову матрицю. Щоб наглядно показати як працює шифр Хілла, ми будемо використовувати українську абетку та спробуємо зашифрувати слово “МОРОЗИВО”. Пронумеруємо кожну літеру українського алфавіту, це буде потрібно у процесі шифрування та дешифрування повідомлення у шифрі Хілла: А:=0, Б:=1, В:=2, Г:=3, Ґ:=4, Д:=5, Е:=6, Є:=7, Ж:=8, З:=9, И:=10, І:=11, Ї:=12, Й:=13, К:=14, Л:=15, М:=16, Н:=17, О:=18, П:=19, Р:=20, С:=21, Т:=22, У:=23, Ф:=24, Х:=25, Ц:=26, Ч:=27, Ш:=28, Щ:=29, Ь:=30, Ю:=31, Я:=32.

Оберемо ключову матрицю, яка буде відповідати такій умові: НСД (|К|; n) = 1; де К – визначник матриці-ключа, який не дорівнює 0. Як приклад, створимо ключову матрицю розміром 3х3:

$$K = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 3 & 7 & 8 \\ 5 & 8 & 9 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Візьмемо слово "МОРОЗИВО", яке має 8 літер, тому доповнимо його символом "А" до 9 літер і отримаємо "МОРОЗИВОА". Тепер перетворимо літери у відповідні числа: М:=16, О:=18, Р:=20, О:=18, З:=9, И:=10, В:=2, О:=18, А:=0. Розіб’ємо на вектори по 3 елементи:

$$\begin{bmatrix} 16 \\ 18 \\ 20 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 18 \\ 9 \\ 10 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2 \\ 18 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

Виконаємо шифрування кожного елемента за формулою: $E(\overline{x})=k*x$, де $\overline{x}$ - вектор стовбець відкритого тексту, k – ключ-матриця. Множимо кожен вектор на матрицю К, використовуючи модуль 33.

Перший вектор (16,18,20):

$$\begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 3 & 7 & 8 \\ 5 & 8 & 9 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 16 \\ 18 \\ 20 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 31 \\ 4 \\ 8 \end{bmatrix} \tag{3}$$

1. (2*16+5*18+7*20) mod 33=31
2. (3*16+7*18+8*20) mod 33=4
3. (5*16+8*18+9*20) mod 33=8

Використовуючи те, що ми пронумерували літери української абетки, перетворюємо отримані числа у літери: 31, 4, 8 - Ю, Ґ, Ж.

Другий вектор (18,9,10):

$$\begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 3 & 7 & 8 \\ 5 & 8 & 9 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 18 \\ 9 \\ 10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19 \\ 32 \\ 21 \end{bmatrix} \tag{4}$$

1. (2*18+5*9+7*10) mod 33=19
2. (3*18+7*9+8*10) mod 33=32
3. (5*18+8*9+9*10) mod 33=21

Перетворюємо отримані числа у букви: 19, 32, 21 - П, Я, С.

Третій вектор (2,18,0):

$$\begin{bmatrix} 2 & 5 & 7 \\ 3 & 7 & 8 \\ 5 & 8 & 9 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 2 \\ 18 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 28 \\ 0 \\ 22 \end{bmatrix} \tag{5}$$

1. (2*2+5*18+7*0) mod 33=28
2. (3*2+7*18+8*0) mod 33=0
3. (5*2+8*18+9*0) mod 33=22

Перетворюємо отримані числа у букви: 28, 0, 22 - Ш, А, Т.

У результаті шифрування отримуємо: "ЮҐЖПЯСШАТ".

Тепер дешифруємо отримане повідомлення. Для цього скористаємося формулою: $D(\overline{y})=(K\text{-}1)*\overline{y}$; де $\overline{y}$ - вектор стовбець зашифрованого повідомлення, K-1 – обернена ключ-матриця за модулем 33. Наша обернена матриця матиме вигляд:

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} 26 & 11 & 3 \\ 25 & 13 & 2 \\ 22 & 30 & 26 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Наступним кроком помножимо обернену матрицю за модулем 33 на вектори-стовпці зашифрованого повідомлення:

$$\begin{bmatrix} 26 & 11 & 3 \\ 25 & 13 & 2 \\ 22 & 30 & 26 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 31 \\ 4 \\ 8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 18 \\ 20 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 26 & 11 & 3 \\ 25 & 13 & 2 \\ 22 & 30 & 26 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 19 \\ 32 \\ 21 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18 \\ 9 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} 26 & 11 & 3 \\ 25 & 13 & 2 \\ 22 & 30 & 26 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 28 \\ 0 \\ 22 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 18 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

У результаті отримуємо ті самі вектори, які у нас були спочатку, це означає, що ми успішно дешифрували повідомлення "ЮҐЖПЯСШАТ".

Тобто, в цій роботі нами були розглянуті поняття та алгоритм шифрування Хілла, а також на конкретному прикладі продемонстровано схема шифрування та дешифрування повідомлення за допомогою дій над матрицями.

Наукове електронне видання
Можна використовувати в локальному та
мережному режимах

# ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2025
## Машинобудівний факультет

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

*14–18 квітня 2025 року*

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM); супровідна документація.
Тираж 100 прим. Зам. № 462

Видавець і виготовлювач
Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.