МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

# ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2021.
# Машинобудівний факультет

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

19–23 квітня 2021 року

Електронне видання на DVD-ROM

м. Запоріжжя

УДК 001.89
Т39

*Рекомендовано до видання Вченою радою*
*Національного університету «Запорізька політехніка»*
*(Протокол №10/21 від 12.04.2021 р.)*

Упорядник Антоненко Н.М.

Редакційна колегія:
*Наумик В. В.*, д-р техн. наук, професор (відпов. ред.)
*Прушківський В. Г.*, д-р екон. наук, професор
*Кузькін О.Ф.,* канд. техн. наук, доцент
*Глушко В.І.,* канд. техн. наук, доцент
*Клімов О.В.,* канд. техн. наук, доцент
*Антонов М.Л.,* канд. техн. наук, доцент
*Савченко В.О.,* канд. техн. наук, доцент
*Кабак В.С.,* канд. техн. наук, доцент
*Касьян М.М.,* канд. техн. наук, доцент
*Корольков В.В.,* канд. екон. наук, доцент
*Дєдков М.В.,* канд. іст. наук, доцент
*Васильєва О.О.,* канд. фіз.-мат. наук, доцент
*Пущина І.В.,* канд. пед. наук, доцент
*Філей Ю.В.,* канд. юр. наук, доцент
*Гайворонська Т.О.,* канд. філос. наук, доцент
*Сажнєв В. М.*, канд. техн. наук, доцент
*Висоцька Н. І.,* начальник патентно-інформаційного відділу

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

Т39 **Тиждень науки-2021. Машинобудівний факультет.** Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 19–23 квітня 2021 р. [Електронний ресурс] / Редкол. : В. В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.
ISBN 978-617-529-312-6.

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

ISBN 978-617-529-312-6.

© Національний університет
«Запорізька політехніка
(НУ «Запорізька політехніка»), 2021

## ЗМІСТ

СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ»..... 8
*Тришин П.Р., Лаговський О.В.* Гідродинамічне віртуальне моделювання обробки абразивними середовищами хвилеводів прямокутного перерізу ..... 8
*Полякова В.С., Козлова О.Б.* Особливості геометрії різальної частини кінцевих фрез ..... 9
*Сердюк О.О., Пухальська Г.В.* 3D-друк в авіабудуванні ..... 11
*Дядя С.І., Телюпа О.А.* Вплив частот автоколивань та власних коливань деталі на якість її поверхні після кінцевого фрезерування ..... 13
*Регеда О.Є., Гончар Н.В.* Зачистка задирок на гострих крайках зубчастого вінця після зубофрезерування ..... 14
*Логомінов В.О., Гермашев А.І.* Методики побудови діаграм сталості процесу різання при кінцевому фрезеруванні ..... 15
*Гуріна Л.О., Вишнепольський Є.В.* Аналіз факторів, що перешкоджають розповсюдженню FDM друку..... 17
СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК» ..... 19
*Ісаченко Д.О.* Деталі ГТД із композиційних матеріалів із застосуванням нанотехнологій..... 19
*Савчишкін О.Ю.* Історія розвитку науки про наноматеріали і нанотехнології..... 20
*Яковлєва А.С.* Історія розвитку наноматеріалів та нанотехнологій..... 21
*Білошапка В.С.* Методи та обладнання для дослідження наноматеріалів..... 22
*Коріньок Д.С.* Наноматеріали і нанотехнології у військовому застосуванні..... 23
*Денисенко К.О.* Наносистемна техніка та її застосування..... 24
*Харина Д.О.* Основні напрямки розвитку сучасних технологій в авіадвигунобудуванні ..... 25

*Клепач О.В.* Фулерени, методи отримання, види, властивості ..... 27
*Івщенко Л.Й., Білошапка В.С.* Основні напрямки розвитку машинобудування на сучасному етапі ..... 28
СЕКЦІЯ «МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ ТА СИСТЕМИ» ... 31
*Циганов В.В.* Перспективи використання механохімічних явищ для підвищення зносостійкості трибоз'єднань ..... 31
*Фролов М.В., Глушко П.В.* До питання демонстраційних випробувань з нульовими відмовами металорізального інструменту при недостатності статистичних даних ..... 32
*Солоха В.В.* Вплив схеми закріплення шпиндельної бабки токарного верстата на температурні деформації осі шпинделя ..... 34
*Івщенко Л.Й., Танченко С.В.* Дослідження трибологічних характеристик матеріалів стосовно напрямних ковзання металорізальних верстатів ..... 36
*Івщенко Л.Й., Бойко І.А., Деменко Д.В.* Розширення технологічних можливостей металорізальних верстатів шляхом оптимізації конструкції окремих вузлів та варіативності їх компоновок..... 37
*Матвєєнко Л.С., Первєєв Д.В.* Розробка пристосування для свердління з підвищеною точністю ..... 39
СЕКЦІЯ «ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНІ, ДОРОЖНІ, БУДІВЕЛЬНІ, МЕЛІОРАТИВНІ МАШИНИ І ОБЛАДНАННЯ»..... 41
*Лятуринський В.О., Ігнатенко В.Є.* Технологічні напруження в зварних коробчастих балках ..... 41
*Мартовицький Л.М., Глушко В.І., Костюк А.С.* Грейфери з магнітом для перевалки металевого скрапу..... 43
*Руднєв О.М., Подоляк С.М.* Дослідження напруженого стану ковшів ковшового конвеєра на хімічних підприємствах..... 44
*Задоя Н.О., Гришко В.Д.* Технологія формування модельної конструкції зміцнюючої оболонки бака діафрагмового ..... 45

*Носенко М.І., Базаря В.С.* Дослідження опору деформації порошкового титану ..... 46
*Волков Г.П., Базаря В.С.* Перспективи технології неавтоклавного бетону ..... 47
*Фролов Р.О., Сакун О.В., Подоляк С.М.* Розробка монтажних пристосувань для модернізації полярного крана 48
*Мартовицький Л.М., Глушко В.І., Сочава А.І., Шаніна З.М.* Шляхи вдосконалення грейферів для важкозачерпуємих сипких матеріалів ..... 49
*Задоя Н.О.* Вивчення взаємодії з полімерами радіаційного твердіння прискореними електронами ..... 50
*Сочава А.І., Козак Д.С.* Методика дослідження на опір втомі в умовах асиметрії циклу ..... 51
*Носенко М.І.* Дослідження силового режиму та ущільнення при гарячому штампуванні порошкового титану ..... 52
*Волков Г.П.* Розробка та використання промислових екзоскілетів ..... 53
*Руднєв О.М., Попов В.А.* Проблеми оцінки напружено-деформованого стану металоконструкцій вантажопідіймальних кранів і моніторинг параметрів паспортів магнітного контролю на сучасних виробництвах .. 55
*Фролов Р.О., Сидоренко М.В.* Прилади безпеки козлових кранів працюючих на одній колії ..... 56
СЕКЦІЯ «ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ» ..... 58
*Широкобоков В.В., Маковський Я.Р.* Дослідження технології виготовлення виробів антифрикційного призначення методами порошкової металургії ..... 58
*Матюхін А.Ю., Фабицький Є.В.* Технології гарячого штампування високоякісних поковок для деталей авіаційних двигунів ..... 59
*Бень А.М., Єпішкін О.В.* Особливості використання комплексів віртуального інжинірингу на прикладі QForm .... 60

*Матюхін А. Ю., Макаров А.С.* Технології створення безпорісних деталей з титанового порошку..... 61
*Матюхін А. Ю., Каспаріді М.М.* Визначення основних енерго-силових параметрів прокатування на безперервному стані..... 62
*Бень А.М., Леліков М.А.* Технологія пресування титанових сплавів..... 63
*Обдул В.Д., Черенков Д.В.* Підвищення виходу годного при куванні злитків на заводі ТОВ «Дніпропрес Сталь»..... 64
*Ленок А.А., Доновський О.В.* Експериментальні методи дослідження напружено-деформованого стану металу при гнутті трубної заготовки..... 66
*Явтушенко А.В., Таран О.А., Палець О.Т.* Дослідження методів розкрою листових заготовок складного контуру..... 67
СЕКЦІЯ «ВИЩА МАТЕМАТИКА»..... 70
*Онуфрієнко В.М.* Досягнення фізико-математичної школи кафедри вищої математики (до 90-ї річниці з дня заснування)..... 70
*Онуфрієнко В.М., Онуфрієнко Л.М.* Фрактальна модель питомої провідності графенового транзистора..... 74
*Онуфрієнко В.М., Слюсарова Т.І.* Гістерезис фізичних процесів у метаматеріальному середовищі..... 76
*Онуфрієнко В.М., Засовенко А.В.* Моделювання фрактально конфігурованого метаматеріального середовища..... 79
*Засовенко А.В.* Моделювання динамічної поведінки в'язкопластичної балки під дією ударного навантаження..... 81
*Nataliia Snizhko* Approximation of functions of two variables on the unit bicircle..... 83
*Сніжко Н.В.* Переваги та недоліки дистанційного навчання..... 85
*П'янков В.П., Зіненко І.І.* Випромінювання із секторіального рупора з вбудованою металопластинчатою лінзою..... 87

*Фасоляк А.В.* Застосування біполярної системи координат до математичного моделювання динаміки циліндричних оболонок у пружному середовищі ..... 89
*Антоненко Н.М., Харитонов І.А., Шевченко М.О.* Про один підхід до розв'язання осесиметричної задачі теплопровідності для шаруватої плити з неідеальним тепловим контактом між шарами..... 91

## СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ»

УДК 621.923.9:004.94
Тришин П.Р. [1], Лаговський О.В. [2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-110м НУ «Запорізька політехніка»

# ГІДРОДИНАМІЧНЕ ВІРТУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБРОБКИ АБРАЗИВНИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ ХВИЛЕВОДІВ ПРЯМОКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ

У радіолокаційних станціях S-діапазону застосовуються прямокутні хвилеводи з численними вигинами і поворотами. Існують два типи вигинів хвилеводу: плавний, виконаний згинанням прямокутної хвилеводної труби, і кутовий, виготовлений методом зварювання або пайки секцій хвилеводної труби. Кутові застосовуються частіше, через те, що вони є компактнішими. Хвилеводи виготовляють з тонкостінної (2,5 мм) алюмінієвої або латунної прямокутної труби.

При зварюванні або пайці секцій хвилеводу в зоні шва з'являються деформації і дефекти поверхні, які усуваються рихтуванням і подальшою фінішною обробкою. Канал хвилеводів полірують з допуском до 0,07 мм і шорсткістю до 0,8 мкм. Від якості поверхні каналу хвилеводів залежать втрати потужності електромагнітної хвилі.

Не всі методи фінішної обробки каналів хвилеводів, що забезпечують необхідну шорсткість, застосовні до прямокутного перетину і обробки кутових вигинів. Часто полірування біля шовних зон через важкий доступ до них проводиться ручним електроінструментом, вимагає складних траєкторій руху інструменту або використання фасонних інструментів.

Фінішні операції у внутрішньому проточному каналі хвилеводів складних просторових форм можна виконувати методами, в яких в якості інструменту застосовується потік абразивного середовища. Як показують дослідження, виконані на різних деталях машин, такий тип обробки дозволяє здійснювати механізацію процесу, поліпшувати умови праці, знижувати час обробки.

Метою роботи є пошук оптимального способу фінішної обробки абразивними середовищами прямокутних хвилеводів S-діапазону з кутовими вигнутими переходами за допомогою спеціальних віртуальних програм з симуляцією гідродинамічної поведінки середовищ.

Таким чином змоделювали гідроабразивне прокачування і абразивно-екструзійну обробку. Гідроабразивне прокачування – це процес ерозії потоком гідроабразивної суспензії оброблюваної поверхні. Гідроабразивна суспензія прокачується через деталь в обох напрямках, створюючи спрямовану

шорсткість. Отримана шорсткість залежить від розміру і концентрації абразивних зерен наповнювача суспензії.

Абразивно-екструзійна обробка каналу полягає в екструзії уздовж каналу робочого середовища з полімерної основи, наповненої абразивними зернами, які здатні до в'язкопружного деформування.

Аналіз цих методів за допомогою віртуальної гідродинамічної симуляції показав, що при такій обробці каналів з кутовими вигинами якість обробленої поверхні часто неоднорідна через значні зміни характеру течії робочого середовища. Деякі місця обробляються занадто інтенсивно, що є недопустимим через тонкостінність конструкції, деякі місця практично не оброблюються через падіння тиску та повертання течії в протилежному напрямку. Але ці ситуації зустрічаються здебільш в хвилеводах з кутовими згинами. Тобто для них використання цих методів не є доцільним.

Для плавних вигинів хвилеводів прямокутного перерізу можна підібрати режими і властивості середовища та абразивного наповнювача для продуктивної обробки каналу.

УДК 621.914.22
Полякова В.С. [1], Козлова О.Б. [2]
[1] студ. гр. Мз-110м НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

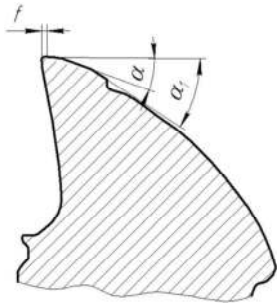
## ОСОБЛИВОСТІ ГЕОМЕТРІЇ РІЗАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ КІНЦЕВИХ ФРЕЗ

В сучасному інструментальному виробництві, на сьогоднішній день, важко уникнути передчасного списання інструментів внаслідок погіршення якості обробки, появи вібрацій та витрат на закупівлю нових [1].

Тому, в геометрію кінцевих фрез від початку закладена можливість їх, як мінімум, трикратного заточування, а також зменшення биття. Це – стрічка, яка є частиною задньої поверхні зуба і піддається шліфуванню при заточуванні. Її наявність виключає мікросколи різальних кромок при попутному та зустрічному фрезеруванні при роботі інструментом з твердого сплаву [2] і істотно впливає на вібростійкість процесу фрезерування [3, 4]. Саме вона піддається основному зносу і заточується при обробці задньої поверхні. Розмір стрічки чинить дію величині сили тертя між фрезою і оброблюваною деталлю, тому, вона повинна виготовлятися та підтримуватися в певному діапазоні [5].

В літературних джерелах пропоновано виконання стрічки різної ширини.

Для зменшення биття фрези на зубі залишають циліндричну стрічку величиною $f = 0{,}05–0{,}1$ мм, і задній кут починається вже за цією стрічки [6]. Іноді залишають циліндричні стрічки шириною $f = 0{,}02…0{,}03$ мм [7]. В ГОСТ 17026-71 зазначено, що кінцеві фрези виготовляють в двох виконаннях: з циліндричною стрічкою на задній поверхні зуба ($f \leq 0{,}05$ мм) та заточені нагостро. Згідно [8] на задній поверхні зубів фрез при заточуванні залишають круглошліфовану стрічку шириною не більше 0,1 мм.




α – головний задній кут; α1 – допоміжний задній кут; f – стрічка.

Рисунок 1 – Елементи геометрії зуба фрези.

Відтак, стрічка на задній поверхні зуба фрези, яка є невід'ємною частиною геометрії кінцевих фрез, впливає на весь процес фрезерної обробки. Тому, актуальним є вивчення та визначення залежності найкращих умов процесу фрезерування, а саме точності обробки, параметрів якості та ефективності, від її геометричного розміру.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фреза концевая [Электронный ресурс] // Раздел: Научно-техническая статья. – Режим доступа: https://pitools.ru/articles/end-mills.html

2 Балла О. М. Особенности проектирования и изготовления концевых фрез с напайными пластинками твердых сплавов винтовой формы для обработки деталей из авиационных материалов / О. М. Балла // Весник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 10–33.

3. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей: монография [Электронный ресурс] : монография / [Внуков Ю. Н., Дядя С. И., Козлова Е. Б и др.] ; под ред. Ю. Н. Внукова. – Электрон. данные. – Запорожье : ЗНТУ, 2017. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM) 12 см. – Название с тит. экрана.

4. Зубарев А. Е. Влияние фаски на задней поверхности концевого инструмента на интенсивность автоколебаний при фрезеровании / А. Е. Зубарев, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, В. С. Штанкевич // Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии : междунар. науч.-техн. конф., 19–21 травня 2015 р. : тезисы докл. – Запорожье, 2015. – С. 79–81.

5. Заточка концевой фрезы [Электронный ресурс] // Розділ: Научно-техническая статья. – Режим доступа: https://www.rinscom.com/articles/zatochka-kontsevoy-frezy.

6. Аршинов В. А. Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1967. – 500 с.

7. Кожевников Д. В. Металлорежущие инструменты : учебник / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов. – Томск : Изд-во. Том. ун-та, 2003. – 392 с.

8. Аврутин С. В. Фрезерное дело : учебник для городских проф.-техн. училищ / С. В. Аврутин.– 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Профтехиздат, 1963. – 542 с.

УДК 621.7
Сердюк О.О.[1] , Пухальська Г.В.[2]
[1]студ. гр. М-110м НУ «Запорізька політехніка»
[2]канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## 3D-ДРУК В АВІАБУДУВАННІ

За останні роки 3D-друк став швидко набирати популярність в абсолютно різних сферах. Його використовують в побуті, кулінарії, автомобілебудуванні, ракето-космічній промисловості, медицині і звісно авіаконструктори не змогли обійти цю новаторську технологію стороною, почавши активно її використовувати в розробці нових літаків та їх комплектуючих. Сама суть цього методу полягає у нагріванні металевого порошку потужним лазером що і забезпечує процес спікання матеріалу і перетворенню його у готовий до використання виріб.

Одною із перших освоїла технологію компанія GE Aviation. Виробник авіаційних двигунів звернув увагу на те, що використання різних сплавів в деталі істотно покращує її фізико-технічні властивості і дає можливість вивести льотні характеристики літака новий рівень. Але традиційний метод лиття не дозволяє об'єднати різні матеріали у рамках одного технологічного процесу. Тоді у GE Aviation почали працювати над удосконаленням форсунок. Для виробництва однієї деталі необхідно було окремо виготовити 20 елементів, після чого з'єднати їх в одній запчастині. 3D принтер по металу дав можли-

вість виготовити деталь із цільного шматка матеріалу, економлячи час і гроші. Дослідні зразки форсунок пройшли сертифікацію в 2016 році [1].

Гіганти авіабудування пішли ще далі. Так компанія Airbus створила безпілотний літальний апарат «Thor», надрукований на 3D принтері. Мова йде про майже всі елементи корпусу, крім модуля дистанційного керування і електронних пропелерів. Чотириметровий літак успішно піднявся в повітря і подолав 40 кілометрів, після чого здійснив вдалу посадку на заводі компанії. Проект носить експериментальний характер, а на його базі зроблять літак з цільним корпусом, максимально наближений до серійних моделей [1].

3D друк використовується і в серійних літаках Airbus. У широкофюзеляжних лайнерах A350 встановлюється надрукований з титанового порошку кронштейн в складі пілона двигуна. В експериментальних моделях Airbus уже зараз тестують більше 1000 деталей, зроблених методом лазерного спікання. Серед них переважно елементи інтер'єру. А в той же час виробник авіадвигунів Safran Helicopter Engines вирішив, що не потрібно обмежуватися лише предметами інтер'єру і в 2017 році представив лінійку газотурбінних двигунів Aneto. Двигуни стали на 30% потужніші, ніж аналоги при тій же надійності та економічності. У процесі складання використовуються компоненти, зроблені методом тривимірного друку – впускні напрямні лопатки і обертається камера згоряння. Компанія налітала 25 годин – проблем не виявлено [1].

В американському «Боїнг» не відстають від європейських колег. 3D-друк застосовано при створенні літака Boeing 777X, в якому обидва двигуни GE9X налічують понад три сотні 3D-друкованих деталей, з яких близько 80% складають титан-алюмідні лопатки двигуна. Ці деталі були виготовлені командами з General Electric в аерокосмічній компанії Avio Aero і Центром Адитивних Технологій GE [2]. Також Boeing запатентував 3D-друк левітуючих предметів. Нова технологія не схожа ні на що інше - йдеться про одночасне використання декількох 3D-принтерів для подачі матеріалу з діамагнітними властивостями. Замість друкованої платформи технологія Boeing має на увазі створення магнітних полів, які утримують першу «порцію» надрукованого матеріалу - потім 3D-принтери додають до неї новий матеріал. Оскільки матеріал утримується магнітними полями, принтери можуть друкувати на будь-якій стороні, на відміну від традиційних пристроїв, що створюють деталі від низу до верху, а обертання предметів в будь-яких напрямках дозволяє виготовляти набагато складніші форми [3].

Також за допомогою 3D-принтерів можна друкувати запчастини на заміну зламаних, прямо на місці обслуговування літаків, що значно скорочує час та грошові витрати. Особливо таку можливість оцінять військові [4]. У підсумку можна побачити, що 3D-друк все більше захоплює галузь авіабудування, оскільки деталі виготовлені за цією технологією значно легші (що є

критично для авіації), швидше виготовляються і залишають мало відходів виробництва. А все це зменшує вартість літака та його обслуговування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 3D печать в авиастроении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://make-3d.ru/articles/3d-pechat-v-aviastroenii/

2. 3D-печать в создании самолета Boeing 777 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/3d-pechat-v-sozdanii-samoleta-boeing-777

3. Компания Boeing запатентовала 3D-печать левитирующих предметов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.3dpulse.ru/news/nauchnye-razrabotki-tehnologii/kompaniya-boeing-zapatentovala-3d-pechat-levitiruyuschih-predmetov/

4. Boeing активно использует 3D печать в производстве запчастей для своих самолетов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://jets.ru/lifestyle/boeing_aktivno_ispolzuet_3d_pechat_v_proizvodstve_zapchastey_dlya_svoikh_samoletov/

УДК 621.9

Дядя С.І. [1], Телюпа О.А. [2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-118сп НУ «Запорізька політехніка»

## ВПЛИВ ЧАСТОТ АВТОКОЛИВАНЬ ТА ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ДЕТАЛІ НА ЯКІСТЬ ЇЇ ПОВЕРХНІ ПІСЛЯ КІНЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

Вимоги щодо заощадження матеріальних ресурсів завжди були актуальними при виготовленні будь якої продукції, тому що левова частка у собівартості її виготовлення припадає саме на матеріали. У теперішній час використання методу кінцевих елементів на етапі проектування виробів дозволяє визначати їх геометричні параметри, за яких при мінімальних розмірах будуть виконуватись експлуатаційні вимоги. При цьому у багатьох випадках деталі виробів тонкостінні, що ускладнює їх обробку на металорізальних верстатах через виникнення вібрацій. При цьому особливо негативно впливають автоколивання. Експериментально доведено, що вони формують хвилясту поверхню різання. Це впливає на зміну товщини шару, що зрізається та спадковість у вигляді хвилястості на обробленій поверхні. Крок хвилястості на ній можна розрахувати при знанні періоду автоколивань та швидкості різання [1]. Швидкість різання задається, а частота автоколивань ($f_{АК}$) зали-

шається невідомою. Тому актуальним є її визначення. Експериментально встановлено, що вона залежить від частот власних коливань інструменту ($f_{ін}$) та деталі ($f_{дет}$), значення яких можна виміряти до початку обробки деталі. Для розрахунку частоти автоколивань пропонується формула:

При фрезеруванні з великими частотами обертання шпинделя, коли автоколивання не встигають розпочатися, визначальними для якості обробки є частоти власних коливань деталі, у кратності до яких рекомендується призначати частоти обертання шпинделя.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дядя С. И. Влияние периода автоколебаний на формирование профиля обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании / С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, А. И. Гермашев, М. В. Кучугуров // Різання та інструмент в технологічних системах : зб. наук. праць. – Вип. 91. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – С. 24–36.

УДК 62-44
Регеда О.Є.[1], Гончар Н.В.[2]
[1] студ. гр. Мз-110м НУ «Запорізька політехніка»
[2] доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ЗАЧИСТКА ЗАДИРОК НА ГОСТРИХ КРАЙКАХ ЗУБЧАСТОГО ВІНЦЯ ПІСЛЯ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

Усі зубчасті вінці повинні мати закруглені крайки на торцях зубців. Загалом передбачають фаски або радіуси закруглення на торцях по контуру зубців з метою поліпшення експлуатаційних властивостей зубчастих виробів та підвищення їх довговічності.

Видалення задирок та закруглення крайок контуру зубчастих коліс завжди є проблемою, яку вирішують спеціалізовані цехи зубчастих виробів на авіадвигунобудівних підприємствах. Методи зачистки мають бути недорогими, продуктивними, малоенергоємними та забезпечувати високу якість обробки деталей з зубчастими елементами.

Один з таких методів зачищає задирки за допомогою ультразвуку. При цьому способі додатково згладжуються гострі крайки, а робочі поверхні зубців змінам не піддаються.

Другий розповсюджений метод зняття задирок – гідрогалтування в барабані, причому, вибираючи відповідний наповнювач і частоту обертання барабана, можна досягти якісну очистку зубців без зміни їх профілю.

Зазвичай процес очищення поверхні поєднують із зміцненням. Ультразвукову обробку поверхні виконують в гідроабразивному середовищі. Абразив вводять в розчин в кількості 10-15% від маси робочої рідини. Оброблювані деталі заводять в суспензію, що складається з абразивного наповнювача, зваженого в рідині. У цій суспензії збуджуються ультразвукові коливання, і під дією кавітації та гідродинамічних потоків відбувається декоративне шліфування і зняття задирок. З багатьох чинників, що впливають на ефективність ультразвукового очищення, найбільш важливими є: правильний вибір хімічного складу розчину та наповнювача, його температури, потужність ультразвуку і тривалість очищення.

Обробка в галтовочному барабані включає в себе розміщення деталей – шестерень, абразивних середовищ і компаундів в барабані з водою. Обертання барабана призводить до перевертання маси носія і деталей. Це викликає тертя, яке призводить до стирання деталей в масі і швидкому й ефективному механічному видаленню задирок з поверхонь деталей. Задирки знімають шляхом галтовки в барабанах за допомогою тирси або шматочків листяних сортів дерев, обрізків шкіри, гальки, резини, бою абразивних кругів тощо. Гидрогалтовка в барабанах є тривалим процесом і при раціонально обраних режимах обробки залежить від вихідних розмірів задирок. Тривалість галтовки відносно велика – від декількох годин до декількох діб.

У висновку можна сказати, що взагалі можна використовувати комплексну обробку. Спочатку за допомогою грубої гідрогалтовки швидко видалити великі задирки після зубофрезерування, після чого використати ультразвукову обробку для фінішної обробки и закруглення гострих крайок. Після зубошліфування достатньо ультразвукової обробки.

УДК 621.91.01
Логомінов В.О. [1], Гермашев А.І. [1]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»

## МЕТОДИКИ ПОБУДОВИ ДІАГРАМ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

Прогнозування сталості при різанні є важливою задачею, рішення якої необхідно для вибору оптимальних режимів обробки, які з одного боку забезпечать високу продуктивність, а з іншого не приведуть до появи неприпустимих вібрацій. За результатами аналізу вібросталості обробки часто будують пелюсткову діаграму сталості (див. рис. 1).

Існує кілька основних методів побудови діаграм сталості, кожен з яких має свої переваги і недоліки, а також область застосування. Ці методи можна поділити на: аналітичний метод, чисельні та експериментальні методи.

Аналітичний метод є найбільш швидким методом. Однак він не підходить для аналізу складних випадків обробки, зокрема переривчастого різання (наприклад, фрезерування з малим кутом контакту) [1], [2].

Серед чисельних методів потрібно виділити наступні методи.

Метод напівдискретизації. Дозволяє аналізувати вібросталість переривчастого різання. Але вимагає великого часу для розрахунку, оскільки пелюсткова діаграма сталості будується шляхом перебору значень швидкості обертання шпинделя $n$ з кроком $\Delta n$, і ширини шару, що зрізається (глибини різання) $a$, з кроком $\Delta a$ [3].

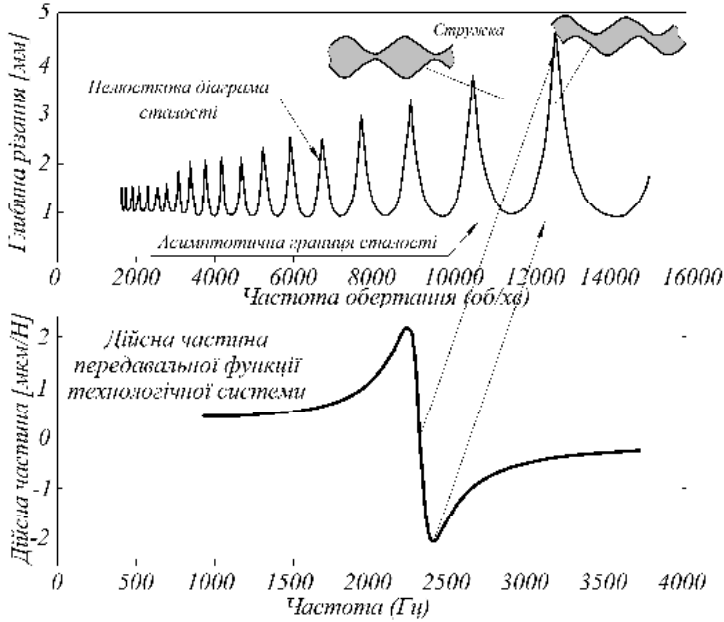



Рисунок 1 – Пелюсткова діаграма сталості [1].

Метод повної дискретизації [4]. Він схожий з методом напівдискретизації. Вимагає меншої часу для розрахунку, ніж метод напівдискретизації, проте його точність трохи нижче, ніж у методу напівдискретизації.

Методи імітаційного моделювання у часовому просторі [1]. Дозволяють врахувати реальну кінематику процесу, механіку різання, геометрію інструменту, радіальне биття, внутрішню і зовнішню хвилястість на поверхні різання та інші нелінійності. Однак витрати часу занадто великі для побудови повної діаграми сталості.

Експериментальні методи [1], [5] є найбільш витратними за часом і вартістю. Крім того, аналіз сталості можна провести тільки для конкретної заготовки, інструменту і верстата.

Методи напівдискретизації і повної дискретизації частіше використовуються для аналізу процесів переривчастого фрезерування оскільки дають розумний компроміс між точністю та вартістю розрахунків.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Altintas Y. Chatter stability of metal cutting and grinding / Y. Altintas, M. Weck // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2004. – Vol. 53, № 2. – P. 619–642.

2. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and cnc design / Y. Altintas. – Cambridge University Press, 2012. – 381 p.

3. Insperger T. Semi-discretization for time-delay systems – stability and engineering applications / T. Insperger, G. Stépán. – Springer, 2011. – 174 p.

4. Ding Y. A full-discretization method for prediction of milling stability / Y. Ding, L. Zhu, X. Zhang, H. Ding // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50, № 5. — P. 502–509.

5. Tlusty J. Beispiele der behandlung der selbsterregten schwingung der werkzeugmaschinen / J. Tlusty, H. Polacek. – Munich : Fo Ko Ma, Hanser Verlag, 1957.

УДК 111

Гуріна Л.О. [1], Вишнепольський Є.В. [2]
[1] асист. НУ «Запорізька політехніка»
[2] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ПЕРЕШКОДЖАЮТЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЮ FDM ДРУКУ

В даний час при виробництві нових виробів в авіабудуванні, машино- і приладобудуванні поряд з традиційними методами переробки термопластів, такими як лиття під тиском, швидкими темпами розвиваються адитивні технології, що забезпечують скорочення тривалості технологічної підготовки виробництва.

FDM (Fused Deposition Modelling) – технологія тривимірного друку, при якій побудова об'єкта йде за рахунок розплавлення нитки пластика, яка через екструдер подається на робочу поверхню. Відповідно до класифікації американської асоціації по розробці технічних стандартів (ASTM), ця технологія

відноситься до однієї великої групи – Material extrusion, що перекладається як «видавлювання матеріалу», а сама абревіатура FDM означає «осадження розплавленого матеріалу» [1].

Завдяки низькій вартості і високому рівню функціональних можливостей FDM-принтери і витратні матеріали для них в даний час є найбільш затребуваними на ринку адитивних технологій, але існує ряд проблем, які потребують вирішення:

– порівняно невеликий «вік» технології обумовлює відсутність загальноприйнятих правил, ГОСТів та методик випробування як матеріалів, так і зразків;

– всі вироби, отримані за допомогою 3Д-друку, є ортотропними, так як виробляються пошарово. Зазвичай допустима напруга по нормалям до площин XZ і XY значно нижче, ніж по нормалі до площини XY;

– при FDM друці можлива значна зміна розмірів виробу після його повного остигання. Наприклад, для ABS-пластика (акрилонітрил бутадієн стирол) усадка може доходити до 8%;

– компанії-виробники філамента зазвичай замовляють сировину у вигляді порошків або гранул і не проводять діагностику його складу, що призводить до відмінностей в механічних та технічних властивостях одного і того ж матеріалу;

– невисока швидкість роботи (для побудови великих і складних моделей потрібні багато годин і навіть десятки годин);

– невелика роздільна здатність як по горизонталі, так і по вертикалі, що призводить до більш-менш помітної шаруватості поверхні виготовленої моделі;

– для елементів, що нависають, потрібне створення допоміжних структур, які після друку доводиться видаляти, але навіть з урахуванням цього деякі моделі просто неможливо зробити на FDM-принтері за один цикл, і доводиться розбивати їх на деталі з подальшим склеюванням.

Вирішення цих основних проблем дозволить перейти від прототипування, яке було основною метою розробки FDM технології, до виготовлення реальних деталей, конкретних пристроїв і конструкцій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ляпков А. А. Полимерные аддитивные технологии: учеб. пособие / А. А. Ляпков. – Томск: изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 114 с.

## СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК»

УДК 621.452.007
Ісаченко Д.О.[1]
[1] студ. гр. М-610м НУ «Запорізька політехніка»

### ДЕТАЛІ ГТД ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Найважливіше завдання сучасного літакобудування – полегшення конструкції літального апарату і нанотехнології та наноматеріали допомагають у розв'язання цієї проблеми.

Це все досягається завдяки таким видам наноматеріалів:

1) Наноструктурні конструкційні матеріали. Густина одношарових вуглецевих нанотрубок в 5 разів менше густини стали, а міцність більше, ніж в 20 разів вище, питома міцність нанотрубок може більш, ніж в сто разів перевищувати аналогічний параметр для стали. Це відкриває широкі перспективи для використання даного матеріалу в авіації, космічній техніці, будівництві і т.д.

2) Нанокомпозити. Нанокомпозитні матеріали через дуже малого (< 10 нм) розміру зерен і значну роль граничних областей, що оточують окремі зерна, поводяться інакше в порівнянні зі звичайними матеріалами. Тому вони мають абсолютно нові властивості.

3) Наноструктурні покриття. Завдяки застосуванню високо твердих нанокристаллических зносостійких покриттів на основі нітридів, карбідів, боридів важкотопних металів, багатошарових наноструктурних покриттів складного складу може бути істотно підвищена стійкість деталей, що працюють на тертя і знос.

4) Наноструктурна кераміка. Нанокераміка має низку переваг перед металами: поряд з високою твердістю і міцністю вона має високу жароміцність, не схильна до корозії, володіє меншою питомою вагою.

5) «Інтелектуальні» матеріали. Це матеріали зі здатністю об'єкта при зовнішньому впливі розпізнавати ситуацію, що виникла, реагувати на зміну навколишнього середовища (сенсорна функція); виробляти стратегію поведінки, тобто оцінювати ситуацію і робити висновки (процесорна функція); порушувати необхідну реакцію, тобто проявляти виконавчі властивості, при якому матеріал робить дію або подає сигнали (ефекторна функція).

Всі ці наноматеріали легко знайшли своє застосування в авіадвигунів. Нанокомпозити і нанокераміка в лопатках турбіни та компресора, наноструктурні конструкційні матеріали в корпусі двигуна, наноструктурні покриття в підшипниках і валах, і т.д. і т.п.

УДК 539.51, 629.7
Савчишкін О.Ю.[1]
[1] студ. гр. М-610м НУ «Запорізька політехніка»

## ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ НАУКИ ПРО НАНОМАТЕРІАЛИ І НАНОТЕХНОЛОГІЇ

Термін «нанотехнологія» вперше запропонував японець Н. Танігучі в 1974 р. 1905 рік. Швейцарський фізик Альберт Ейнштейн опублікував роботу, в якій доводив, що розмір молекули цукру становить приблизно 1 нанометр. 1931 рік. Німецькі фізики Макс Кнолл і Ернст Руска створили електронний мікроскоп, який вперше дозволив досліджувати нанооб'єкти. 1986 рік. Нанотехнологія стала відома широкому загалу. Основним інструментом для роботи в області мікрочастинок на атомно-молекулярному рівні є мікроскопи. Наночастки - наночастинки – це частинки з розміром між 1 і 100 нанометрів. В області досліджень наночасток в даний час – область інтенсивного наукового інтересу через широкого спектру можливостей застосування в медико-біологічних, оптичних і електронних полях. нанокомпозити – матеріали, отримані введенням наночастинок в будь-які матриці. Різке зростання нанотехнологічних досліджень почалось 10 років тому, коли в США стали готувати державну програму National Nanotechnology Initiative. В Європейському Союзі програма розвитку нанотехнологій включає безліч проектів, починаючи з розробки наноантен і нанопристроїв і закінчуючи розробкою нанороботів, здатних відновлювати хворі людські органи. Насправді, багато наноматеріалів є не окремими частинками, вони можуть являти собою складні мікро і макро об'єкти, які наноструктуровані на поверхні або в об'ємі. Так, виявилося що токсичність наночасток металів у багато разів менше токсичності іонів металів: мідь в 7 разів, цинк в 30 разів, а залізо в цілих 40 разів. Феритини – це клас білків, що забезпечують для живих організмів можливість синтезувати частинки гідроксидів і оксіфосфатів заліза нанометрового розміру.

Найбільші наукові центри, які займаються розробками нанотехнологій. В Україні:

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАНУ – Електронна, атомна будова і властивості наноструктурних матеріалів, біонаноматеріалі: синтез і властивості,

Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАНУ – Синтез і формування наноструктур,

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ – Тонкоплівкові нанотехнології з'єднання неорганічних матеріалів та інші.

Області застосування нанотехнологій: наноелектроніка, будівництво, медицина, автомобілебудування та ін. Використання можливостей нанотехнологій може вже в недалекій перспективі принести різке збільшення вартості валового внутрішнього продукту і значний економічний ефект в наступних базових галузях економіки.

УДК 539.51, 608.1
Яковлєва А.С.[1]
[1] студ. гр. М-710м НУ «Запорізька політехніка»

## ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ НАНОМАТЕРІАЛІВ ТА НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Людство в усі часи прагнуло поліпшення умов свого існування. І тому в первісному суспільстві люди використовувало різні знаряддя праці, трохи згодом вони приручили тварин, котрі почали приносити користь людському співтовариству. Минали роки, змінювався світ, змінювалися люди та його потреби. Тепер більшість із нас неспроможна уявити собі життя без сучасних благ цивілізації, досягнень науки, техніки, медицини. Таким кроком у тому розвитку стане освоєння нанотехнологій, зокрема, систем дуже малого розміру, здатних виконувати команди людей.

Актуальність даної роботи полягає у розгляданні теми, як історія розвитку нанотехнологій. Обрана тема не випадкова: розвиток і впровадження нанотехнологій в сучасне життя та виробничі процеси різних галузей господарства зараз є дуже важливою і актуальною.

Нанотехнологія – сукупність методів і прийомів, що забезпечують можливість контрольованим чином створювати і модифікувати об’єкти, що включають компоненти з розмірами менше 100 нм, хоча б в одному вимірі, і в результаті цього отримали принципово нові якості, що дозволяють здійснювати їх інтеграцію в повноцінно функціонуючі системи більшого масштабу.

Наноматеріал – матеріал, що містить структурні елементи, геометричні розміри яких, хоча б в одному вимірі, не перевищують 100 нм, і, завдяки цьому володіє якісно новими властивостями, у тому числі заданими функціональними і експлуатаційними характеристиками.

Мета роботи полягає в дослідженні: процесу розвитку нанотехнологій як галузі знань і її значення в сучасному світі; праць видатних вчених з області нанотехнологій та їх винаходів; перспектив розвитку нанотехнологій у машино- та авіадвигунобудуванні.

УДК 620.187
Білошапка В.С.[1]
[1]студ. гр. М-610м НУ «Запорізька політехніка»

# МЕТОДИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ

З наноматеріалами і нанотехнологіями вчені пов'язують наше майбутнє. Широке впровадження нових технологій, в тому числі нанотехнологій, в промислове виробництво досягається високим рівнем стандартизації, що неможливо без випереджаючого розвитку методів дослідження і засобів вимірювань нових матеріалів.

Розробкою методів дослідження наноматеріалів і створенням методик і засобів, що дозволяють точно визначати їх структурні та електрофізичні параметри, займаються в багатьох лабораторіях світу. Зокрема, крім завдань по виготовленню і застосуванню нанотрубок, як і раніше актуальними є експериментальні роботи по їх характеризації.

Для дослідження наноматеріалів можуть застосовуватися практично ті ж методи, що і для дослідження звичайних кристалічних матеріалів. Однак у наноматеріалів існує особлива специфіка, яка полягає в пред'явленні підвищених вимог до роздільної здатності методів, а саме можливість досліджувати ділянки поверхні зразків з розмірами менше 100-200 нм. Таким чином, можна виділити ряд методів структурного і хімічного аналізу, застосування яких дозволяє врахувати специфіку наноматеріалів.

Електронна мікроскопія. У порівнянні зі світловими мікроскопами використання електронного променю з малою довжиною хвилі дозволяє істотно збільшити роздільну здатність.

Спектральні методи дослідження. До спектральних методів зазвичай відносять методи дослідження поверхні твердих тіл, засновані на аналізі енергетичних спектрів відображених випромінювань, що виникають при опроміненні досліджуваного матеріалу електронами, іонами і фотонами.

Скануючі зондові методи дослідження. Дана група методів є найбільш широко використовуваної в галузі наноматеріалів і нанотехнологій. Основна ідея всіх методів даної групи полягає в використанні зонда - пристрою зчитування інформації з поверхні досліджуваного матеріалу.

Отримання достовірної інформації про досліджувані наноматеріали, їх фізико-хімічні і структурні властивості істотно залежать від правильного вибору і застосування методів дослідження.

УДК 539.51
Коріньок Д.С.[1]
[1] студ. гр. М-710м НУ «Запорізька політехніка»

## НАНОМАТЕРІАЛИ І НАНОТЕХНОЛОГІЇ У ВІЙСЬКОВОМУ ЗАСТОСУВАННІ

Наноматеріали – матеріали, створені з використанням наночасток та/або за допомогою нанотехнологій, що мають певні унікальні властивості, зумовлені присутністю цих частинок у матеріалі.

До наноматеріалів відносять об'єкти, один з характерних розмірів яких лежить в інтервалі від 1 до 100 нм.

Нанотехнології – у широкому значенні слова прийнято називати міждисциплінарну галузь фундаментальної і прикладної науки, в якій вивчаються закономірності фізичних і хімічних систем протяжністю порядку декількох нанометрів або часток нанометра.

Нанозброя – збірна назва всіх принципово нових видів техніки, озброєння і військового оснащення, функціонування та бойове застосування яких спирається на досягнення в області сучасних нанотехнологій.

Існуючі нанотехнології виникли і сформувалися як багатопрофільна науково-технічна дисципліна на стику фізики, хімії, біології, медицини та матеріалознавства. У більшості розвинених країн програми по їх розвитку вважаються одними з найбільш пріоритетних інноваційних напрямків.

В даний час наукове співтовариство вважає, що розробка сучасних нанотехнологічних засобів знищення дозволяє отримати в руки бойовий потенціал, який можна порівняти за руйнівною силою з ударною міццю зброї масового ураження.

Процес вдосконалення військових нанотехнологій несе з собою і деякі неявні аспекти. Наприклад, поява принципово нових наноозброєнь не дає можливості адекватно оцінити їх бойовий потенціал, зміну розстановки сил і геополітичні можливості противника.

Серед найбільш пріоритетних цілей розвитку сучасних військових нанотехнологій виділяють проекти по розробці захисних і самовідновлюються систем, роботи по зниженню помітності існуючих зразків озброєння і по зменшенню їх енергоспоживання. Особливий інтерес викликають пристрої по детекції хіміко-біологічних забруднень і небезпечних речовин, комплекси зв'язку і засоби виявлення «невидимих» бойових одиниць противника,конструкційні матеріали на базі нанооб’єктів, нові енергетичні ресурси і боєприпаси.

УДК 539.51, 629.7
Денисенко К.О.[1]
[1] студ. гр. М-610м НУ «Запорізька політехніка»

## НАНОСИСТЕМНА ТЕХНІКА ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

До наноматеріалів умовно відносять дисперсні і масивні матеріали, які містять структурні елементи (зерна, кристаліти, блоки, кластери), геометричні розміри яких хоча б в одному вимірі не перевищують 100 нм, і які володіють якісно новими властивостями, функціональними і експлуатаційними характеристиками.

При використанні наноматеріалів з'являється наносистемна техніка, тобто всі технології та пристрої, що виготовлені на основі наноматеріалів. Основними напрямками розвитку наносистемної техніки є механіка, електроніка, оптика та їх підвиди, а також одночасне використання декількох напрямків.

Наномеханіка – це розділ нанонауки, який займається вивченням і застосуванням фундаментальних механічних властивостей фізичних систем в наномасштабі, таких як пружні, термічні і кінетичні властивості матеріалів.

Часто наномеханіка розглядається як гілка в області нанотехнологій, тобто прикладна область з акцентом на механічні властивості модифікованих наноструктур і наносистем (системи з нанорозмірними компонентами значення). Область застосування наномеханіки: наномашини, наночастинки, нанопорошки, нанопроволоки, наностержні, наноленти, нанотрубки, включаючи вуглецеві нанотрубки (ВНТ) і нанотрубки нітриду бору (БННТ); наноскорини, наномембрани, нанопокриття, нанокомпозитні та наноструктуровані матеріали (рідини з диспергованими наночастинками); наномотори та інші.

Нанооптика – це розділ оптики нанотехнології, що вивчає особливості взаємодії випромінювання (світла) з частинками, розмір яких менше довжини хвилі. Технології в області нанооптики включають скануючу оптичну мікроскопію ближнього поля фотопосилену скануючу тунельну мікроскопію і спектроскопію поверхневого плазмового резонансу ті мікросупутники.

Наноелектроніка – область науки і техніки, що займається створенням, дослідженням і застосуванням електронних приладів з нанометровими розмірами елементів, в основі функціонування яких лежать квантові ефекти.

Застосування наноелетроніка знайшла у такому напрямку як наноелектромеханічні системи (НЕМС) – клас пристроїв, які об'єднують в собі електронні і механічні компоненти в нанометровому масштабі (до 100 нанометрів). НЕМС використовуються в якості високочастотних осциляторів (до 10 ГГц), наномоторів і модуляторів. Також наноелоктроніка може використовуватись в галузі запису та зберігання інформації. Як приклад може бути представлено використання нанорозмірних магнітно-твердих плівок.

Отже можливості використання нанотехнологій і наноматеріалів практично невичерпні – починаючи від мікроскопічних комп'ютерів, і закінчуючи автомобільними двигунами, які не засмічують навколишнє середовище. Нанотехнології і наноматеріали на сьогоднішній день знаходяться в дитячому віці, приховуючи в собі великий потенціал. В подальшому вченим належить розширити безліч запитань, пов'язаних з нанонаукою і осягнути її найглибші таємниці. Але, незважаючи на це, нанотехнології вже надають дуже серйозний вплив на життя сучасного людства.

УДК 539.2
Харина Д.О.[1]
[1] студ. гр. М-610м НУ «Запорізька політехніка»

## ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АВІАДВИГУНОБУДУВАННІ

Аналіз загальних тенденцій розвитку авіаційних двигунів і основних орієнтирів США і Євросоюзу в галузі цивільної авіації дозволяють сформулювати цільові показники для пасажирських літаків, які будуть випускатися в період з 2025-2030 років: зниження на 60-70% витрати палива і, відповідно, емісії CO2; зменшення вдвічі рівня сприйманого шуму; забезпечення запасу 75-80% по емісії NOx щодо норм ІКАО 2008 року.

Зазначені цільові показники можуть бути досягнуті тільки при комплексному вдосконаленні планера і силової установки. Дане завдання ускладнюється тим, що на сьогоднішній день завдяки накопиченню величезного експериментального матеріалу і розвитку аналітичних методів рівень аеродинамічної досконалості основних елементів двигуна практично досяг свого граничного значення. Те ж саме можна сказати і про рівні параметрів циклу – ступеня підвищення повного тиску і температурі газу перед турбіною.

Саме тому впродовж ряду років в рамках різних державних програм активно ведеться пошук альтернативних рішень. Одним з таких напрямів є розробка концепцій електричних і гібридних авіаційних двигунів.

Однак прогрес у створенні нових електричних машин, що використовують в тому числі ефекти високотемпературної надпровідності, а також поява легких літій-полімерних акумуляторів вже дозволяють розглядати концепції електричних і гібридних силових установок для малої авіації на першому етапі, а в перспективі і для великих пасажирських літаків.

З відкриттям нових перспектив застосування альтернативних авіаційних двигунів, в рази підвищилися вимоги до акумуляторних батарей. Сучасні акумулятори не тільки не володіють необхідною ємністю, але і не дозволя-

ють швидко віддавати необхідну кількість енергії, яка буде потрібна для оптимальної роботи.

В даний час розробники гібридних схем орієнтуються на літій-іонні і літій-полімерні батареї. Проте, для таких систем потрібні батареї з більшою ємністю і віддачею струму.

Ідея створення акумулятора, одним з основних компонентів якого є повітря, – з'явилася досить давно, але не була до сих пір реалізована. Стрімкі тенденції розвитку авіаційної галузі спровокували великий інтерес до розробки такого типу акумулятора, який обумовлений її рекордним потенціалом: теоретично, щільність заряду на одиницю об'єму, літій повітряного акумулятора, – в десять разів більше, ніж у сучасного літій-іонного акумулятора. Існують різні прототипи літій-повітряних акумуляторів, але всі вони ще далекі від серійного виробництва.

Концепція літій повітряного акумулятора полягає в тому, що замість електроліту, який виступає в якості каталізатора хімічних реакцій і робочого середовища, де ці реакції протікають – батарея використовує окислювач ззовні, і це буде кисень з навколишнього нас повітря. За рахунок цього, акумулятор і буде набагато легше і дешевше літій полімерних акумуляторних батарей. При цьому, запас ходу безпілотного літального апарату, обладнаного літій повітряної батареєю, від однієї зарядки, буде вдвічі-втричі більше, ніж зараз.

Величезна, в порівнянні з літій іонними акумуляторами, щільність заряду літій повітряних акумуляторів, поставить їх один ряд з такими енергоносіями, як бензин, а їх дешевизна (передбачається, що такий акумулятор буде коштувати в 5 разів дешевше літій полімерного акумулятора) дозволить застосовувати їх в будь-який сфері, де необхідні потужні джерела енергії – від домашніх автономних електростанцій і електротранспорту, – до мобільної електроніки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Белоусов А. Н. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / А. Н. Белоусов. – Самара : СГАУ, 2003. – 344 с.

2. Тютрюмов О. С. Новые конструкции необслуживаемых аккумуляторных батарей // О. С. Тютрюмов, Н. И. Курзуков, М. М. Дижур. – М. : НИИ Навтопром, 1979. – 32 с.

3. Чупин Д. П. Обзор метода подбора аккумуляторов в батарею по внутреннему сопротивлению / Д. П. Чупин // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом : междунар. науч.-практ. конф., 7 февр. 2016 г. – Новосибирск : ИЦРОН, 2016. – Вып. 3. – 442 с.

УДК 541.67
Клепач О.В.[1]
[1] студ. гр. М-710м НУ «Запорізька політехніка»

## ФУЛЕРЕНИ, МЕТОДИ ОТРИМАННЯ, ВИДИ, ВЛАСТИВОСТІ

Фулерени – молекулярні сполуки, що належать до класу алотропних форм вуглецю (інші - алмаз, карбін, графіт) і являє собою випуклі замкнені багатогранники, складені із парного числа трикоординованих атомів вуглецю. Фулерени – одна з алотропних форм вуглецю, як і графіт, алмаз чи сажа.

Своєю назвою ці сполуки зобов'язані інженеру та дизайнеру Річарду Бакімнстеру Фуллеру, чиї сферичні конструкції побудовані по цьому принципу.

В молекулах фулеренів атоми вуглецю розташовані в вершинах правильних шести та п'ятикутників, з яких складена поверхня сфери чи еліпсоїду.

Необхідною умовою складу фулеренів є наявність рівно 12 п'ятикутних граней та n/2 – 10 шестикутних граней. При цьому вуглець знаходиться в триваленій формі.

Наразі єдиним способом отримання фулеренів є штучний синтез. Одним з варіантів такого синтезу є використання дугового розряду на графітових електродах, в результаті чого маємо вуглецеву сажу. Така сажа містить чимало випадкових форм різних алотропних форм вуглецю, в тому числі і фулеренів.

Інтеркальовані фулерити, в більш широкому сенсі – солі (комплекси з переносом заряду), аніонами в яких є фулерени. Завдяки порівняно великим розмірам молекул фулеренів, в їх твердих фазах, фулеритах, наявні порівняно великі міжмолекулярні пустоти.

Відомі фулерити таких металів, як натрій, калій, цезій. магній, кальцій, стронцій, барій, ітербій, самарій, європій та інших. Отримання фулерилів може бути засновано на безпосередній взаємодії фулерита (чи розчину фулеритів) із лужними металами, часто – під тиском, електрохімічному допіруванні фулеритів, соосадженні випаряємих металів та фуллерена із газової фази і т.п. Далі, для отримання рівноважних фаз, можуть бути використані різні режими температурної обробки (відпалу).

Властивості фулеренів:

Фулерени мають властивість фотопровідності, напівпровідності, а за деяких умов і надпровідності;

Фулерени мають високою електропроникність, вступають в хімічні реакції як сильні окислювачі

Фулерен – винятково стійка сполука;

Приєднання до С60 радикалів, що містять метали платинової групи, дозволяє отримати феромагнітні властивості на фулерен;

Фулерени мають високу механічну міцність.

В авіабудівництві фулерени можуть бути використані для декількох цілей, як для технологічної обробки на етапі створення частин, так і в якості компоненту матеріалів.

Одним з варіантів застосування фулеренів – створення змащуючих матеріалів, що не втрачають механічні властивості при екстремальних умовах (наприклад, як в камері згоряння чи в компресорі).

Інший підхід дозволяє використовувати частки фулерену для армування матеріалів обшивки за рахунок включення в них часток фулеренів.

Висока площа поверхні та можливість включати в свій склад інші матеріали дозволяє використовувати сполуки фулерену (фулерити та інші) для каталізу реакцій при виробництві частин літака (наприклад, для хімічного шліфування деталей двигуну чи обшивки), або як частина системи спалювання палива.

Використання металфулеренів дозволяє створювати магнітні деталі для приладів навігації та управління літаком.

Також не можна не згадати розробки двигунів, заснованих на надпровідниках. Використання фулеритів в складі високотемпературних надпровідників може зробити такі двигуни більш доступними, а можливість фулеренів бути як надпровідниками, так і просто провідниками за інших умов, на відміну від більшості інших надпровідників, що стають діелектриками, дозволяє експлуатувати подібні двигуни зі сполуками фулерену більш безпечно.

УДК 621.01
Івщенко Л.Й.[1], Білошапка В.С.[2]
[1]проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2]студ. гр. М-610м НУ «Запорізька політехніка»

## ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ

Машинобудування – головна галузь не тільки промисловості, але й усієї сфери матеріального виробництва. Її продукція використовується усіма галузями господарства країни, без неї важко уявити собі життя всього суспільства.

Сучасне машинобудування – наукомістка галузь. Досягнення науково-технічного прогресу впроваджуються насамперед у машинобудівних галузях. Для галузі характерна велика кількість видів продукції, щороку асортимент виробів стає більш широким та досконалим. Це обумовлює перетворення виробів галузі на найбільш масовий товар, який користується постійним попитом у споживачів.

Машинобудування належить до найважливіших видів промислового виробництва, адже визначає його ефективність і розвиток.

Новітні виробництва машинобудування відрізняються наукоємністю. До них належить електроніка, ракето- й роботобудування, атомне машинобудування тощо.

Розвиток науки і техніки зумовив ускладнення машинобудування,

розвиток виробничої спеціалізації та міжнародної кооперації.

Для машинобудування розвинених країн характерні: цілісна структура виробництва, значна частка у виробництві точного машинобудування, висока якість і конкурентоспроможність продукції, орієнтація на експорт.

Сучасні авіадвигуни в цивільній авіації зроблені за аерогідродинамічними і технологічними параметрами. Авіадвигуни сьогодні вже переступили п'ятдесяти тонний рубіж тяги. За рівнем напружень і тепловим станом деталей авіадвигунів практично немає аналогів серед виробів в машинобудуванні. Тому для авіадвигунів найближчого майбутнього заплановано в основному кількісне вдосконалення.

Значна роль тут належить інформаційним технологіям. Вони дозволили створити комплексні багатодисциплінарні розрахункові моделі для дослідження параметрів течії робочого газу, аналізу теплового стану конструкції і розрахунку її напружено-деформованого стану, накопичення ушкоджень та ін. Йде масове впровадження технологій комп'ютерного конструювання і побудови схем двигуна, його елементів і вузлів. При цьому найбільш важким є опис процесів, в яких істотні ефекти нестаціонарності, турбулентності, хімічного реагування, циклічних навантажень і коливань. З нестаціонарністю і турбулентністю пов'язані проблеми шуму і шкідливих викидів, а саме їх і не дозволяють з достатньою точністю вирішувати існуючі в даний час програми. Поки ще не вистачає інтегральних математичних моделей фізичних, газодинамічних та акустичних процесів. Якісні «прориви» в цивільній авіації найближчого часу пов'язуються з продовженням робіт над кріогенними двигунами.

Також перспективою розвитку авіадвигунобудування є спроба створення сімейства двигунів нового покоління тягою 9-18 тонн, яка покликана стати «стрижнем» консолідації вкрай обмежених галузевих науково-конструкторських ресурсів.

Завдяки можливостям промислового інтернету виробники авіаційних двигунів будуть близькі до впровадження на своїх підприємствах «Фабрик майбутнього».

Розвиток авіадвигунобудування має велике значення для розвитку аерокосмічної галузі в цілому. Авіаційна та космічна галузі були і багато в чому залишаться важливим національним надбанням, які поставляють технології у цивільний сектор виробництва. Для забезпечення розвитку галузі авіадвигу-

нобудування необхідно мати професійно підготовлений, надійний, лояльний і позитивно вмотивований персонал. Для подальшого розвитку галузі необхідна пильна увага і допомога з боку держави. При розумному керівництві і вірній маркетинговій політиці дана галузь має всі можливості для подальшого розвитку.

## СЕКЦІЯ «МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ ТА СИСТЕМИ»

УДК 621.891:669
Циганов В.В.[1]
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»

# ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНОХІМІЧНИХ ЯВИЩ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТРИБОЗ'ЄДНАНЬ

Сучасні тенденції підвищення зносостійкості трибоз'єднань припускають широке застосування різних видів мастильно-охолоджувальних рідин (МОР). Проте ще не створена загальновизнана теорія, що пояснює механізм дії середовища на контактні поверхні, особливо у разі експлуатації трибоз'єднань при складному багатокомпонентному навантаженні, у тому числі при обробці металів різанням. Зокрема, у ряді робіт відзначається, що МОР можуть робити не лише позитивну, але і негативну дію на процес різання. Це не дозволяє розробити основи синтезу ефективних МОР.

Існує декілька гіпотез і теорій про механізм дії середовища, заснованих на деформації і руйнуванні металу внаслідок дії адсорбційних ефектів на пластифікацію поверхневих шарів. У даний час для пояснення дії мастил при терті деталей машин і при обробці різанням широко використовуються ідеї фізико-хімічної механіки матеріалів і трибохімії. При цьому велику роль відводять продуктам деструкції високомолекулярних з'єднань МОР з отриманням вільних макрорадикалів, які при взаємодії з киснем стабілізуються на поверхні твердого тіла або викликають ланцюгові реакції. Цей процес прискорюється під впливом дії високих температур і різноспрямованих змінних динамічних навантажень у зоні контакту.

Враховуючи, що вирішальний вплив на ефективність дії МОР роблять розміри атомів і молекул середовища, їх здібності піддаватися термомеханічній дисоціації і адсорбції на поверхнях, що труться, перспективним є застосування полімерних присадок. Аналіз результатів впровадження МОР з полімерними присадками показує, що їх ефективність істотно перевищує ефективність МОР на низькомолекулярній основі. При цьому максимальну здатність до генерації вільних атомів і радикалів мають речовини, що характеризуються неміцним зв'язком між атомами в молекулі, в даному випадку це полімери, що мають у своїй будові бічні ланцюги.

Проведені експериментальні дослідження свідчать про те, що впровадження в зону контакту поліметилметакрилату забезпечує можливість науково обґрунтувати методи інженерії поверхні для керування однорідністю структурного стану поверхневого шару трибоз'єднань і його зносостійкістю при багатокомпонентній термоконтактній дії. У тому числі відмічене підвищення ефективності токарної і фінішної абразивної обробки металів. Проте

велика частина процесів носить феноменологічний характер у зв'язку із складністю багатоплановості і екстремальності умов контакту.

УДК 519.248:621.9.02
Фролов М.В.[1], Глушко П.В.[2]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## ДО ПИТАННЯ ДЕМОНСТРАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ З НУЛЬОВИМИ ВІДМОВАМИ МЕТАЛОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ НЕДОСТАТНОСТІ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ

Існують дві окремі групи випробувань в межах процесу оцінки надійності технічних об'єктів: випробування для забезпечення надійності та випробування для демонстрації надійності. Випробування для демонстрації надійності полягають в перевірці, чи відповідає об'єкт мінімально-встановленим вимогам до надійності [1].

Одним з видів демонстраційних випробувань є випробування з нульовими відмовами, що в англомовній літературі мають назву "No Failure Tests" чи "Zero Failure Tests" за якими протягом певного часу не повинен відмовити жодний з n зразків [1]. При плануванні демонстраційних випробувань перш за все постає питання визначення кількості зразків та часу випробовування які між собою пов'язані та вибір між якими постає частіше з суто економічних питань, коли треба співставляти вартість одиниці часу випробувань та вартість зразка – більше зразків випробовувати менше часу чи менше зразків – більше часу. При оцінці надійності металорізального інструменту особливе місце займає розподілення Вейбулла завдяки своїй універсальності [2, 3, 4]. При цьому основним рівнянням, з якого можуть бути як визначені параметри демонстраційних випробувань так і оцінені параметри розподілення, є наступне [1]:

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

де: t – час випробування; β – параметр масштабу або характеристичний час; α – параметр форми; n – кількість зразків; q – довірча імовірність або риск споживача.

Для планування демонстраційних випробувань, як видно з рівняння (1) треба знати параметри розподілення. Для оцінки параметру форми може бути

використано просте рівняння, що пов'язує цей параметр з коефіцієнтом варіації V [4]:

$$\alpha = 1/V \tag{2}$$

Аналізуючи значення коефіцієнта варіації стійкості металорізального інструменту в нормальних умовах експлуатації [2, 3], можна прийти до висновку, що він в переважній більшості випадків буде знаходитися в межах 0,2 … 0,35. Менші значення будуть спостерігатися при роботі інструменту в екстремальних умовах, а більші – при його незадовільній якості. Тобто за рівнянням (2) параметр форми буде мати орієнтовні значення від 3 до 5. Ці значення відображають фізичну сутність відмов металорізального інструменту і відносяться до таких, що спричиняються втомним руйнуванням, а також руйнуванням внаслідок швидкого зносу [5].

З аналізу рівняння (1) відносно довірчої імовірності, з урахуванням зазначених вище спостережень, було отримане емпіричне рівняння (3) для визначення часу випробовування n зразків, при якому буде забезпечена мінімальна довірча імовірність 0,8:

$$t \geq L_{\gamma} \frac{1.2}{\sqrt[3]{(1-\gamma)n}} \tag{3}$$

де: Lγ – час роботи інструменту з імовірністю безвідмовної роботи γ, що має бути продемонстрований протягом випробувань.

Треба зазначити, що за рівнянням (3) кількість зразків може бути прийнято в залежності від γ. Так при γ = 0,95 – n ≤ 40; при γ = 0,90 – n ≤ 20, а при γ = 0,7 – n ≤ 10.

Таким чином рівняння (3) можна використовувати для попереднього планування демонстраційних випробувань металорізального інструменту з нульовими відмовами при недостатності статистичних даних для більш точної оцінки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Luko, S. N. Weibull analysis with assumed Weibull slope where no failures are observed: SAE technical paper series [Text] / S. N. Luko. – Milwaukee, WI: SAE International, 1998. – 9 p.

2. Тивирев, Е. Г. Критерии оценки эксплуатационного ресурса инструмента [Текст] / Е. Г. Тивирев, К. Б. Даниленко // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 112–120.

3. Анцев, А. В. Оценка стойкостной зависимости методом максимального правдоподобия [Текст] / А. В. Анцев, Н. И. Пасько // Известия ТулГ. Технические науки. – 2017. – Т. 2, № 8. – С. 129–138.

4. Frolov, M. Variation Coefficient and Some Distribution Laws in the Context of Cutting Tools and Other Technical Objects Reliability Modeling [Text] / M. Frolov // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham: Springer, 2018. – P. 13–22.

5. Abernethy R. B. Weibull analysis handbook [Text] / R. B. Abernethy, J. E. Breneman, C. H. Medlin, G. L. Reinman. – West Palm Beach, FL : Pratt & Whitney Aircraft, 1983. – 228 p.

УДК 621.9.06
Солоха В.В.[1]
[1] доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ВПЛИВ СХЕМИ ЗАКРІПЛЕННЯ ШПИНДЕЛЬНОЇ БАБКИ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА НА ТЕМПЕРАТУРНІ ДЕФОРМАЦІЇ ОСІ ШПИНДЕЛЯ

Температурні деформації шпиндельного вузла токарного верстата можуть явитися тим чинником, що обмежує отримання належної точності обробки, особливо для верстатів, що працюють за попередньо налаштованими розмірами, такими як верстати з ЧПК та верстати автомати.

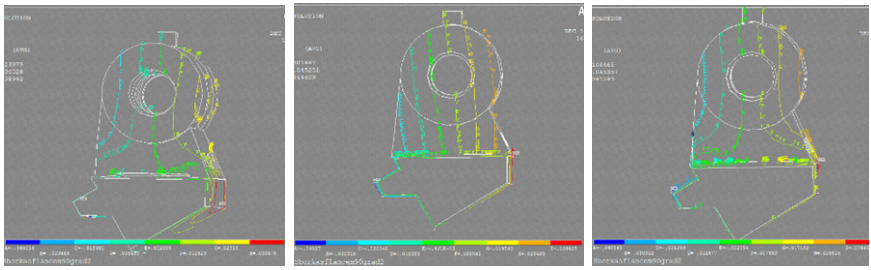
Характер температурних деформацій шпиндельної бабки може впливати на точність розмірів, що отримуються в ході обробки та на точність форми обробленої поверхні. Порушення точності форми спостерігається в разі викривлення або перекосу осі шпинделя, що відбувається внаслідок нерівномірного розподілу температури по тілу шпиндельної бабки та умов закріплення бабки на станині.

В процесі монтажу шпиндельної бабки на станині вона фіксується штифтами для забезпечення вірного положення осі шпинделя і закріплюється гвинтами. Кількість та схема розташування штифтів може суттєво впливати на характер температурних деформацій шпиндельної бабки і положення осі шпинделя [1]. Розміщення штифтів обмежує температурні зсуви в площині стикування шпиндельної бабки і станини.

Дослідження характеру температурних деформацій шпиндельної бабки, розміри і форма якої оптимізовані з погляду термосиметрії, для різних умов закріплення на станині виконувалося за допомогою методу скінчених елементів. Розглядалося три варіанти умов на стику: фіксування бабки штифтами, встановленими біля передньої стінки бабки; закріплення бабки за допомогою 6 гвинтів та одночасне фіксування і закріплення гвинтами.

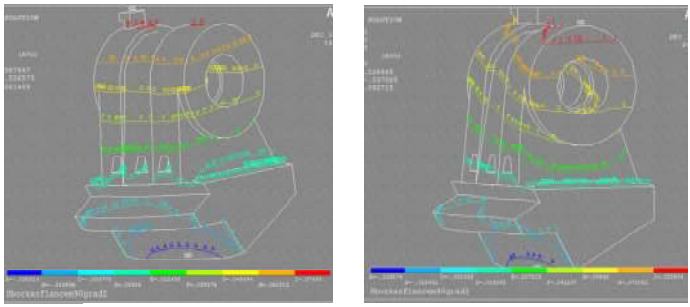
Результати аналізу деформацій за віссю X наведені на рис. 1. Характер деформацій для 1 і 3 варіантів подібні, що свідчить про вплив штифтів на

деформації шпиндельної бабки. Для 2 варіанту бабки деформується більш рівномірно, але зсув осі шпинделя за віссю X буде більшим (близько 2 мкм для 1 і 3 варіантів та близько 9 мкм для варіанту 2). Характер температурних деформацій за віссю Y (рис. 2) для варіанту тільки з закріпленням гвинтами більш рівномірний за довжиною бабки ніж для варіанту з закріпленням гвинтами і фіксуванням штифтами. В останньому випадку вісь шпинделя на передньому кінці в порівнянні з заднім кінцем піднята майже на 15 мкм, що зумовлюватиме виникнення похибки форми оброблюваної деталі.



а б в

а – бабка зафіксована штифтами; б – бабка закріплена гвинтами;
в – бабка зафіксована штифтами і закріплена гвинтами.
Рисунок 1 – Температурні деформації шпиндельної бабки за віссю X.



а б

а – бабка закріплена гвинтами;
б – бабки зафіксована штифтами і закріплена гвинтами.
Рисунок 2 – Температурні деформації шпиндельної бабки за віссю Y.

Висновки. Встановлення шпиндельної бабки токарного верстата на станині з фіксуванням штифтами та закріпленням гвинтами знижує температурні деформації осі шпинделя в горизонтальній площині в напрямку інструмен-

та та дозволяє корувати їх напрямком, тоді як закріплення гвинтами без штифтів спричиняє деформації більш рівномірні по об'єму бабки, що усуває викривлення або перекіс осі шпинделя. В цьому сенсі доцільно розглядати можливість видалення штифтів після закріплення бабки на станині.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Солоха, В. В. Влияние схемы закрепления на температурные деформации шпиндельной бабки [Текст] / В. В. Солоха // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков : ХГПУ. – 1998. – № 52. – С. 190–194.

УДК 621.431.75
Івщенко Л.Й.[1], Танченко С.В.[2]
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ СТОСОВНО НАПРЯМНИХ КОВЗАННЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Напрямні є одними з найбільш відповідальних вузлів металорізальних верстатів. Збереження їх форми та розмірів в процесі експлуатації в значній мірі визначає забезпечення показників точності обробки на верстаті в цілому.

Деталі трибоз'єднань плоско-паралельних трибологічних систем металообробного обладнання «рухома напрямна - змащуюче середовище - нерухома напрямна» в процесі експлуатації знаходяться в умовах складного динамічного навантаження, обумовленого їх взаємними реверсивними переміщеннями та комплексною дією змінних динамічних навантажень, як то вібрацій, ударів, змінних складових сили різання та інш.

Дослідження комплексної дії різних видів коливань на довговічність деталей трибоз'єднань при складному динамічному навантаженні грунтуються на принципі моделювання контактної взаємодії поверхонь у трибоз'єднаннях.

Оскільки випробування на натурних моделях (верстатах) на етапі дослідження практично неможливі, розроблена фізична модель контактної взаємодії деталей відповідних трибоз'єднань.

Для реалізації запропонованої фізичної моделі розроблено проект модернізації трибометра ТММ-32А, який передбачає накладання на експериментальні зразки одно- та багатокомпонентних лінійних коливальних навантажень, а також контроль режиму мащення у парах тертя. За даним проектом було отримано патент на корисну UA133412U.

Беручі до уваги те, що напрямні металообробного обладнання під час роботи знаходяться під дією складної схеми динамічного навантаження, а також в умовах забруднення та абразивного зносу, можна зазначити, що одним з перспективних технологічних напрямків підвищення зносостійкості напрямних є формування захисних багатошарових структур на контактуючих поверхнях, що здатні знижувати інтенсивність протікання процесів руйнування.

Розробка багатошарових ремонтних покриттів для трибовузлів напрямних диктує необхідність ретельного дослідження механізмів зношування, встановлення зв'язку між кінематикою, динамікою трибоситем та величиною накопичених у ній пошкоджень, виявлення внеску кожного з факторів, що викликають ушкодження матеріалу поверхонь деталей напрямних, розкриття закономірностей виникнення масляного голодування у трибосистемі як одного з факторів збільшення інтенсивності зношування.

Для дослідження тертя та зношування полімерних матеріалів за умови абразивного зносу при динамічному контактному навантаженні було розроблено модель установки для проведення випробувань, за якою було отримано патент на корисну модель UA146697U.

Результатом досліджень, які будуть проведені з використанням вказаних пристроїв стане розкриття механізму зношування у трибосистемі «рухома напрямна-змащувальне середовище-нерухома напрямна» за умов динаміки навантаження та формулювання вимог до покриттів для поверхонь напрямних, що відновлюватимуться.

УДК 621.9.2
Івщенко Л.Й.[1], Бойко І.А.[2], Деменко Д.В.[3]
[1] проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] інж. АТ «Мотор Січ»
[3] асп. НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ОКРЕМИХ ВУЗЛІВ ТА ВАРІАТИВНОСТІ ЇХ КОМПОНОВОК

У ринкових умовах важливого значення набуває випуск конкурентоспроможної продукції, що досягається за рахунок забезпечення її високої якості і зниженням собівартості її виробництва. Досягнення цих показників значною мірою пов'язане з технологічним обладнанням, що використовується при виготовленні продукції. Технологічне обладнання, насамперед металорі-

зальні верстати, повинні мати високу гнучкість, надійність і забезпечувати високу точність обробки.

Особливо актуальним це стає на порозі вступу людства в еру четвертої промислової революції (Industry 4.0) [1], яка характеризується всебічною діджиталізацією промислового виробництва і проявляється у широкій автоматизації, роботизації і концентрації виробничих процесів, необхідності обробки безпрецедентних обсягів інформації, використанні інтернету, штучного інтелекту, зниженні шкідливого впливу виробництва на зовнішнє середовище, продуктивності праці, тощо.

В умовах сучасного машинобудування, коли зміна об'єктів виробництва відбувається швидко, використовуються гнучкі технологічні процеси. Концепція сучасних технологічних процесів потребує оптимізації технологічних систем за багатьма критеріями, акцентуючи увагу на здатності цих систем швидко, точно та ефективно адаптуватися під поставлені виробничі задачі. Такі технології потребують використання спеціального технологічного обладнання з високим ступенем автоматизації, яке б в умовах серійного виробництва забезпечувало продуктивність, наближену до умов масового виробництва.

Одним з напрямків оптимізації технологічних процесів, є концентрація технологічних операцій. Виготовлення деталей з меншою (оптимальною) кількістю технологічних операцій надає ряд переваг, до яких можна віднести скорочення допоміжного часу обробки, зведення до мінімуму кількості переналагоджень обладнання, що неодмінно призведе до підвищення якості і точності обробки.

Для збереження конкурентної спроможності виробів, промислові підприємства проводять модернізацію технологічного обладнання. Враховуючи високу вартість сучасних верстатів з ЧПК, для їх окупності необхідно, щоб технологічне обладнання забезпечувало високу продуктивність обробки, багатофункціональність, універсальність, високу варіативність конструкцій, досягнення якої реалізується через співвідношення значущості критеріїв: продуктивності обробки, роботоспроможності обладнання та економічної доцільності його застосування, а також якості обробленої поверхні.

Всебічний перехід на агрегатно-модульний принцип побудови верстатів з ЧПК дає змогу виконувати часткову модернізацію технологічного обладнання, зокрема заміну певних вузлів (модулів), для розширення технологічних можливостей верстата в цілому. Для забезпечення ефективності модернізації, необхідне дотримання певного алгоритму.

Оскільки модернізація діючих верстатів з ЧПК виконується для обробки конкретної номенклатури деталей та виконання конкретних технологічних завдань, першочерговим етапом є вибір необхідних складових верстата або його параметрів, що підлягають удосконаленню. Наприклад, збільшення зони

обробки для можливості виготовлення габаритних деталей, збільшення ємності магазину для постановки різних типів інструментів, збільшення кількості рухомих осей для можливості обробки деталей одночасно у декількох координатах, тощо.

Другий етап являє собою математичний розрахунок обраного вузла, що ґрунтується на його технічних характеристиках та експлуатаційних можливостях, що визначаються експериментально в процесі обробки. На основі цих даних, визначається параметр розрахованого вузла, що підлягатиме оптимізації.

На наступному етапі розглядається можливість оптимізації параметра обраного вузла для покращення його характеристик, або проектування та виготовлення додаткових різноманітних конструктивних елементів для механічного стикування з базовими деталями верстата, що модернізується.

Часткова модернізація окремих модулів не має чинити негативний вплив на інші вузли чи технічні характеристика верстата. Наприклад, збільшення ємності магазину інструментів не повинно виконуватися за рахунок скорочення робочої зони обробки верстата; збільшення ваги певного вузла за рахунок оптимізації конструкції, не повинно чинити вплив на жорсткість системи верстата в цілому, тощо.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов, Ю. Н. Вызовы четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» перед учеными [Текст] / Ю. Н. Кузнецов // Вестник ХНТУ. – 2017. – № 2 (61). – С. 67–75.

УДК 621
Матвєєнко Л.С.[1], Первєєв Д.В.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-219сп НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗРОБКА ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ СВЕРДЛІННЯ З ПІДВИЩЕНОЮ ТОЧНІСТЮ

Під час обробки металів різанням застосування пристосувань з підвищеною точністю є однією з складових технологічного процесу. Пристосування застосовуються на різних технологічних етапах виробництва, де потребується жорстка фіксація деталей та вузлів. В залежності від цього пристосування бувають наступних видів: верстатні; пристосування для встановлення та закріплення робочого інструменту; складальні пристосування для з’єднання деталей в вузли та вироби; контрольні пристосування. Найбільшу

популярні серед них верстатні пристосування, важкість та габарити яких, залежать від типу технологічного процесу, конфігурації деталі, що виготовляється, а також серійності виробництва.

Для свердлильних верстатів використовують кондукторні втулки у якості головної складової пристосування. Аналіз типових конструкцій вказує, що конструктивні елементи які слугують для встановлення та затиску заготовки, направлення інструменту та виконання інших функцій впливають на базування деталі, що в свою чергу впливає на точність оброблюваної деталі.

В розробленому верстатному пристосуванні для свердління з підвищеною точністю деталь базується на змінному пальці з упором на високоточну поверхню, яка забезпечує збалансоване розташування заготовки. При подачі стислого повітря в нижню порожнину пневмоциліндру шток переміщується в гору та розкріпляє деталь, знімається швидко змінна шайба. Завдяки цьому є можливість швидко замінити деталь. Для закріплення деталі повітря подається в верхню порожнинну пневмокамери. Розроблений пристрій за допомогою шпонок встановлюється на столі верстата та закріплюється на чотири бовти.

Застосоване технічне рішення дозволяє в умовах виробництва не використовувати кондукторні втулки, що спрощує конструкцію пристосування та вибір інструменту для обробки деталі. Завдяки цьому на одному пристосуванні можливо виконати декілька операцій без зміни базування деталі.

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

УДК 621.874: 539.3
Лятуринський В.О.[1], Ігнатенко В.Є.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Мз-310м НУ «Запорізька політехніка»

# ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРУЖЕННЯ В ЗВАРНИХ КОРОБЧАСТИХ БАЛКАХ

Зварні балки коробчастого перетину на сьогодні є найбільш поширеним типом прольотних будов кранових металоконструкцій (МК). У розрахунках даних балок наявність і розташування діафрагм не враховується. Автори [1 та ін.] Проводили дослідження з визначення деформацій і залишкових напружень (ЗН) коробчастих балок (КБ) від накладення поясних швів. Сумарний вплив від накладення шва приварки діафрагми і поясного шва раніше не розглядався. Необхідні науково-обґрунтовані рекомендації з приварки діафрагм КБ.

У дослідженні використовувався числовий метод кінцевих елементів (КЕ). Моделювання проводитися в два етапи: термічний і механічний. Детально використовувана методика моделювання була описана авторами в [2], одержувані результати добре корелюють з результатами експериментів, що було показано в [2].

Для дослідження було створено кілька конфігурацій КЕ моделей КБ (рис. 1). Були отримані картини напружень для декількох розрахункових випадків (табл. 1).

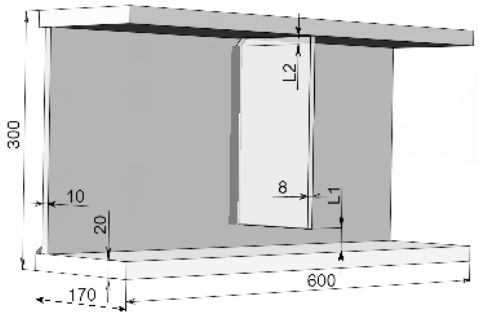



Рисунок 1 – Розміри коробчастої балки, що розраховувалася.

Таблиця 1 – Розраховані моделі балки

| № моделі | Поясний шов | Зазор L1, мм | Вікно L2, мм | З'єднаність діафрагми і поясу | Послідовність зварювання (п – поясний шов, д – шов діафрагми) | Час між накладанням швів, с |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |
| 1 | нижн. | 0 | 0 | + | д, п | 1300 |
| 2 | нижн. | 12 | 10 | + | д, п | 1300 |
| 3 | нижн. | 20 | 0 | + | д, п | 1300 |
| 4 | нижн. | 35 | 10 | + | д, п | 1300 |
| 5 | нижн. | 50 | 10 | + | д, п | 1300 |
| 6 | верхн. | 10 | 0 | + | д, п | 1300 |
| 7 | верхн. | 10 | 7 | + | д, п | 1300 |
| 8 | верхн. | 10 | 20 | + | д, п | 1300 |
| 9 | верхн. | 10 | 7 | - | п, д | 1300 |
| 10 | верхн. | 10 | 7 | + | п, д | 1300 |
| 11 | верхн. | 10 | 7 | - | д, п | 1300 |
| 12 | нижн. | 20 | 10 | + | д, п | 0 |
| 13 | нижн. | 20 | 10 | + | д, п | 250 |
| 14 | нижн. | 20 | 10 | + | д, п | 600 |

В результаті дослідження було встановлено:

1. Величина зазору між діафрагмою і нижнім поясом значно впливає на ЗН в локальній зоні стінки під діафрагмою. Тут є високі несприятливі для цієї ділянки поздовжні ЗН розтягу. Для подібних КБ можна рекомендувати зазор під діафрагмою не менше 35 мм.

2. Катет верхніх підрізів діафрагми впливає на ЗН подібно нижньому зазору. Зв'язаність діафрагми з верхнім поясом значно розвантажує стінку в вертикальному напрямку. Щоб уникнути надмірних напружень і пластичних деформацій катет L2 (рис. 1) повинен бути більше 18 мм.

3. Встановлено переважаючий вплив останнього з накладених швів на загальну картину ЗН. Для кранових КБ можна рекомендувати накладення верхнього поясного шва останнім.

4. Період охолодження конструкції між послідовним накладенням швів істотно впливає на картину ЗН, а також на величину пластичних деформацій. Встановлено, що одночасне накладення поясного шва і шва діафрагми сприяє 2-х кратного зниження максимальних ЗН і 1,5 кратного зниження рівня пластичних деформацій в небезпечній зоні двох близько розташованих швів стінки КБ.

5. Джерело теплової енергії [3] показало свою високу ефективність для моделювання зварювання методом КЕ. Достатнім критерієм для коригування розподілу енергії даного джерела можна визнати розмір і форму результуючої зварювальної ванни в моделі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вершинский А. В. Технологичность и несущая способность крановых металлоконструкций / А. В. Вершинский. – М. : Машиностроение, 1984. – 167 с.

2. Лятуринский В. А. Моделирование послесварочного напряжённо-деформированного состояния коробчатых крановых балок с криволинейными швами / В. А. Лятуринский, М. В. Сидоренко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. – № 2. – С. 130–138.

3. Goldak J. A new finite element model for welding heat sources / J. Goldak, A. Chakvanati, M. Birbby // Metallurgical transaction B. – 1986. – Vol. 15b. – P. 299–305.

УДК 631.3

Мартовицький Л.М.[1], Глушко В.І. [1], Костюк А.С.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-317 НУ «Запорізька політехніка»

## ГРЕЙФЕРИ З МАГНІТОМ ДЛЯ ПЕРЕВАЛКИ МЕТАЛЕВОГО СКРАПУ

Перевалка насипних вантажів в світі, особливо важких (руди, металолом, гірські породи та ін.), набувають все більшого поширення. Грейфери – це автоматичні вантажозахоплюючі пристрої, які можуть працювати із спеціальним вантажопідйомним краном без участі людини.

Конструкції грейферів удосконалюються в напрямку продуктивності, спеціалізації, безпечності. Не зважаючи на вузьке призначення грейферів для роботи з конкретними вантажами, великі роботи ведуться в напряму універсалізації та розширення функцій грейферів. Одним із напрямків розширення можливостей грейферів, з метою підвищення зачерпуючої спроможності групи сипких матеріалів, є застосування інтелектуальної технології заповнення грейфера. Інтелектуальна система оптимізує ступінь наповнення грейфера, причому володіє властивістю до самонавчання. Дякуючи цьому заповнення грейфера в процесі роботи збільшується, та в той же час виключаються перевантаження. Зазвичай об’єм грейфера заповнений всього на 70% із-за неоптимальних кутів захоплення вантажу та різної щільності матеріалу.

Практично всі крановщики погано розуміють, як треба керувати грейфером з урахуванням цих двох параметрів, з цього приводу вимушені застосовувати грейфери різного типу для роботи з різними матеріалами. Тому розроблено електронний продукт – модель ідеального наповнення грейфера різними за щільністю матеріалами. Програма володіє здатністю до самонавчання.

Іншим напрямом розширення функціональних можливостей та продуктивності грейфера є його оснащення магнітом. Пристрій являє собою багатощелепний грейфер, в середині якого розміщено круглий електромагніт. Такий грейфер працює набагато ефективніше звичайного грейфера або електромагніта окремо.

В одному пристрої поєднані два окремих елементи - електромагніт та багатощелепний грейфер. Вказане поєднання особливо ефективне при роботі з феромагнітними матеріалами, металевим ломом, чорним скрапом.

Продуктивність грейферів з магнітом на 30% вища, безпечність роботи при перевалці скрапа суттєво збільшується.

УДК 621.867.32
Руднєв О.М.[1], Подоляк С.М.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-310м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОВШІВ КОВШОВОГО КОНВЕЄРА НА ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Ковшові конвеєри набули широкого поширення через можливість переміщати вантаж як вертикально так і горизонтально, однак при роботі на хімічних підприємствах на ковші впливає як циклічне теплове навантаження так і контакт з хімічними речовинами, даними факторами не можна нехтувати при проектуванні ковшів.

Зварне з'єднання суттєво впливає на міцність і довговічність ковшів. При зварюванні частина металу, яка знаходиться в зоні термічного впливу, здобуває загартовані структури, це створює преднапружений стан в з'єднанні та знижує загальний запас пластичності, що в сукупності з градієнтом температур може призвести до зароджування та розкриття тріщин. Другим недоліком зварних з'єднань є чужорідні включення та пори. Так як метал та чужорідні включення мають різний коефіцієнт теплового розширення, це призводить до додаткових напружень, та підвищує загальну пористість у зварному з'єднанні. Пори також погіршують загальну ситуацію, так як вони є концентраторами напружень, і саме з них розпочинається зародження тріщини.

При підвищенні температури хімічна корозія прискорюється, це ослаблює конструкції що в сукупності з циклічними коливанням ковша при русі і ударами при розвантаженні призводить до руйнування.

Рекомендації для підвищення довговічності роботи ковшів:

1. Підвищити якість зварних з'єднань.

2. Для виготовлення ковшів використовувати сталі з великим відносним подовженням.

3. Проводити рекристалізаційний відпал.

На довговічність та працездатність ковшів впливають багато чинників, а саме термо-циклічне навантаження, циклічне і ударне навантаження, корозія, якість металу та зварних з'єднань. Це призводить до великих похибок у розрахунку на довговічність. Так як ковшові конвеєри на хімічних підприємствах є частиною технологічного процесу, для зменшення простоїв треба збирати статистичні данні, та уточнювати терміни технічних оглядів конвеєра.

УДК 678.02:621.365
Задоя Н.О.[1], Гришко В.Д.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-317 НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗМІЦНЮЮЧОЇ ОБОЛОНКИ БАКА ДІАФРАГМОВОГО

Робота присвячена інтенсифікації процесів твердіння та підвищенню фізико-механічних властивостей тонкостінних органопластиків конструкційного призначення з використанням радіаційних методів твердіння. Встановлено, що радіаційна обробка прискореними електронами є найбільш швидким способом твердіння композитів, який не створює технічних труднощів.

У роботі проведено експериментальне дослідження процесів радіаційного твердіння, яке показало, що фізико-механічні характеристики органопластику на сполучному ЕДТ-10 підвищуються до 15% при обробці прискореними електронами із дозою опромінення 80 Мрад. У роботі також розроблена технологія комбінованого твердіння органопастику, що поєднує попередній інфрачервоний нагрів та доотвердіння композита прискореними електронами. При цьому показники міцності збільшилися до 20% при скороченні тривалості процесу твердіння з 8 годин до 16 хвилин.

Встановлено, що найменша кількість пор в органопластику спостерігається при твердінні матеріалу комбінованим способом. Запропоновано механізми впливу радіаційної обробки на процеси формування полімеру. Результати проведених досліджень показали, що застосування радіаційних методів твердіння сприяє підвищенню фізико-механічних характеристик і значно

інтенсифікує процес твердіння органопластиків конструкційного призначення.

У роботі також розглянуто застосування комплексного методу радіаційного твердіння для удосконалення технології виготовлення елементів модельної конструкції оболонки бака діафрагмового.

Розроблено технологію формування модельної конструкції зміцніючої оболонки бака діафрагмового товщиною 4 мм із органопластика на основі ЖСВМ і епоксидного сполучного ЕДТ-10, що включає радіаційне твердіння комбінованим способом. Фізико-механічні характеристики зміцніючої оболонки бака отвердженого по запропонованим режимам збільшилися до 20% в порівнянні зі штатною технологією.

УДК 621.762.4
Носенко М.І.[1], Базаря В.С.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-310м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ ДЕФОРМАЦІЇ ПОРОШКОВОГО ТИТАНУ

Величина опору деформації $\sigma_S$ є складовою в теоретичних або емпіричних залежностях розрахунку енергосилових показників процесів обробки металів тиском. Тому визначення впливу параметрів термомеханічного режиму деформації на $\sigma_S$ порошкового титану має важливе значення для теорії і практики порошкової металургії.

Для визначення $\sigma_S$ проводили осадку холоднопресованих заготовок ПТЕС-1, ПТЕК-1 циліндричної форми діаметром $28 \cdot 10^{-3}$ м (Н/Д =1.0) з відносною щільністю $\theta_0 = 70 - 90\%$. Ступінь деформації визначали залежністю $\varepsilon_0 = (h_0 - h)/h_0$, де $h_0, h$ – вихідна та текуча висота заготовки. Нагрів заготовок $(T = 700 - 1000°C)$ проводили в середовищі аргону. Досліджуємий інтервал швидкостей деформації $(V = 5 - 10c^{-1})$ забезпечували використанням стандартного ковальсько-штампувального обладнання.

За отриманими при осадці експериментальними даними визначено залежності опору деформації. Збільшення ступіня $\varepsilon_0$ і швидкості $V$ деформації, вихідної щільності заготовки $\theta_0$, а також зменшення температури нагріву $T$ призводить до зростання $\sigma_S$. Отримані діаграми $\sigma_S = f(\theta_0, \varepsilon_0, V, T)$ ілюструють характер зміни опору деформації порошкового титану залежно

від вихідної щільності заготовки та означених параметрів термомеханічного режиму.

УДК 691
Волков Г.П.[1], Базаря В.С.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-310м НУ «Запорізька політехніка»

## ПЕРСПЕКТИВИ ТЕХНОЛОГІЇ НЕАВТОКЛАВНОГО БЕТОНУ

Ринок пористого бетону зростає з кожним роком, розширюючи асортимент споживчої продукції. Вироби з пористого бетону широко використовуються як в Україні так і за кордоном в якості стінового матеріалу та звуко- і теплоізоляції. Цей сучасний будівельний матеріал, має високі споживчі характеристики і, безумовно, буде і в подальшому вироблятися у великих об'ємах. З ростом досвіду у виробництві пористого бетону природньо виникають питання про здешевлення виробництва за умов збереження якісних показників. На даний час існують два види пористих бетонів, які відрізняються між собою складом вихідних компонентів і технологіями їх виробництва. На даний момент існують різні погляди на якість і ефективність використання обох типів пористого бетону. Кожна сторона наводить свої аргументи, показуючи переваги своєї технології, і перебільшуючи недоліки іншого. Коротко проаналізуємо обидві технології, упускаючи відмінності в складі вихідної сировини, що в даному випадку не є визначальним.

Автоклавний газобетон отримують в результаті твердіння силікатної суміші в результаті впливу високої температури (120…200 $^{o}$C) і тиску (1,4 МПа) в процесі обробки в спеціалізованому обладнанні – автоклаві. Сировиною для виробництва газобетону є: вапно, цемент, мінеральний заповнювач, вода і газоутворююча добавка - алюмінієва пудра. Кінцевим етапом виробництва є автоклавне твердіння.

Для пінобетону (неавтоклавного газобетону) процес виготовлення трохи відрізняється. При його виробництві в цементний розчин додають реагент у вигляді готової піни (мильної емульсії), що містить величезну кількість бульбашок повітря. При ретельному змішуванні бетон ставатиме пористим і після застигання зберігає цю структуру. Процес твердіння відбувається природнім шляхом в нормальних умовах, або з використанням підігріву до невеликих температур. Даний метод носить назву гідратаціонного твердіння

Для виробництва автоклавного газобетону потрібно дуже дороге обладнання, великі енерговитрати і виробничі площі. Тому рентабельність цієї технології стає очевидною тільки при великому обсязі виробництва. Це головний мінус виробництва автоклавного газобетону.

Напротивагу цьому неавтоклавний бетон стає найбільш привабливим для малобюджетного виробництва або виробництва на місці споживання. Це б виключало витрати на транспортування і зберігання готової продукції. Критики цієї технології посилаються на низьку якість продукції яка виробляється таким шляхом. Проте, наводять в якості своїх аргументів випадки порівняння своєї продукції з бракованими партіями конкурентів, які виготовлялись без належного додержання технології. Вважаємо, що удосконалення та строге додержання технології виробництва дозволить виготовляти пінобетон належної якості і по неавтоклавний технології. Зокрема, це стосується введення до складу робочої суміші модифікуючих тонкодисперсних добавок, які збільшують концентрацію твердої фази в структурі бетону, ступінь гідратації і заповнюваності вільного порового простору.

Технологія неатоклавного виробництва потребує удосконалення для підвищення якості продукції. Це може бути пов'язано з впровадженням обладнання для точного дозування складових компонентів. Доцільно розглянути питання про централізоване фасування та поставку компонентів на ділянку виробництва в разовій упаковці. Це крім підвищення якості продукції знизить обсяг ручної праці і в цілому прискорить виробництво.

УДК 621.874.7
Фролов Р.О.[1], Сакун О.В.[2], Подоляк С.М.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-310м НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗРОБКА МОНТАЖНИХ ПРИСТОСУВАНЬ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПОЛЯРНОГО КРАНА

В Україні із 15 діючих атомних енергоблоків 13 відносяться до типу ВВЕР-1000. Даний тип енергоблоків обладнаний мостовим краном кругової дії великої вантажопідйомності 320 або 360 т. Його особливість полягає у тому що він працює у гермо-об'ємі блоку, монтується на етапі будівництва та мусить працювати весь період експлуатації блоку. Найдовший період експлуатації блоку завершується у 2037 році, та можливо буде продовжений за результатами перевірки комісії з МАГАТЕ. Тривалий період експлуатації призводить до необхідності проведення планових ремонтів, та модернізацій полярного крана через зміну технологічного процесу роботи блоку. Тому для монтажних пристосувань що застосовуються на АЕС можна сформулювати узагальнені вимоги:

- габаритні розміри складових елементів монтажного обладнання повинні задовольняти умовам безпечного проходження транспортного коридору;

- маса складових елементів має бути якомога менша, через відсутність вантажопідіймальних пристроїв великої вантажопідйомності над полярним краном;

- пристрої мають бути простиму у використанні, швидко монтуватися й демонтуватися, тому що час простою блоку під час проведення планово-попереджувального ремонту обмежений;

- виконання всіх робіт по модернізації мостового крана в умовах герметичного об´єму АЕС може бути тільки за умови беззаперечного дотримування вимог і засад основоположного документа «Закону України «Порядок проведення спеціальної перевірки для надання фізичним особам допуску до виконання особливих робіт на ядерних установках з ядерними матеріалами, радіоактивними відходами, іншими джерелами іонізуючого випромінювання», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 25.12.1997р. №1471».

Такий підхід до проектування дозволить знано скоротити час та матеріальні ресурси при проведенні ППР. Вся інформація приведена вище отримана із відкритих джерел, не містить державної таємниці та може бути опублікована у відкритому доступі.

УДК 631.3
Мартовицький Л.М.[1], Глушко В.І.[1], Сочава А.І.[1], Шаніна З.М.[1]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ГРЕЙФЕРІВ ДЛЯ ВАЖКОЗАЧЕРПУЄМИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

При проектуванні грейферів для сипких матеріалів вирішальним питанням є розподіл мас між його елементами. Від цього залежить ефективність зачерпування конкретних матеріалів, продуктивність перевалочних робіт та зносостійкість його ріжучих частин та внутрішніх поверхонь щелеп.

Зазвичай будь-який канатний грейфер складається із щелеп, з'єднуємих нижньою траверсою з блочною коробкою, верхньої траверси з блочною коробкою, яка з'єднується зі щелепами жорсткими тягами. Верхня і нижня траверси між собою стягуються канатним поліспастом.

Під час роботи грейфер, порожній або повний, піднімається і опускається канатами окремою підйомною лебідкою. Друга лебідка механізма підйому крана служить для закриття щелеп при зачерпуванні матеріалу, і для розкривання щелеп при їх розвантаженні.

Під час зачерпування сипкого матеріалу щелепи занурюються в штабель і далі закриваються наповнюючись матеріалом. Ефективність зачерпування залежить від величини та розподілу мас серед елементів грейфера.

Маса верхньої траверси та маси тяг впливають на зачерпуючу здатність грейфера. Але в той же час високе їх розміщення знижує стійкість грейфера на штабелі за рахунок зміщення центра ваги, а також зменшує визначеність та керованість грейфера під час роботи.

Для усунення впливу маси верхньої траверси та мас тяг на процес зачерпування грейфера рекомендується замінити жорсткі тяги ланцюгами такої ж довжини. Всю активну масу грейфера слід зосередити на щелепах та нижній траверсі. Причому, переважну масу щелеп доцільно зосередити в донних листах та деформаторах щелеп (зубцях).

Це конструктивне вдосконалення підвищить зачерпуючу здатність грейфера на важких матеріалах та конкретизує положення грейфера на всіх фазах робочого циклу. Конструктивне рішення є новим напрямом в проектуванні, виготовленні та експлуатації грейферів для важкозачерпуючих сипких матеріалів.

УДК 678.02:621.365
Задоя Н.О.[1]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ВИВЧЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ З ПОЛІМЕРАМИ РАДІАЦІЙНОГО ТВЕРДІННЯ ПРИСКОРЕНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ

Матеріал та методики досліджень вибрані виходячи із поставленої задачі вивчення процесів, що відбуваються в полімерних матеріалах під впливом радіаційної обробки. Досліджували тонкостінні склопластики конструкційного й теплозахисного призначення. Застосовуваним наповнювачем була кремнеземна склотканина КТ-11-ТОА, яка була піддана термообробці та апретуванню. ЕДТ-10 та ЛБС-4 використовували як сполучні.

З метою вивчення радіаційної взаємодії з полімерами були експериментально визначені оптичні властивості досліджуваних матеріалів. На спектрофотометрі УК-75 знімали ІК спектри пропущення рідкого та отвердженого конвективним нагріванням сполучного ЛБС-4, рідкого сполучного ЕДТ-10. Спектрограми показують, що всі зазначені матеріали добре поглинають інфрачервоне випромінювання в діапазоні довжин хвиль $(2,7\text{-}4)\cdot10^{-6}$ та $(5,1\text{-}9,4)\cdot10^{-6}$ м. По взаємодії випромінювання-речовина встановлено, що спостерігається резонансна взаємодія між елементами структури та джерелом випромінювання.

Для підтвердження ефективності даного рішення знімали ІЧ спектри пропущення склопластику КТ-11-ТОА+ЛБС-4, який був отверджений конвективним нагріванням, прискореними електронами і комбінованим способом (інфрачервоний нагрів та доотвердження прискореними електронами). Ре-

зультати проведеного аналізу показали, що як і сполучне ЛБС-4 окремо, склопластики на його основі, що були отверджені конвективним нагріванням, прискореними електронами й комбінованим способом добре поглинають інфрачервоне випромінювання в тих же діапазонах довжин хвиль. Це видно через зміну характеристик довжин хвиль у діапазонах $(2,7\text{-}4)\cdot10^{-6}$ і $(5,1\text{-}9,4)\cdot10^{-6}$ м.

Результати досліджень свідчать, що радіаційна обробка є ефективним способом спрямованої зміни структури та властивостей полімерів і інтенсифікації процесів твердіння композитів. Проведені дослідження показали можливість застосування радіаційних методів обробки в технології одержання склопластиків теплозахисного й конструкційного призначення при значній інтенсифікації процесу твердіння.

УДК 620.178.32
Сочава А.І.[1], Козак Д.С.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-310м НУ «Запорізька політехніка»

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НА ОПІР ВТОМІ В УМОВАХ АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ

Дослідження на опір втомі в умовах асиметрії циклу полягає в тому, що на симетричний цикл накладається постійне середнє навантаження $\sigma_m$ [1]:

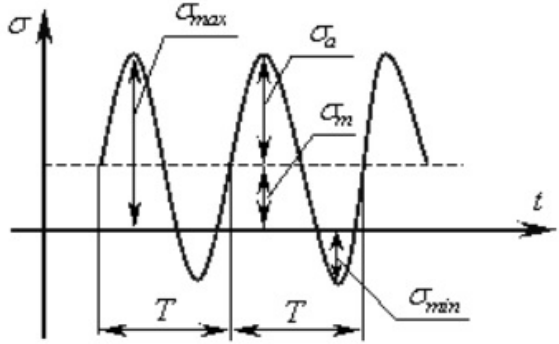



Рисунок 1 – Цикли навантаження:
$\sigma_m$ – середнє навантаження циклу $\sigma_a$ – амплітуда циклу ; $\sigma_{max}$ – максимальне навантаження циклу; $\sigma_{min}$ – мінімальне навантаження циклу.

Випробування матеріалів на опір втомі здійснюється експериментальним шляхом на зразках, на машинах повторозмінного навантаження [2].

В даному випадку дослідження проводяться на установці побудованій в Національному Університеті «Запорізька Політехніка», яка дозволяє здійснювати навантаження з будьяким коефіцієнтом асиметрії цикла [3].

Здійснюється випробування з метою отримання довговічності при даних параметрах циклу.

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

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Давиденков Н. Н. Усталость металлов / Н. Н. Давиденко. – М. : Машиностроение, 1949. – 64 с.

2. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний / Л. М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 301 с.

3. Стенд для испытания металлов при осевых нагрузках в условиях ассиметрии цикла : Реферативная информация о законных научно-исследовательских работах в вузах УССР / П. А. Михайлов, А. И. Сочава. – К. : Вища школа, 1974. – Вып. 13.

УДК 621.762.4

Носенко М.І.[1]

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВОГО РЕЖИМУ ТА УЩІЛЬНЕННЯ ПРИ ГАРЯЧОМУ ШТАМПУВАННІ ПОРОШКОВОГО ТИТАНУ

Значення тиску гарячого штампування визначає щільність порошкових виробів, стійкість і роботоздатність штампового оснащення, енерговитрати процесу та номінальне зусилля ковальсько-пресового обладнання. Раціональний вибір обладнання необхідно проводити з урахуванням зміни тиску деформації протягом процесу штампування. Тому ущільнення та значення тиску досліджували на стадіях процесу.

Дослідження проводили на холоднопресованих заготовках порошкового титану ПТЕС-1, ПТЕК-1 з відносною щільністю $\theta_0 = 70 - 90\%$ . Середовище нагріву – аргон.

Найбільш інтенсивно ущільнення відбувається на першій стадії штампування (вільна осадка заготовки в порожнині матриці) при деформації на рівні технологічної пластичності. Приріст щільності складає 6 – 17% відпові-

дно для заготовок з відносною щільністю $\theta_0 = 90 - 70\%$. Тиск деформації мінімальний і для температур нагріву заготовок 900 – 950°С складає 13.6 – 5% від максимального при штампуванні в закритому штампі та 17 – 6.8% – при штампуванні з елементами витікання. Збільшення температури з 900 до 950°С дозволяє зменшити тиск деформації на 27 – 15 МПа.

Друга стадія штампування (заповнення порожнини матриці) відбувається при значному зменшенні інтенсивності ущільнення з ростом тиску деформації. Мінімальна інтенсивність ущільнення та максимальний тиск деформації характерні для третьої стадії (допресування металу в порожнині матриці), котра є заключною при штампуванні в закритому штампі. Приріст щільності складає 37.3 – 26.9% від максимального при штампуванні в закритому штампі та 46.7 – 34.7% – при штампуванні з елементами витікання. Збільшення температури нагріву заготовок, у вказаному інтервалі, зменшує тиск деформації на другій і третій стадії, відповідно, на 35 – 25 МПа та 50 – 40 МПа.

На заключних стадіях штампування з елементами витікання (третя стадія і четверта стадія – витікання металу в компенсатори) при більш інтенсивному ущільненні (приріст щільності складає 2.5 – 6.7%) забезпечується отримання практично безпористого матеріалу. При цьому тиск деформації, порівняно зі штампуванням у закритому штампі, зменшується на 150 – 140 МПа відповідно для температур нагріву заготовок 900 - 950°С.

Таким чином, встановлено характер зміни ущільнення і тиску в процесі деформації в закритому штампі ( $\theta_{max} = 98 - 98.5\%$; $p_{max} = 700 - 800$ МПа ) та з елементами витікання ( $\theta_{max} = 99.8 - 100\%$; $p_{max} = 560 - 650$ МПа).

УДК 621.865.8
Волков Г.П.[1]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## РОЗРОБКА ТА ВИКОРИСТАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ЕКЗОСКІЛЕТІВ

Незважаючи на зростання автоматизації та механізації в сучасному виробництві, велика кількість операцій в тому числі в шкідливих умовах не обходяться без використання ручної праці. Автоматизувати їх не вдається, а залучення для цих цілей малокваліфікованих працівників безперспективно. Важка фізична праця викликає у працюючих швидку стомлюваність і дискомфорт. Як результат, це низька продуктивність і якість праці, зростання виробничих захворювань, травматизм на виробництві, велика плинність кадрів.

Далеко не завжди вдається вирішити цю проблему шляхом вдосконаленням технології виробництва, впровадження механізації окремих технологічних операцій, або підвищенням безпеки проведення робіт. На сьогодніш-

ній день, для зниження впливу тяжкості виробничих операцій на працюючих, розглядаються технології з застосуванням промислових екзоскелетів (ПЕ). Ці пристрої призначені для посилення природних можливостей людини шляхом захисту його опорно-рухового апарату за рахунок зовнішнього каркаса. ПЕ, як правило, повторюють біомеханіку людини для пропорційного збільшення зусиль під час рухів і підвищують захищеність працівника від впливу фізичних навантажень.

Світовий ринок екзоскелетних технологій стрімко зростає, і сьогодні більше 80 компаній по всьому світу застосовують. ПЕ успішно просуваються на технологічних майданчиках і в виробничих процесах багатьох відомих фірм (наприклад Форд, Тойота, Норнікель і ін.). На основі даних досліджень Global Markets Insight і Markets & Markets обсяг поставок ПЕ до 2024 року перевищить 86000 одиниць. Можна очікувати, що в недалекому майбутньому підприємства які не впроваджують ПЕ в виробничих процесах будуть вважатися підприємствами з низькою культурою праці і відсталими технологіями. Розмір ринку мобільних ПЕ оцінювався більш ніж в $ 70 млн в 2016 році і за наступний період має показник CAGR 51%.

Дослідницькі роботи в цьому напрямку проводяться з метою реалізації та впровадження інновацій в області створення інтегрованих людино-машинних комплексів. Лідерами за кількістю патентів тут є США, Китай і Республіка Корея. На жаль незважаючи на нагальну проблему в Україні цієї тематики не приділяється належної уваги. Як вже стало поганою традицією, нам знову доведеться купувати вже застарілі розробки ПЕ і копіювать чужі.

Науковий потенціал і належні технології для власних розробок в країні ще лишилися. На початковій стадії впровадження ПЕ в виробництво увійти у цю галузь легше. В ході аналізу існуючих конструктивних схем ПЕ встановлено, що перспективним в її розвитку є комплекс активних автономних екзоскілетів нижніх кінцівок людини. Найбільший інтерес представляють конструкції з пневмом'язами, оскільки вони забезпечують більш лінійні в порівнянні з пневмоциліндрами силові характеристики і відрізняються малою масою і габаритами.. Оскільки цей напрямок є порівняно новим, долучиться до розробки ПЕ можна як на стадії розробки готових конструкцій, так і їх складових частин. Наприклад: каркас екзоскілета (кінематика і несучі елементи конструкції, матеріали), системи управління (електро-, пневмо-, гідрокерування), системи енергозабезпечення для автономних екзоскілетов (акумулятори, паливні елементи, нетрадиційні енергетичні елементи), шарнірні вузли і рухомі з'єднання, виконавчі пристрої (захвати, маніпулятори , гідропневмоциліндри, електродвигуни, штучні м'язи). Очевидно, що на цьому етапі, можна використовувати напрацювання по конструюванню промислових роботів.

УДК 621.874
Руднєв О.М.[1], Попов В.А.[2]
[1]канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2]акад. ПТАНУ

# ПРОБЛЕМИ ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ВАНТАЖОПІДІЙМАЛЬНИХ КРАНІВ І МОНІТОРИНГ ПАРАМЕТРІВ ПАСПОРТІВ МАГНІТНОГО КОНТРОЛЮ НА СУЧАСНИХ ВИРОБНИЦТВАХ

Оцінка напружено-деформованого стану зварних металоконструкцій в процесі проведення технічної діагностики вантажопідіймальних кранів стає актуальнішою, тому що темпи старіння парку кранів України значно випереджають темпи технічного переозброєння. Особливо ця тенденція проглядається на прикладі мостових кранів.

В якості одного з напрямків вирішення цієї проблеми набула поширення практика магнітної діагностики металоконструкцій підйомних споруд на основі вимірювання магнітної характеристики металу - коерцитивної сили. В основу даного методу неруйнівного контролю покладено кореляційні залежності між механічними властивостями металу і одним з основних фізичних параметрів петлі магнітного гістерезису – коерцитивної силою, (А / см), як найбільш чутливої до зміни щільності дислокацій структури стали.

Результати робіт дослідників і практика застосування магнітної структуроскопії при оцінці напружено-деформованого стану металоконструкцій при малоцикловой втомі дозволила встановити усереднені зміни швидкості росту (А / см * рік) при різних режимах навантаження.

Високі значення коерцитивної сили – це тривожний сигнал для експертів, завдання яких і полягає в тому, щоб визначити причини «тяжкого стану» металоконструкції.

Прогнозування залишкового ресурсу вантажопідйомної машини залежить від комплексного підходу до оцінки напружено-деформованого стану її металоконструкції при наявності в експертній організації сучасного діагностичного обладнання та приладів, а також готовності персоналу застосовувати прогресивні технології при проведенні робіт в процесі експертного обстеження та аналізі отриманих результатів.

Первинні значення коерцитивної сили $H_C^0$ так само, як і механічні властивості, залежать від багатьох факторів: хімічного складу стали, величини зерна, наявності структурної неоднорідності, стану поставки металопрокату (гарячекатаний або холоднокатаний прокат, в відпаленому або нормалізованому стані).

Тому в 2002 р. була висловлена думка: при виготовленні кранових металоконструкцій необхідно вимірювати початкові значення коерцитивної сили $H_C$, щоб в подальшому стежити за зміною значень для своєчасного запобігання аварійних ситуацій. Ця ідея в подальшому була трансформована в паспорт магнітного контролю. Протягом декількох років Харківський завод підйомно-транспортного устаткування при поставках комплектував супровідну документацію паспортами магнітного контролю на крани спеціальні вельми важкого і важкого режимів роботи.

Паспорт магнітного контролю є підтвердженням гарантій заводу-виготовлювача якості металоконструкцій в тому сенсі, що первинний стан звареної конструкції відповідає вимогам надійної експлуатації (по ІСО 4301) з точки зору зварювальних напружень.

Харківський завод підйомно-транспортного устаткування підготував 118 паспортів магнітного контролю для кранів які були передані замовнику. Однак метод МТКС при діагностуванні кранових конструкцій для підприємств став дуже затратним і знижує конкурентоздатність виробництва в порівнянні з тими підприємствами які не використовують цього метода.

На даний час із 118 кранів з магнітними паспортами дані моніторингу приходять тільки на 26 кранів.

Це свідчить про «прохолодне» відношення як власників кранового обладнання так і незалежних експертних організацій до цього методу. Для зрушення з місця такої проблеми необхідні єдині державні нормативи і вимоги і постанови.

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

## ПРИЛАДИ БЕЗПЕКИ КОЗЛОВИХ КРАНІВ ПРАЦЮЮЧИХ НА ОДНІЙ КОЛІЇ

При роботі двох і більше кранів на одній колії, виникає небезпека їх зіткнення. Як правило, цю проблему вирішують встановленням кранового буфера. Але застосування буферів та упорів не забезпечує потрібного рівня безпеки, так як не запобігає зіткненню кранів, а лише поглинає енергію удару.

Кінцеві вимикачі застосовують для зменшення швидкості та автоматичного відключення приводу пересування візка і крана при його наближенні до тупикових упорів або зближенні двох козлових кранів працюючих на одній

колії. Після спрацьовування такий кінцевий вимикач не повинен забороняти рух у зворотньому напрямку.

Контактні методи запобігання зіткненню все частіше замінюються безконтактними. Наприклад для козлових все частіше використовуються датчики радарного типу 2D-LIDAR/2MS5XX, з високим діапазоном охвату до 80 м. Діапазон сканування об'єктів до 10% ремісії 40 м. та високою шириною сканування площі 190°. Високий діапазон охвату та висока точність дозволяє отримувати достовірну інформацію про місце знаходження кожного крану та своєчасно знижувати швидкість. Особливо актуальне значення встановлення даних систем набуває у тому випадку коли керування крану відбувається не з кабіни а з «підлоги», або віддаленого пункту керування і стан за майданчиком обслуговування контролюється за допомогою системи відеоспостереження.

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

УДК 621.771
Широкобоков В.В.[1], Маковський Я.Р.[2]
[1]канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ АНТИФРИКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Порошкова металургія – це технологія отримання металевих порошків і виготовлення виробів з них, а також з композицій металів з неметалами.

У звичайній спосіб металеві вироби отримують за допомогою лиття, кування, штампування і пресування.

В порошковій металургії вироби виготовляють з порошків з розмірами часток від 0,1 мкм до 0,5 мм за допомогою холодного пресування і наступною високотемпературною обробкою (спіканням).

Порошкова металургія економічна щодо матеріалів. Як і традиційні методи металообробки, дозволяє отримувати деталі з необхідними механічними, електричними і магнітними властивостями.

В даний час у всіх транспортних і механічних машинах використовуються підшипники качання і ковзання. Для їх виготовлення застосовують різні антифрикційні матеріали.

Сучасний стан розвитку економіки вимагає збільшення продуктивності виробництва, зниження собівартості, застосування нових матеріалів і технологій. Все це пов’язано з впровадженням нових економічних способів виготовлення антифрикційних виробів.

Одним з перспективних напрямків в створенні антифрикційних виробів є порошкова металургія.

За допомогою порошкової металургії є можливість виготовляти вироби з високим коефіцієнтом використання матеріалу до 95%.

Вивчення літератури, присвяченої теоретичному і експериментальному дослідженню енергоємності при створенні антифрикційних виробів дозволяє зробити наступні висновки:

1. Є можливість зниження витрат на подальшу механічну обробку, яка може бути виключена або істотно зменшена;

2. Є можливість отримання готових виробів, точних за формою і розмірами;

3. Забезпечується висока якість поверхні виробу;

4. Є можливість зменшення кількості операцій в технологічному ланцюгу виготовлення деталі;

Використовується більш ніж 95% сировини;

5. Є можливість отримати вироби з унікальними властивостями завдяки використанню багато-компонентних сумішей при об'єднанні металевих і неметалевих компонентів;

6. Є можливість отримання більш високо-економічних, технічних і експлуатаційних характеристик виробів в порівнянні з традиційними технологіями;

7. Істотно спрощується виготовлення виробів складної форми.

В процесі роботи була досліджена технологія виготовлення антифрикційних виробів за допомогою порошкових матеріалів. Зроблено аналіз матеріалів і композицій які використовуються при виготовленні антифрикційних виробів.

УДК 621.771
Матюхін А.Ю. [1], Фабицький Є.В.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕХНОЛОГІЇ ГАРЯЧОГО ШТАМПУВАННЯ ВИСОКОЯКІСНИХ ПОКОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

За своєю сутністю авіаційний двигун є надскладною енергетичною машиною з надвисоким рівнем відповідальності до якості деталей та механізмів. Тому на авіадвигунобудівних підприємствах застосовується трьохступінчатий метод контролю усіх збірних одиниць. Гаряче штампування деталей машин та інших металовиробів є базовим та першочерговим з процесів металообробки і зараз найбільш поширене через високу продуктивності, економічності і якості продукції. Вважалося, що виготовлення деталей обробкою металів різанням має безперечну перевагу перед виготовленням деталей обробкою металів тиском по точності розмірів і чистоти поверхні. Однак, економне витрачання металу при виготовленні поковок закладено в самій ідеї пластичного формування при обробці металів тиском, яка складається в перетворенні заготовки простої форми в поковки складнішої форми того ж об’єму. Можливість використання високих швидкостей деформування, швидкохідні ковальських машин і невелике число необхідних, щодо нескладних, технологічних операцій зумовлює короткочасність робочого циклу і високу продуктивність ковальсько-штампувального виробництва. Штамповані вироби відрізняються високими механічними властивостями, які так необхідні для деталей авіаційних двигунів.

УДК 621.7
Бень А.М.[1], Єпішкін О.В.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСІВ ВІРТУАЛЬНОГО ІНЖИНІРИНГУ НА ПРИКЛАДІ QFORM

QForm – це комплекс інжинірингового програмного забезпечення для розробки, аналізу та оптимізації технологій обробки металів тиском. Додатково, завдяки спеціально розробленим модулям QForm Heat Treatment і QForm Microstructure, можливо моделювання фазових перетворень при термообробці, розв'язок пружньопластичного завдання при нагріванні і охолодженні, розрахунок мікроструктури при деформації.

Програмне забезпечення застосовується в машинобудівній, авіабудівній, автомобілебудівній, гірничодобувній, енергетичній, металообробній та інших галузях промисловості.

Метою використання програмного забезпечення QForm є зниження виробничих витрат, що досягається шляхом оптимізації технології, зниження кількості використовуваного вихідного матеріалу, а також кількості пробних штамповок і (або) коригування оснащення. Вбудовано модуль QShape призначений для підготовки 3D геометрії для подальшого моделювання в QForm. Функціями QShape є коригування геометричних моделей і автоматичне створення оптимізація кінцево-елементної сітки. Підготовка 2D геометрії можливо здійснювати в самій програмі QForm на етапі завантаження геометричних об'єктів.

Програмне забезпечення QForm дозволяє моделювати найрізноманітніші холодні і гарячі процеси обробки металів тиском:

– штампування;
– вільне кування;
– видавлювання;
– подовжню прокатку;
– поперечно-клинову прокатку;
– гвинтову прокатку;
– екструзію профілів;
– процеси гнуття;
– розкочування кілець і коліс;
– ротаційне витягування;
– штампування високим тиском;
– листове та об'ємне штампування;

– орбітальне штампування;
– штампування спечених порошків;
– спільну деформацію кількох заготовок з різних матеріалів;
– та інші спеціальні процеси.

Стандартна база даних, що поставляється з програмою, містить характеристики найбільш часто використовуваних матеріалів, мастил та приводів і постійно розширюється. У разі, якщо для моделювання необхідні характеристики будь-якого матеріалу або мастила, відсутніх в стандартній базі даних, користувач може задати їх самостійно. Деякі параметри і властивості матеріалів і інструментів можуть бути імпортовані зі сторонніх програм.

Коло розв'язуваних завдань істотно розширюється завдяки використанню користувальницьких підпрограм і можливості імпорту даних з програм моделювання процесів лиття.

УДК 621.771
Матюхін А. Ю. [1], Макаров А.С.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ БЕЗПОРІСНИХ ДЕТАЛЕЙ З ТИТАНОВОГО ПОРОШКУ

В даний час переважна більшість деталей і виробів з титану і його сплавів на завершальних стадіях виробництва піддається механічній обробці. Трудомісткість цієї операції досить велика, так як коефіцієнт використання металу від штампування до готової деталі становить 0,20 ... 0,35, тобто близько однієї четвертої. У разі виготовлення виробів з поковок коефіцієнт використання ще менше, а трудомісткість вище. зазвичай прийнято вважати, що трудомісткість механічної обробки титанових сплавів різанням в 2 - 2,5 рази більше, ніж трудомісткість обробки звичайних вуглецевих сталей. Для обробки різанням рекомендується застосовувати інструмент оснащений твердосплавними пластинами [1]. Вихід виробів по відношенню до шихті для виплавки злитків становить: для деталей, виготовлених з листа 27%, з труб 24%, з поковок 18%, безповоротні втрати становлять 5 - 10%. Отже, близько 75 - 80% металу що надійшов на виплавку злитків, потрапляє у відходи і підлягає регенерації [2].

Аналіз існуючих методів виготовлення конструкційних деталей з титану і його сплавів показав, що всім їм притаманні великі втрати дорогого металу і великий обсяг обробки різанням. Таким чином, розробка технології виготовлення деталей із застосуванням ресурсозберігаючої технології, а саме порошкової металургії, є актуальною задачею. Проте для створення саме безкорис-

них деталей, необхідно вводити в технологічний процес операцію гарячого пресування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Глазунов С. Г. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. – М. : Металлургия, 1974. – 368 с.

2. Бальшин М. Ю. Порошковое металловедение / М. Ю. Бальшин. – М. : Металлургиздат, 1948. – 332 с.

УДК 621.771

Матюхін А. Ю. [1], Каспаріді М.М.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

## ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕНЕРГО-СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОКАТУВАННЯ НА БЕЗПЕРЕРВНОМУ СТАНІ

Приблизно 90% всього стопленого металу піддається прокатці, куванню, штампуванню та іншим видам пластичної обробки. Обробка металу тиском це кінцева ланка у металургійному циклі.

Обробка металу тиском (ОМТ) в загальному вигляді уявляє собою процес силового тиску на металеву заготівку у відповідних температурних умовах і надає заготівці належної форми. Поряд з цим суттєвим наслідком раціонально збудованого процесу є позитивна зміна структури та деяких властивостей металу. По фізичній сутності ОМТ є процесом пластичної деформації під яким треба розуміти безповоротні зміни відносно положення частин твердого тіла, які зв'язані з їх переміщеннями без зруйнування тіла.

В останні роки все більшого поширення одержало виготовлення гарячекатаних штаб. Подовжня прокатка являється широко розповсюдженим засобом обробки металу тиском (ОМТ). При подовжній прокатці чиниться процес деформації металу між двома валками, які обертаються у різних напрямках. При цьому зменшується товщина, збільшуються довжина і ширина прокатуємої штаби.

Більше 70% штаб прокатані на безперервних станах гарячої прокатки. Бурхливий розвиток виробництва штаб пояснюється техніко-економічними показниками. В порівнянні з іншими типами агрегатів безперервні стани гарячої прокатки найвигідніші по експлуатаційним витрачальним коефіцієнтам і характеризуються високою продуктивністю і економічністю. Тому частка штабового прокату в деяких країнах в загальному обсязі виробництва складає 60-70 %.

Метою подальшої наукової роботи є визначення оптимальних енергосилових параметрів, температурного та швидкісного режиму виготовлення штаб для зниження собівартості продукції.

УДК 621.777.4
Бень А.М.[1], Леліков М.А.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

## ТЕХНОЛОГІЯ ПРЕСУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Титан є одним з найбільш поширених елементів земної кори – він стоїть на 10 місці і більш поширений, ніж вуглець, хлор, фтор, сірка і фосфор. У порівнянні з іншими конструкційними матеріалами титан займає 4-е місце (0,63%) після алюмінію (8,3%), заліза (5%) і магнію (2,1%). Значне скупчення титану в земній корі зустрічається головним чином у вигляді мінералів: рутила $TiO_2$ і ільменіту $FeOTiO_2$. Рутил зазвичай міститься в річкових пісках, а ільменіт - переважно в твердих породах.

Деформування титанових сплавів, як правило, характеризується високим значенням коефіцієнта тертя між металом і інструментом, а нерідко і схоплюванням з останнім. У той же час низька теплопровідність титану сприяє утворенню різко неоднорідного температурного поля заготовки, вистигаючої внаслідок контакту з інструментом. В результаті опір деформації центральної зони заготовки виявляється набагато нижчим, ніж в прилеглій до контейнера і матриці кільцевій зоні, що, в свою чергу, призводить до нерівномірного плину металу.

При видавлюванні титану і його сплавів може виникати велика центральна прес-утяжина на заготовках. В окремих випадках глибина прес-утяжини досягає половини довжини пресованого виробу. Випередження периферійних шарів заготовки внутрішніми призводить до появи розтягуючих напружень в об’ємі деформованого металу, що при недостатній пластичності може викликати порушення цілісності профілю.

Крім того, нерівномірна деформація при видавлюванні зменшує однорідність структури і властивостей титанових сплавів. При розробці термомеханічного режиму видавлювання титанових сплавів необхідно прагнути до створення умов, що забезпечують за можливістю рівномірний характер плину металу. На характер плину титану і його сплавів великий вплив мають мастило і температура нагрівання заготовки.

Збільшення нерівномірності плину металу при підвищенні температури є характерним для гарячого видавлювання більшості сплавів і, мабуть, пов'язане зі зміною співвідношення опору деформації внутрішніх і зовнішніх ша-

рів заготовки при збільшенні різниці в температурах заготовки та контейнера.

Нерівномірність плину сплавів на основі титану ускладнюється наступними обставинами. Охолодження контактуючих з інструментом шарів заготовки, нагрітої до високої температури (в β-області), призводить до того, що в заготовці з'являються ділянки з різним фазовим складом, що ще більш збільшує неоднорідність міцності металу. Крім того, при підвищенні температури знижується теплопровідність титанових сплавів.

Таким чином, підвищенню рівномірності плину титану і його сплавів при гарячому видавлюванні має сприяти:

– зниження температури нагрівання заготовки перед видавлюванням і, навпаки, підвищення температури нагрівання інструменту;

– застосування ефективного мастила, що забезпечує зменшення коефіцієнта контактного тертя між металом і інструментом і володіє достатніми теплоізоляційними властивостями;

– збільшення швидкості пресування, тобто скорочення часу контакту заготовки з інструментом.

УДК 621.771
Обдул В.Д. [1], Черенков Д.В. [2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

## ПІДВИЩЕННЯ ВИХОДУ ГОДНОГО ПРИ КУВАННІ ЗЛИТКІВ НА ЗАВОДІ ТОВ «ДНІПРОПРЕС СТАЛЬ»

Вільне кування злитків зі спеціальних високолегованих, корозійностійких, жароміцних сталей та сплавів на пресах є базовою ланкою технологічного процесу отримання заготовок деталей машин та конструкцій для енергомашинобудування, суднобудівної промисловості, хімічної промисловості, металургії та інших галузей.

Основними типами поковок при вільному куванні на пресах є:

- Поковки круглого профілю;
- Поковки прямокутного та квадратного профілю;
- Поковки змінного профілю;
- Диски;
- Кільця, муфти.

Кожен тип поковки має при цьому широкий розмірній ряд в різних варіантах марочного сортаменту сталей та сплавів.

Деформаційні потужності пресової ділянки кувальсько-термічного цеху ТОВ “Дніпропрес Сталь” (прес вільного кування зусиллям 4000 тс) дозволя-

ють виготовляти як малогабаритні, так и великогабаритні поковки різної тонажності.

В залежності від марки сталі, форми та габаритів, а також від вимог до механічних та інших властивостей кованої заготовки, розробка схеми деформаційних операцій починається з вибору оптимального формату злитка.

Злиток повинен повністю відповідати вимогам тонажності, мірності (кратності) розміру заготовки, а також ступеню укову сталі (сплаву) для забезпечення механічних властивостей та структури заготовки.

При цьому злиток повинен забезпечувати вимоги технологічності при проведені операцій осадки, протяжки, прошивки, рубки.

Так як в злиток закладається вартість найбільш витратної стадії технологічного процесу – виплавки та обробки рідкого металу, отримання із злитка якомога більшої маси готової заготовки є одним із головних напрямків зменшення собівартості поковки і підвищення конкурентоздатності підприємства на ринку високоякісних поковок спеціальних марок сталей і сплавів.

В даний час пресова ділянка кувальсько-термічного цеху ТОВ "Дніпропрес Сталь" проводить кування злитків наступних форматів:

– Злитки квадратного перетину:1) 2,8 т; 2) 3,6 т; 3) 4,5 т; 4) 6,5 т.

– Полігональні злитки: 1) 12 т; 2) 15-16 т.

– Найбільш вживаними є злитки формату 4,5 т та 6,5 т квадратного перерізу.

Дана лінійка форматів злитків має розмір прибуткової частини (що при куванні формує головну обрізь) значно більшу 10%, що не дозволяє підвищити техніко-економічні показники кування.

Метою проведення дослідження є пошук можливостей зменшення відносної величини прибуткової частини і тим самим збільшення виходу годного при куванні злитків при забезпеченні якості поковок.

Роботу планується розгорнути в наступних напрямках:

1) Зміна конструкції злитків 3,6 т; 4,5 т; та 6,5 т в межах габаритів існуючих виливниць шляхом збільшення співвідношення H/D (загальної висоти злитка до приведеного діаметру) при забезпечені головної обрізі не більше 10,5%, уточнення технології рубки прибуткової частини, аналіз якості металу в частині забезпечення макроструктури та прийнятних результатів УЗК, виключення впливу зміни геометрії та умов формування переходу "тіло злитка – прибуткова частина (поясок)" по граням та ребрам на утворення тріщин при протяжці та осадці.

2) Зменшення маси, форми та умов формування головної частині полігональних злитків масою 12 та 15 т, уточнення технології закову цапфи та аналіз ризиків утворення підголовних тріщин при нагріванні та куванні злитків.

3) Розробка та підбір нових форматів злитків (зокрема 4,8 та 5,0 т) з гарантованим забезпеченням величини головної обрізі та розробка їх схем кування.

УДК 621.774
Ленок А.А.[1], Доновський О.В.[2]
[1] старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ПРИ ГНУТТІ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ

Проведення експериментальних досліджень для визначення та аналізу напружено-деформованого стану трубної заготовки в процесі гнуття в більшості випадках виконується за допомогою методу ділильних сіток.

Експериментальні методи дослідження процесів пластичної формозміни трубної заготовки засновані на спотворенні попередньо нанесеної деформаційної сітки. Відомо три основні групи експериментальних методів дослідження:

1. Методи, які базуються на основних положеннях теорії кінцевих деформацій (МКД). Основні параметри деформованого стану в межах, обмежених коміркою ділильної сітки, визначаються шляхом співставлення кінцевої форми з розмірами комірки. В основі МКД лежить теорема про перетворення елементарної сфери в результаті процесу кінцевої формозміни в еліпсоїд. До МКД відносять:

– метод Е. Зібеля (вихідна комірка ділильної сітки квадратної форми);

– метод П. О. Пашкова (вихідна комірка ділильної сітки квадратної форми);

– метод І. П. Ренне (вихідна комірка ділильної сітки у формі паралелограму);

– метод Г. А. Смирнова-Аляєва і В. М. Розенберга (перетворення сферичної форми вихідної комірки ділильної сітки в еліпсоїд).

2. Поетапні методи дослідження (ПМ), які базуються на деформаційній теорії. На кожному етапі дослідження всі характеристики процесу формозміни визначаються таким же чином, як і у випадку кінцевих деформацій. Основна задача ПМ – отримання локальної характеристики ступеню деформації в результаті немонотонної формозміни в умовах складного навантаження. До ПМ можна віднести:

– метод С. І. Губкіна (на кожному етапі визначаються головні деформації шляхом співставлення головних осей еліпса з діаметром вихідного кола,

причому після кожного етапу еліпси видаляються і знову наноситься колова сітка, центри комірок якої повинні співпадати з центрами видалених еліпсів);

– метод візіопластичності Е. Томпсона (в площині симетрії деформованого тіла наноситься ділильна сітка квадратної форми; визначення підсумкової деформації відбувається подібним шляхом, як у методі С. І. Губкіна).

3. Методи, які базуються на теорії течії (МТ). МТ засновані на безперервному спостереженні за формозміною та зміною розмірів комірки ділильної сітки, які розглядаються як безперервні функції деякого параметру (часу, геометричних факторів процесу і т.д.). До МТ відносять:

– метод Е. Зібеля (вихідна комірка ділильної сітки квадратної форми);

– метод І. П. Ренне (вихідна комірка ділильної сітки у формі паралелограму).

Основна відмінність експериментальних методів дослідження – спосіб обробки результатів спотвореної ділильної сітки. Спільним для них являються допущення про те, що в межах об'єму, обмеженого коміркою ділильної сітки: тіло вважається ізотропним, а деформація однорідною.

УДК 621.751
Явтушенко А.В.[1], Таран О.А.[2], Палець О.Т.[2]
[1] канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. М-810м НУ «Запорізька політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РОЗКРОЮ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК СКЛАДНОГО КОНТУРУ

Економія матеріалу завжди була одною з найважливіших задач промисловості, особливо в умовах серійного та масового виробництва.

В листоштампувальному виробництві економія матеріалу визначається насамперед раціональним розкроєм початкового матеріалу. Розрахунок розкрою характеризується великою кількістю можливих схем розкрою та досить складними розрахунками особливо для спеціальних схем.

В залежності від виду початкового та кінцевого продукту розрізання матеріалу існує певна кількість видів розкрою, які характеризуються різноманітними способами розрахунку.

Розкрій рулонів на полоси (стрічки) та розкрій листів на прямокутні заготовки шляхом розрізання на ножицях (гільйотинний розкрій) вирішуються спеціальними методами математики, головним чином методами лінійного програмування.

Порівняно просто виконується розрахунок розкрою листів на полоси та полос при регулярному роздратуванні круглих заготовок. В залежності від кількості рядів, їх розташування в полосі (паралельне чи шахматне) ефектив-

ність розкрою обчислюється за відомими аналітичними залежностями. Головним показником розкрою є коефіцієнт використання матеріалу (КІМ). Головна складність такого розкрою полягає в великій кількості варіантів (як правило 6-20 варіантів).

Набагато складніше виконується розрахунок розкрою заготовок складної форми. Для таких деталей часто є можливим виконувати різне розташування заготовок на полосі. Ефективність розкрою залежить від взаємного розташування сусідніх заготовок (паралельне розташування, комбіноване), кута повороту контуру відносно напряму подачі та інше.

Для таких складних заготовок існує декілька методів розрахунку, які відрізняються технічними можливостями, складністю математичного апарату.

Наприклад, простий метод, запропонований Бабаєвим полягає в початковому зміщені сусіднього контуру на крок, рівний максимальній ширині заготовки. Після цього контур зміщується назад до тих пір, поки не настане доторкування початого та зміщеного контурів. Такий метод надто примітивний та вимагає великої кількості розрахунків. Окрім того, визначення коефіцієнту використання матеріалу при дискретних значеннях кута повороту контуру може привести до того, що оптимальне значення КІМ буде знаходитися не при розрахункових значеннях кутів, тобто загублене.

На сьогоднішній день найбільш універсальним методом визначення КІМу є метод так названого годографу функції тісного розташування (ГФПР), запропонований колективом вчених під керівництвом Стояна. Для двох сусідніх контурів будується годограф, який представляє собою траєкторію переміщення кінця вектора, який з'єдную полюси сусідніх контурів. Головною перевагою цього методу є те, що розраховується неперервна функція, яка визначає годограф, тобто розрахунок виконується для будь-якого значення кута повороту. Параметри годографу визначають основні параметри розташування заготовки – ширину полоси та крок подачі. Головна трудність використання такого методу полягає в великій складності розрахунків.

Одним з відносно простих методів є метод січних, розроблений колективом кафедри ОМТ нашого університету. Суть методу полягає в визначенні параметрів розкрою, тобто ширини полоси та кроку подачі шляхом дискретного розрахунку для заданого кута повороту контуру відносно координатних осей найбільшої січної контуру. Для цього виконується розрахунок довжини хорди, яка з'єднує кожну точку контуру з точкою перетину в напряму подачі. Ця найбільша січна (хорда) приймається як найменший крок подачі, а найменша ширина полоси визначається як різниця найбільшої та найменшої координати контуру в напряму вісі У. Після розрахунку одного положення контуру виконується поворот контуру на заданий кут і розрахунок повторюється.

Після визначення найменшої ширини полоси в залежності від типу штампу (без притиску чи з притиском, з бічними ножами чи без них) визначається номінальна ширина полоси. Крок подачі визначається як найбільша хорда з добавкою величини між детальної перемички. Після цього розраховується КІМ.

Недоліком такого методу є вже вказана дискретність кута повороту, але ж цей можливо зменшити шляхом звуження діапазону зміни кута повороту. Окрім цього розрахунок можливий тільки при однорядному розташування заготовок в полосі. Хоча шляхом модифікування можливо виконувати розрахунок і багаторядного розкрою.

Враховуючи досить чисельні розрахунки варіантів розкрою при наявності певних можливостей для полегшення розрахунків, збільшення точності та підвищення продуктивності розроблено систему автоматичного розрахунку розкрою листів та полос при регулярному розташуванні заготовок.

Насамперед розроблено метод введення числової інформації про геометрію контуру, який полягає в представлені контуру як сукупності найпростіших геометричних примітивів таких як відрізок та дуга, розділених характеристичними точками. Координати цих точок та тип примітиву і заносяться в програму розрахунку.

Для розрахунку параметрів розкрою не круглих заготовок розроблено ряд процедур для виконання математичних розрахунків: перетину двох векторів, перетину вектору та кола, пошуку найбільшої хорди, переносу та повороту контуру, тощо.

## СЕКЦІЯ «ВИЩА МАТЕМАТИКА»

УДК 517.9
Онуфрієнко В.М.
д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

# ДОСЯГНЕННЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ ШКОЛИ КАФЕДРИ ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ (ДО 90-Ї РІЧНИЦІ З ДНЯ ЗАСНУВАННЯ)

Кафедра вищої математики, як одна з базових загальноосвітніх кафедр в технічному вузі, була створена у 1944 р. водночас з відкриттям автомеханічного інституту, але кафедра математики існувала ще принаймні з 1930 р., коли, окрім математичних предметів, викладачі були задіяні у викладанні фізики, механіки та хімії. Завідувачем кафедри в ті роки був доцент О.С. Бакаляєв. Це був період становлення кафедри, основна робота викладачів була спрямована на розробку навчально-методичної бази кафедри. Поряд з методичною велася і наукова робота. Так, ст. викл. А.Г. Анісімов захистив кандидатську дисертацію за результатами наукових досліджень у галузі прикладної математики.

З початком роботи на кафедрі кандидата фізико-математичних наук С.А. Кас'янюка у 1957 р. інтенсифікувалась наукова робота, запрацював науковий семінар. У той період опубліковано понад 30 наукових праць. За тематикою семінару пізніше захистили кандидатські дисертації Г.І. Ткачук, О.С. Носенко, М.Ф. Коцур. Активно працював студентський науковий гурток з кібернетики під керівництвом доцента С.А. Кас'янюка.

У 1960-1963 рр. на кафедру за конкурсом прийняті: доценти Г.К. Привалова, О.К. Костюк, В.М. Казанцев, В.М. Скородумов, Ф.В. Томашевич, С.П. Гавеля. У 1964 році кафедру розділено на дві кафедри (вищої математики (зав. кафедрою ст. викл. О.С. Носенко) і обчислювальної математики (зав. кафедрою доц. С.П. Гавеля).

З 1975 року на кафедрі працювали доцентами: Ю.І. Нагорний, В.П. Чумаченко, В.М. Онуфрієнко, В.Г. Засовенко, А.М. Куземко, Л.М. Онуфрієнко, І.М. Килимник, С.В. Сізих, В.П. П'янков, З.М. Шаніна, Л.В. Гальченко, О.В. Крапівний, А.В. Засовенко, І.Г. Величко.

У 1970-2018 рр. співробітниками кафедри захищено 18 кандидатських дисертацій (О.А. Приварников, І.А. Левицький, Ю.І. Нагорний, О.С. Носенко, М.Ф. Коцур, Л.А. Саран, В.М. Онуфрієнко, С.В. Сізих, В.І. Бешенкова, В.Г. Засовенко, Л.М. Онуфрієнко, В.П. П'янков, І.М. Килимник, О.В. Крапівний, Т.І. Левицька, А.В. Засовенко, Н.П. Башова, Н.М.Антоненко, А.В. Фасоляк) та 3 докторські дисертації (В.П. Чумаченко, С.Ф. Шишканова, В.М. Онуфрієнко).

У 1988 році кафедру очолив доктор фізико-математичних наук професор В.П. Чумаченко, у ці роки формувалась школа строгого методу частинних областей для розв'язування електродинамічних задач [1–3]. Цей метод використовується для дослідження структур, геометрія яких дозволяє виконати розбиття на дві та більше прості області, що об'єднуються. Невідоме поле у кожній такій області подається у вигляді розвинення за повною системою власних функцій відповідної частинної області з невідомими коефіцієнтами, значення яких визначаються за допомогою граничних умов на спільних границях часткових областей.

Використання апарату функцій Гріна дозволяє звести дифракційну задачу для хвилеводного трансформатора до інтегрального рівняння, що зв'язує розподіл джерел поля із полем дифракції або випромінювання. Формули Гріна дозволяють перейти від інтегрування об'ємів або поверхонь до інтегрування відповідно поверхонь і контурів.

У математичній постановці допускається, що в площині $xOy$ існують області $B_1$ і $B_2$, що перетинають одна одну за наявності спільної частини цих областей $B'$, вважається відомими розв'язки задачі Діріхле для кожної з областей за будь-яких граничних умов. Для областей $B_1$ і $B_2$ відомі функції Гріна $G_1(x,y;\xi,\eta)$ і $G_2(x,y;\xi,\eta)$. Граничні умови для цих функцій на границях відповідних областей $B_1$ і $B_2$ за використанням інтегральних формул Гріна надають можливість знайти розв'язок задачі про поле хвилеводного трансформатора.

В рамках методу добутку областей проф. Чумаченко В.П. розвиває метод для області $\Omega$, що обмежена опуклим $N-$кутником і може бути поперечним перерізом хвилеводу, порожниною на провідній поверхні, з'єднувальною порожниною багатоплечого з'єднання хвилеводів тощо. Некоординатна в загальному випадку область $\Omega$ розглядалась в якості спільної частини півплощин, що перетинаються, а функція $u$ всередині $\Omega$ зображувалась суперпозицією розвинень деяких допоміжних функцій, означених в півплощинах, де в локальних координатах можливе відокремлювання змінних.

З 1995 р. при кафедрі відкрита аспірантура за фахом «Радіофізика». Керував (до 2015 р.) аспірантурою проф. В.П. Чумаченко (захищено 4 кандидатські дисертації). Після захисту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук у 2005 р. професор В.М. Онуфрієнко керує науковою роботою аспірантів і магістрів.

Головний напрямок наукової роботи викладачів кафедри - математичне моделювання фізичних процесів у радіотехнічних і механічних пристроях та їх елементах.

У зв'язку з рестуктуризацією факультету довузівської підготовки 31.08.2015 р. відбулося об'єднання кафедри вищої математики з кафедрою загальної математики. Завідуючим об'єднаної кафедри вищої та загальної

математики обрано д-ра фіз.-мат. наук, проф. Онуфрієнка В.М. Наказом ректора № 97 від 10.03.2017 р. об'єднану кафедру перейменовано в кафедру вищої математики.

З 1998 року і публікації проф.Онуфрієнка В.М. [4] про постановку задач електродинаміки у фрактально конфігурованих хвилеводних трансформаторах досліджуються математичні аспекти еквівалентності задачі про розподіл заряду(струму) з фрактальною густиною $\mu^s$ на підмножині $F$ з введенням $s$ - міри Хаусдорфа $H^s(F)$ та задачі про розподіл заряду(струму) з фрактальною густиною $\mu^s$ на відображенні $f(F)$ підмножини $F$ з введенням $s$ - міри Хаусдорфа $H^s(f(F))$. Доведено можливість інтегродиференціального визначення міри Хаусдорфа фрактального носія заряду(струму) через застосування відображення у вигляді ортогонального проектування $\alpha$ - вимірного фракталу, навантаженого зарядом(струмом) на $R^n$ з густиною $q^{(\alpha)}$, на діаметр розглядуваної множини, що є біліпшицевим перетворенням, яке зберігає хаусдорфову розмірність і при диферінтегральному відображенні. Розглядом інтегродиференціального означення потенціалу узагальнено проекційну теорему про співвідношення між розмірностями навантаженої зярядом (струмом) множини та її проекції на деякий кутовий напрямок.

Вимірювання протяжності фрактальної частини контуру, що проектується на відрізок осі, показало, що зв'язок між кількістю елементів покриття та їх розміром описується функціональним рівнянням у характеристиках Коші, а довжина ланки ламаної лінії визначається за допомогою засобів інтегро-диференціального дробового числення.

Перспективність запропонованого і реалізованого строгого підходу, що базується на визначенні диферінтегральної $\alpha-$ форми провідних елементів, електромагнітних матеріальних параметрів та зарядів і струмів у штучному середовищі, проявляється у можливості строгого аналізу компонент електромагнітного поля і встановлення закономірностей та особливостей поведінки $\alpha-$ характеристик поля.

Це відкриває нові можливості для розв'язування складних задач дифракції електромагнітних хвиль на фрактально структурованих штучних об'єктах і для розв'язування задач про взаємодію та поширення електромагнітних хвиль у хвилеводних і резонаторних системах із фрактальними межами та штучними метаматеріалами.

У прикладному аспекті результати роботи використовуються для проектування хвилеводних та антенних трансформаторів міліметрового, субміліметрового та оптичного діапазонів хвиль [5].

Застосування поняття фрактала в математичному моделюванні динамічних систем наділяє їх властивостями, що є притаманними складним нелінійним системам, наприклад, для ефектів просторового гістерезису та часової ередитарності, в яких враховується не тільки теперішній стан системи або найближчий попередній стан (тобто початкові значення параметрів стану системи, деякі похідні за часом та просторовими координатами), але також і всі попередні стани, в яких перебувала дана система.

Гістерезис явища, процесу є емпірично-теоретичною концепцією, що приймається і набуває розвитку у природничих (а останнім часом і в історичних, соціокультурних) науках, застосовується для опису нелінійних механізмів розглядуваних процесів з гіпотетично можливими різноманітними траєкторіями розвитку системи та просторовими положеннями рівноваги, насиченості тощо.

Для виявлення екзотичних ефектів [6], що можуть виникати у приладах з від'ємними ємностями та індуктивностями, розглядається фрактальна модель імітації для інтерпретації появи від'ємної провідності наношару в електронних пристроях, що функціонують на відносно низьких частотах [7].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ


1. Чумаченко В. П. Метод частичных пересекающихся областей для исследования волноводно-резонаторных систем сложной формы / И. Г. Прохода, В. П. Чумаченко // Изв. вузов СССР. Радиофизика. – 1973. – Т. 16, № 10. – С. 1578–1582.

2. Chumachenko V. P. Efficient field representation for polygonal region / V. P. Chumachenko // Electronics Letters. – 2001. – Vol. 37, № 19. – P. 1164–1165.

3. Чумаченко В. П. К теории Е-плоскостного волноводного трансформатора с осевой симметрией N-го порядка / Л. М. Онуфриенко, Я. В. Чумаченко, В. П. Чумаченко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2014. № 1. – С. 7–13.

4. Onufrienko V. M. Physical and Geometric Interpretation of Electromagnetic Field's α-Characteristics / V. M. Onufrienko // Telecommunication & Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53, № 4-5. – P. 136–139.

5. Онуфрієнко В. М. Диферінтегральна парадигма законів електродинаміки фрактального середовища / В. М. Онуфрієнко, Л. М. Онуфрієнко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2008. – Вип. 6 (53). – Ч. 1. – С. 124–128.

6. Onufrienko V. M. Planar fractally-shaped terahertz waveguide: on the Goos-Hänchen effect / V. M. Onufrienko, T. I. Slyusarova, L. M. Onufrienko // 14th Intern.Conf. TCSET'2018 Proceedings. April, 2018. – Lviv-Slavske, Ukraine. – P. 1237–1240.

7. Onufrienko V. M. Modeling characteristics of field-effect fractal nanotransistor / V. M. Onufrienko, T. I. Slyusarova, L. M. Onufriyenko // 15th Intern. Conf. Int.Conf. TCSET'2018 Proceedings. February 25-29, 2020. – Lviv-Slavske, Ukraine. – P. 586–589.

УДК 517.9
Онуфрієнко В.М. [1], Онуфрієнко Л.М.[2]
[1] д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## ФРАКТАЛЬНА МОДЕЛЬ ПИТОМОЇ ПРОВІДНОСТІ ГРАФЕНОВОГО ТРАНЗИСТОРА

Для моделювання незворотного процесу провідності фрактально конфігурованого графенового транзистора необхідним етапом є вимірювання геометричної протяжності досліджуваної множини, що подається точками, відрізками, плоскими та об'ємними компактами. Вводимо у розгляд їх покриття прямолінійними ланками $l_{i(k)}$ ($i-$номер ланки у $k-$му поколінні покриття), при цьому довжина ланок $(k+1)-$го покриття менше довжини ланок $(k)-$го покриття: $l_{i(k+1)} < l_{i(k)}$. Кількість $N$ ланок $l_{i(k+1)} < l_{i(k)}$ покриття, що вкладаються на $l_{i(k)}$ є деякою функцією їх відношення: $N_{l_{i(k+1)} l_{i(k)}} = f(l_{i(k)} / l_{i(k+1)})$ [1].

Сумою $\gamma(\alpha)\left(\sum_{i=1}^{\infty} l_i\right)^{\alpha}$ апроксимується протяжність розглядуваної фрактальної множини. У загальному випадку можна передбачити побудову покриття діаметра $L$ фрактально конфігурованої множини з кінцевої точки $L_{-(l_i)}$.

Такий процес, звичайно, дозволяє провести апроксимаційний процес з очікуваним результатом для сум у вигляді $\gamma(\beta)\left(\sum_{j=1}^{\infty} l_j\right)^{\beta}$ з іншим скейлінговим показником $\beta$, числовим значенням якого (додатним, від'ємним,

комплексним, залежним від просторової та часової координати) ураховуються особливості незворотності фрактальних процесів.

Запропонований фізико-математичний підхід до опису фрактальної конфігурації графенового матеріалу середовища надає можливість моделювати скалярні компоненти поляризації та струму у вигляді розвинення в ряд за степенями електричної напруженості [2].

З аналізу математичної моделі випливає висновок про те, що впровадженням у штучне діелектричне, металеве або напівпровідникове з неоднорідною структурою середовище сторонніх джерел енергії з фрактальним дельта-подібним по полю розподілом зарядів (струмів) можна створити штучну "спонтанну" нелінійну електричну поляризацію та електропровідність, що імітують від'ємні ємності та індуктивності.

Для характеристики фрактально конфігурованого середовища з розподіленими параметрами розглядаємо комплексний хвильовий опір [3].

За рахунок фрактальної будови доменних структур із зосередженими параметрами метаматеріалу з комплексним хвильовим опором проявляється просторовий гістерезис у вигляді скейлінгових залежностей для коефіцієнтів відбиття й проходження. Процес зростання потужності хвиль враховуємо вводом деякого скейлінгового показника $\alpha_1$, а спадання – значенням $\alpha_2$. За розробленою схемою підраховано питому провідність графенового транзистора із заданою шириною каналу. Рівняння для нормованої провідності каналу з фрактально провідним шаром (значення сталого скейлінгу $\alpha = 1$ перетворює модель в класичну) демонструє теоретичну можливість керування петлею просторового гістерезису.

Із загальних теоретичних міркувань на прикладах знаходження провідності та опору середовищ з розподіленими та зосередженими параметрами виявлено наявність зв'язку комплексних значень скейлінгового показника з еквівалентними матеріальними параметрами, що пояснює гістерезисність сегнетоелектричного та магнітодіелектричного середовищ. Це пов'язано з наявністю спонтанної електричної поляризації, виникненням фрактально конфігурованих електричних доменів та перебудовою фрактальної доменної структури, що впливає на перебіг гістерезисного ефекту. Крім цього, виявлено, що варіацією скейлінгу теоретично можна керувати діелектричними і магнітними втратами у фрактально конфігурованому, зокрема, нефострівському елементі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Онуфрієнко В. М. Диферінтегральні альфа-форми у хаусдорфовій метриці на фрактальних множинах / В. М. Онуфрієнко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2002. – № 2 (8). – С. 31–39.

2. Онуфрієнко В. М. Поляризованість та намагніченість несуцільного фрактального середовища / В. М. Онуфрієнко, А. О. Місюра // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2006. – № 1 (15). – С. 14–20.

3. Onufrienko V. M. Modeling characteristics of field-effect fractal nanotransistor / V. M. Onufrienko, T. I. Slyusarova, L. M. Onufriyenko // 15th Intern. Conf. on advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering Proceedings. February 25-29, 2020. – Lviv-Slavske, Ukraine. – P. 586–589.

УДК 517.9:621.382.323

Онуфрієнко В.М.[1], Слюсарова Т.І.[2]
[1] д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асист. НУ «Запорізька політехніка»

## ГІСТЕРЕЗИС ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МЕТАМАТЕРІАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Гістерезис – складне явище, пов’язане з незворотними процесами і тому його важко моделювати. Проблема в тому, що в будь-який момент часу стан матеріалу залежить і від його внутрішніх властивостей, і від його історії. Структура матеріалу доменів, що визначає реакцію матеріалу на зміну електричних, механічних, оптичних параметрів, є результатом складних просторових взаємодій, які відбуваються під час природного «народження» матеріалу, а також залежить від часової області розвитку явища, процесу.

На теперішній час актуальним є напрямок штучного створення метаматеріалів з притаманними їм екзотичними властивостями. Тому є потреба зосередити зусилля на розробці теоретичних моделей для опису і прогнозування протікання процесів у таких середовищах.

Сучасний науковий підхід полягає в тому, що гістерезис фізичного явища або процесу є емпірично-теоретичною концепцією, що приймається і набуває розвитку у природничих науках (також і в історичних, соціокультурних), з розширенням застосування для опису нелінійних механізмів розглядуваних процесів з гіпотетично можливими різноманітними траєкторіями розвитку системи та просторовими положеннями рівноваги, насиченості тощо.

Динамічну систему вважаємо гістерезисною, якщо просторово-часові траєкторії деяких або всіх змінних виявляють зв’язок у залежності від швидкості просторового перебігу явища.

Протягом останнього десятиріччя актуалізувалися дослідження метаматеріалів, що проявляють ефект виникнення від’ємних функцій і параметрів, що традиційно вважались невід’ємними, у напівпровідному середовищі з

розподіленими параметрами. Особлива увага виникає до питання про реалізацію від'ємної ємності як виду представлення від'ємної реактивної провідності, що є еквівалентною індуктивністю.

Для виявлення екзотичних ефектів просторового перебігу, що можуть виникати у приладах з від'ємними ємностями та індуктивностями, розглядаємо фрактальну модель імітації появи від'ємної провідності наношару [1]. Диферінтегральна модель струмопровідних фрактальних елементів розвивається на основі вводу хаусдорфової метрики та міри фрактальних точкових зарядів у вигляді диферінтегральної альфа-форми [2] множин фізичних зарядів (елементів струму) в метаматеріальному середовищі. Математичну модель опису просторового гістерезису застосовуємо для дослідження впливу на провідність каналу зміщених атомних шарів транзистора n-типу для випадку замкнутих між собою затворів з фрактально конфігурованими межами, що вводяться у модель у вигляді дробового диференціала $d^{\alpha}x$, його зв'язку з дробовою похідною електричного поля напруженості $d^{\alpha}E(x)={}_{a}D_{x}^{\alpha}E(x)d^{\alpha}x$, де дробова похідна ${}_{a}D_{x}^{\alpha}E(x)$ використовується у формі Рімана-Ліувілля.

Такий фізико-математичний підхід надає можливість для фрактального матеріалу середовища записати скалярні компоненти поляризації $P^{(\alpha)}(E)$ та струму $J^{(\alpha)}(E)$ у вигляді розвинення в ряд електричної напруженості $E$ (індекс $(\alpha)$ позначає результат дробового диферінтегрування $D_E^k f(0)$, $\alpha$ – показник степеня)

$$P^{(\alpha)}(E)=\varepsilon_0\cdot\chi_{в}^{(\alpha)}(E)\cdot E^{\alpha},\ J^{(\alpha)}(E)=\sigma^{(\alpha)}(E)\cdot E^{\alpha},$$

з урахуванням

$$\chi_{e}^{(\alpha)}(E)=\chi_{e0}^{(\alpha)}+\chi_{e1}^{(\alpha)}E+\ldots+\chi_{ej}^{(\alpha)}E^{j}+\ldots,$$

$$\sigma^{(\alpha)}(E)=\sigma_0^{(\alpha)}+\sigma_1^{(\alpha)}E+\ldots+\sigma_j^{(\alpha)}E^{j}+\ldots,$$

де $\chi_{ej}^{(\alpha)}=\dfrac{\left(D_E^{j+\alpha}P\right)(0)}{\Gamma(j+1+\alpha)}$, $\sigma_j^{(\alpha)}=\dfrac{\left(D_E^{j+\alpha}J\right)(0)}{\Gamma(j+1+\alpha)}$.

З аналізу запропонованої математичної моделі робимо висновок, що впровадженням у штучне діелектричне, металеве або напівпровідникове середовище сторонніх джерел енергії з фрактальним дельта-подібним по полю $E$ розподілом зарядів (струмів) можна створити штучну «спонтанну»

нелінійну електричну поляризацію та електропровідність, що імітують від'ємні ємності та індуктивності [3].

Гістерезисна петля теоретично може бути змодельованою наданням різних значень скейлінгової конфігурації метаматеріалу (що фізично відповідає фрактальній зміні орієнтації компонент поля у доменах), наприклад, при збільшенні до деякого значення електричної (магнітної) напруженості поля та подальшим їх зменшенням (спостереження на практиці). Одержана формула нормованої провідності каналу з фрактально провідним шаром демонструє теоретичну можливість керування петлею просторового гістерезису. Це стає можливим через зміну величин провідності в широких межах та за знаком (реалізація від'ємних характеристик нанотранзистора), що допускає управління напругою.

Визначено деякі умови керування характеристиками транзистора за умови нульової напруги «стік-витік». Зміною величини скейлінгу $\alpha$ фрактального шару (для $\alpha = 1$ маємо класичні (з нефрактальною конфігурацією меж транзистора) результати [4]) досягаються ефекти, що проявляються при змінній товщині каналу провідності нанотранзистора, а це, як відомо, інколи спряжене зі значними технологічними труднощами і вимагає зміни і контролю товщини нанопокриття.

Такий підхід виявляється застосовним до опису гістерезисних явищ у графенових транзисторах, де область функціонування штучно створюється графеновими доменами, що розміщені на поверхні напівпровідника. Для таких пристроїв стає можливим моделювання електричних властивостей для двох різновидностей гістерезису: додатного і від'ємного, що також пов'язані залежністю провідності від конфігурації та температури фрактальних доменних шарів.

Унікальна чутливість до середовища оточення і фрактальної конфігурації графенових транзисторів, що теоретично прогнозується результатами числових розрахунків для розглядуваного класу пристроїв, заслуговує подальшого вивчення для виявлення умов виникнення та збільшення енергонезалежної пам'яті [5].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Onufrienko V. M. Modeling characteristics of field-effect fractal nanotransistor / V. M. Onufrienko, T. I. Slyusarova, L. M. Onufriyenko // IEEE: Proceedings 15th International Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2020. – P. 586–589.

2. Онуфрієнко В. М. Диферінтегральні альфа-форми у хаусдорфовій метриці на фрактальних множинах / В. М. Онуфрієнко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – № 2 (8). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2002. – С. 31–35.

3. Місюра А. О. Поляризованість та намагніченість несуцільного фрактального середовища / А. О. Місюра, В. М. Онуфрієнко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – № 1 (15). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – С. 9–13.

4. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов / Р. Кобболд. – Ленинград : Энергия, 1975. – 304 с.

5. Онуфрієнко В. М. Диферінтегральна модель гістерезисних (у просторі) та ередитарних (у часі) процесів механіки й електродинаміки / В. М. Онуфрієнко [Електронний ресурс] / В. М. Онуфрієнко // Тиждень науки-2020. Машинобудівний факультет: щоріч. наук.-практ. конф., 13-17 квітня 2020 р. : тези доп. / Редкол. : В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – С. 89–90. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM). – назва з тит. екрана.

УДК 517.9

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

## МОДЕЛЮВАННЯ ФРАКТАЛЬНО КОНФІГУРОВАНОГО МЕТАМАТЕРІАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

В математичному моделюванні динамічних систем застосування фрактальних уявлень про структуру дозволяє наділяти їх властивостями, які характерні для складних нелінійних систем, наприклад, ефектами просторового гістерезису та часової ередитарності. В таких системах враховується не тільки теперішній їх стан або найближчий попередній стан, але також і всі попередні стани, в яких вона перебувала. Динамічну систему можна вважати гістерезисною, коли просторово-часові траєкторії деяких або всіх змінних виявляють зв’язок у залежності від швидкості перебігу явища з можливими передбаченнями наявності неергодичності.

Найважливіше, що випливає з моделі, є ефекти гістерезису і пам’яті, які наводять на висновок про те, що, наприклад, від’ємні ємнісні (індуктивні) компакти мають пам’ять, керувати якою можна за допомогою часово-частотної та просторової фракталізації. Зокрема, для виявлення ефектів просторового гістерезису та часової еридитарності фрактального компакту за схемою побудови рівнянь з розривами зарядів (струмів) пропонуємо моделювати заряд метаматеріального середовища за допомогою дробових похідних. Диференціальні рівняння дробових порядків, що виникають у таких моделях,

знаходять своє самостійне застосування в багатьох областях фізико-математичної й технічної науки. Наприклад, задача про визначення потенціалу по залежності періоду коливань від енергії, або обернена задача теорії розсіювання, руху тіла у в'язкому середовищі тощо. Такі диференціальні рівняння називаються, за термінологією В. Вольтерра, ередитарними [1] і можуть виникати самі по собі у процесі або у результаті розв'язування.

Теорія фрактального шару [2] на межі розділу двох середовищ базується на визначенні дробового диференціалу та його зв'язку з дробовою похідною у формі Рімана-Ліувілля. Зазначена модель використовується далі для означення фрактального шару Гельмгольця та визначення його ередитарних властивостей. Концепція фрактальності процесів накопичення заряду у просторі і часі демонструє можливі неминучі зміни більшості результатів, отриманих до цього часу звичайними методами. З моделі фрактальності випливають декілька ефектів, які неможливо пояснити цими методами. Найважливішим з них є ефект пам'яті, що наводить на висновок про те, що від'ємні ємнісні (індуктивні) компакти мають пам'ять, керувати якою можна за допомогою часово-частотної та просторової фракталізації.

В задачах про визначення концентрації електроактивних елементів на поверхні фрактально конфігурованого зі скейлінгом електроду, що контактує з електролітом, експериментально достатньо легко визначається густина струму на поверхні. Звідки наявність в досліджуваному процесі ефекту пам'яті або нелокальності за часом, що міститься в ядрі інтегрального оператора вихідного рівняння, позиціонуємо як функцію пам'яті, яка описує прояв ередитарності явища концентрації електроактивних елементів на поверхні електрода. Якщо функція пам'яті є степеневою (як у наших задачах з фрактальною геометрією контактів і неперервним розподілом фізичних параметрів на них та в задачах з фрактальними розподілами зарядів і струмів на гладких компактах), то виникає природній перехід до рівнянь з дробовими похідними. Треба відмітити, що у випадку збігу функції пам'яті з виразом для функції Хевісайда, розглядуваний процес має повну пам'ять, а для збігу з функцією Дірака пам'ять у процесі відсутня.

Означений підхід дозволяє розглядати ефекти, що створюються тепловим рухом іонів поблизу зарядженої поверхні з урахуванням дифузійного подвійного шару Гуй-Чапмана [3] і моделюються диференціальним рівнянням Пуассона-Больцмана. Узагальненню до фрактальної моделі може підлягати і розвинений Штерном підхід, де поєднуються дві попередні класичні моделі та враховується той факт, що іони мають кінцевий розмір і протяжність шару до електрода буде змінюватися в залежності від іонного радіуса.

Аналіз розподілу функції пам'яті демонструє також збіг результатів нашого моделювання для окремого випадку $\alpha = 0$ з результатами напівінтег-

рального (напівдиференціального) методу, розвинутого в 70-х роках XX століття.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегродифференциальных уравнений / В. Вольтера. – М. : Наука, 1982. – 304 с.

2. Westerlund S. Dead matter has memkry / S. Westerlund // Physica Scripta. – 1991. – Vol. 43, № 2. – P. 174–179.

3. Onufrienko V. M. Modeling characteristics of field-effect fractal nanotransistor / V. M. Onufrienko, T. I. Slyusarova, L. M. Onufriyenko // 15th Intern. Conf. on advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering Proceedings. February 25-29, 2020. – Lviv-Slavske, Ukraine. – P. 586–589.

УДК 539.3

Засовенко А.В.[1]

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

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОЇ БАЛКИ ПІД ДІЄЮ УДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Дослідження розповсюдження хвиль в конструкціях при нестаціонарних навантаженнях, має важливе значення, тому що їм піддаються практично всі конструкції на різних етапах життєвого циклу: при виготовленні і монтажу, при експлуатації в нормальних і екстремальних умовах. Одним з найбільш складних динамічних ефектів, який представляє особливий інтерес для фахівців в області розрахунку і проектування різних елементів конструкцій - це ударна взаємодія тіл. Дослідження цього стає все більш важливим для сучасних інженерів через необхідність використання сучасних легких матеріалів для виготовлення тонкостінних елементів конструкцій.

Динамічні навантаження нетривалої і високої інтенсивності; можуть носити потенційно катастрофічний характер, при цьому, не дивлячись на короткочасну дію, вони навіть у випадках низької швидкості удару часто призводять до незначних внутрішніх пошкоджень споруд, які не виявляються при візуальному огляді. Це, в свою чергу, може бути причиною серйозних пошкоджень конструкцій і навіть приводити до значних порушень в їх функціонуванні.

Протягом десятиліть вчені та інженери приділяли велику увагу вирішенню проблем, що стосуються ударної взаємодії тіл. Огляди досліджень в цій області приведені в роботах [1, 2], в яких наголошується, що більшість робіт присвячено аналізу для пружних тіл.

Оскільки балки використовуються в якості конструктивних елементів в багатьох галузях промисловості і техніки, то вивчення їх динамічної поведінки при ударних впливах є вельми актуальним, особливо в тих випадках, коли властивості цих тіл, в процесі ударної взаємодії, змінюються в області контакту.

Дробові оператори [3] здатні моделювати ефект спадкової пам'яті, оскільки його еволюція в часі краще описується дробовими диференціальними рівняннями, в той час як стандартні математичні моделі з похідною цілого порядку, в тому числі нелінійні моделі, не працюють належним чином у багатьох випадках. Узагальнення сітково-характеристичного методу та ітераційного підходу [4, 5] разом з дробовими операторами дозволяє розглядати задачі для в'язко-пластичних матеріалів з різними крайовими умовами, навантаженнями і моделями розрахунку без зміни розрахункової схеми. Зміна в часі, що описується дробовим параметром, дозволяє варіювати в'язкістю.

В процесі удару відбувається руйнування молекулярних зв'язків в межах контактної зони, в результаті чого молекули починають вільніше переміщатися по відношенню один до одного. В результаті відбувається зменшення в'язкості матеріалу балки в зоні контакту. Ця обставина дозволяє описати поведінку матеріалу балки в області контакту з допомогою моделі стандартного лінійного твердого тіла з дробовими похідними, оскільки зміна параметру дробової похідної дозволяє регулювати в'язкість матеріалу балки від її початкового значення до повної її відсутності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / В. Гольдсмит – М. : Изд-во лит-ры по строительству, 1965. – 488 с.

2. Россихин Ю. А. Удар упругого шара по балке Тимошенко и пластинке Уфлянда-Миндлина с учетом растяжения срединной поверхности / Ю. А. Россихин, М. В. Шитикова // Известия вузов. Строительство. – 1996. – № 6. – С. 28–34.

3. Самко С. Г. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения / С. Г. Самко, А. А. Килбас, О. И. Маричев. – Минск: Наука и техника, 1987. – 688 с.

4. Мастиновский Ю. В. Нестационарное деформирование упруговязкопластической балки / Ю. В. Мастиновский, А .В. Засовенко // XVI международный научно-технический семинар «Высокие технологии в машиностроении» INTERPARTNER – 2007, [материалы семинара]. – Вестник двигателестроения – Запоріжжя. – 2008. – № 1. – С. 147–150.

5. Засовенко А. В. Про дію рухомого навантаження на пружно-пластичну балку / А. В. Засовенко // Вестник двигателестроения. – 2014.– № 1. – С. 44–47.

УДК 517.547.7
Nataliia Snizhko[1]
[1] PhD (Physics and Mathematics), associate professor, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

## APPROXIMATION OF FUNCTIONS OF TWO VARIABLES ON THE UNIT BICIRCLE

The approximative properties of interpolational Lagrange polynomials, Fourier series of functions of two variables which are defined on the unit bicircle, is stated. For functions from generalized Hölder spaces $H_\omega$ the estimations are conducted for norms of $C$, $H_\omega$, $L_p$, $p>1$ spaces [1].

Let $\gamma_{01}$ and $\gamma_{02}$ denote the unit circles with centers in the origin; and $\gamma_0=\gamma_{01}\times\gamma_{02}$ is the unit bicircle. Let $\omega(\delta_1,\delta_2)$ be the some modulus of continuity, and $\Omega_1(\delta)$, $\Omega_2(\delta)$ are the simple moduli of continuity, which respect to that one; $\omega_{1,1}$ denotes the mixed modulus of continuity of the second order [2]. Let $H_\omega$ denotes the space of continuous functions $x(t,\tau)$ at $\gamma_0$, which satisfy the conditions:

$$H(x;\omega)=\sup_{\delta_1^2+\delta_2^2\neq 0}\frac{\omega(\delta_1,\delta_2;x)}{\omega(\delta_1,\delta_2)}\le c_1,\ H^{t\tau}(x;\omega)=\sup_{\delta_1^2+\delta_2^2\neq 0}\frac{\omega_{1,1}(\delta_1,\delta_2;x)}{\Omega_1(\delta_1)\Omega_2(\delta_2)}\le c_2.$$

In the space $H_\omega$ the norm is defined as:

$$\|x(t,\tau)\|_{H_\omega}=\|x(t,\tau)\|_C+H(x;\omega)+H^{t\tau}(x;\omega).$$

Let $(L_{mn}x)(t,\tau)=\sum_{p=0}^{2m}\sum_{q=0}^{2n}x(t_p,\tau_q)l_p(t)l_q(\tau)=\sum_{k=-m}^{m}\sum_{l=-n}^{n}\lambda_{kl}t^k\tau^l$,

$$l_p(t)=\prod_{\substack{k=0\\k\neq p}}^{2m}\frac{t-t_k}{t_p-t_k}\left(\frac{t_p}{t}\right)^m=\sum_{k=-m}^{m}\lambda_{1,k}^{(p)}t^k,\quad l_q(\tau)=\prod_{\substack{j=0\\j\neq q}}^{2n}\frac{\tau-\tau_j}{\tau_q-\tau_j}\left(\frac{\tau_q}{\tau}\right)^n=\sum_{j=-n}^{n}\lambda_{2,j}^{(q)}\tau^j,$$

denotes interpolational Lagrange polynomial of the function $x(t,\tau)$ with respect to the system of equidistant points at $\gamma_0$:

$$t_p = exp\left\{\frac{2\pi i}{2m+1}(p-m)\right\},\ i^2=-1,\ p=0,...,2m;$$

$$\tau_q = exp\left\{\frac{2\pi i}{2n+1}(q-n)\right\},\ i^2=-1,\ q=0,...,2n.$$

Let operator $\Phi_{mn}$ assignes to any function $x(t,\tau)\in H_\omega$ the $mn$-th partial sum of its Fourier series, that is,

$$(\Phi_{mn}x)(t,\tau)=\sum_{k=-m}^{m}\sum_{l=-n}^{n}x_{kl}t^k\tau^l;\ \ x_{kl}=\frac{1}{4\pi^2}\int_{\gamma_{01}}\int_{\gamma_{02}}\frac{x(t,\tau)}{t^{k+1}\tau^{l+1}}dtd\tau,\ k,l=0,\pm1,\pm2,....$$

***Theorem 1.*** For any function $x(t,\tau)\in H_\omega$ and for arbitrary natural $m$, $n$ the unequality is fulfilled:

$$\|x-L_{mn}x\|_C \le clnmlnnH(x;\omega)\omega\left(\frac{1}{m},\frac{1}{n}\right);$$

$$\|x-\Phi_{mn}x\|_C \le (1+cln(2m+1)ln(2n+1))H(x;\omega)\omega\left(\frac{1}{m},\frac{1}{n}\right).$$

***Theorem 2.*** Let $x(t,\tau)\in H_{\omega^{(1)}}$; $\omega^{(2)}(\delta_1,\delta_2)$ is such that $H_{\omega^{(1)}}\subset H_{\omega^{(2)}}$ and $\Omega_1^{(1)}(\delta)/\Omega_1^{(2)}(\delta)$, $\Omega_2^{(1)}(\delta)/\Omega_2^{(2)}(\delta)$ are increasing functions [3].Then:

$$\|x-L_{mn}x\|_{H_{\omega^{(2)}}} \le clnmlnn\frac{\omega^{(1)}\left(\frac{1}{m},\frac{1}{n}\right)}{\Omega_1^{(2)}\left(\frac{1}{m}\right)\Omega_2^{(2)}\left(\frac{1}{n}\right)}\|x\|_{H_{\omega^{(1)}}};$$

$$\|x-\Phi_{mn}x\|_{H_{\omega^{(2)}}} \le clnmlnn\frac{\omega^{(1)}\left(\frac{1}{m},\frac{1}{n}\right)}{\Omega_1^{(2)}\left(\frac{1}{m}\right)\Omega_2^{(2)}\left(\frac{1}{n}\right)}\|x\|_{H_{\omega^{(1)}}}.$$

***Theorem 3.*** Let $x(t,\tau)\in H_\omega$. Then the estimation is fulfilled ( $p>1$ ):

$$\|x-L_{mn}x\|_{L_p} \le (1+c(p))H(x;\omega)\omega\left(\frac{1}{m},\frac{1}{n}\right),$$

where $\left\|L_{mn}\right\|_{C\to L_p} \le c(p)$.

## REFERENCES

1. Snizhko, N. Approximation of functions of two variables on the unit bicircle in generalized Hölder spaces [Текст] / N. Snizhko // Abstracts of VIII International Scientific and Practical Conference. Prague, Czech Republic, 2020. – P. 577–582

2. Тиман, А. Ф. Теория приближения функций действительного переменного [Текст] / А. Ф.Тиман. – М. : ГИФМЛ, 1965. – 624 с.

3. Сніжко, Н. В. Класифікація узагальнених просторів Гельдера функцій двох змінних [Текст] / Н. В. Сніжко // Вісник Київського університету. Сер. фіз.-мат. науки. – 1999. – Вип. 3. – С. 124–128.

УДК 371.31

Сніжко Н.В.[1]

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

## ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Виникнення дистанційного навчання спричинило потребу розробки і впровадження дистанційних освітніх технологій, тобто таких технологій, які реалізовані в основному із застосуванням інформаційних і телекомунікаційних технологій при опосередкованій (на відстані) або не цілком опосередкованій взаємодії студента і педагогічного працівника.

Дистанційне навчання має такі переваги:

• гнучкість – студенти в основному не відвідують регулярних занять у вигляді лекцій, семінарів. Кожен може вчитися стільки, скільки йому особисто необхідно для засвоєння курсу і отримання необхідних знань;

• паралельність – навчання може провадитись при поєднанні основної професійної діяльності з навчанням, тобто «без відриву від виробництва»;

• дальнодія – відстань від місцезнаходження студента до освітньої установи (за умови якісної роботи зв'язку) не є перешкодою для ефективного освітнього процесу;

• асинхронність – в процесі навчання студент і викладач можуть реалізовувати технологію навчання незалежно в часі, тобто за зручним для кожного розкладом і в зручному темпі;

• охоплення («масовість») – чисельність студентів не є критичним параметром. Вони мають доступ до багатьох джерел навчальної інформації (електронних бібліотек, пошукових систем, баз даних), а також можуть спілкува-

тися один з одним і з викладачем через мережі зв'язку або за допомогою інших засобів інформаційних технологій;

• нова роль викладача (в системі дистанційного навчання – тьютора), коли на нього покладаються такі функції, як координування пізнавального процесу, коригування курсу, консультування, керівництво навчальними проектами і т.д. Взаємодія зі студентами здійснюється в основному асинхронно за допомогою пошти або систем зв'язку. Допускаються (і заохочуються) також і очні контакти;

• нові інформаційні технології – в сучасному дистанційному навчанні використовуються переважно комп'ютери, смартфони, аудіо- і відеотехніка, системи і засоби телекомунікацій та ін.

При дистанційному навчанні широко використовується інтерактивна взаємодія, яке передбачає діалог будь-яких суб'єктів один з одним із використанням доступних їм засобів і методів. При цьому передбачається активна участь в діалозі обох сторін – обмін питаннями і відповідями, управління ходом діалогу, контроль за виконанням прийнятих рішень і т.п. Телекомунікаційне середовище, призначене для спілкування мільйонів людей один з одним, апріорі є інтерактивним середовищем. При дистанційному навчанні суб'єктами в інтерактивній взаємодії є викладачі та студенти, а засобами здійснення подібної взаємодії – електронна пошта, телеконференції, діалоги в режимі реального часу і т.д.

До числа недоліків дистанційного навчання відносяться:

• відсутність прямого очного спілкування між студентами та викладачем. Коли поруч немає людини, яка могла б емоційно забарвити знання, – це значний мінус для процесу навчання. Складно створити творчу, активну робочу атмосферу в групі студентів;

• необхідність в персональному комп'ютері та доступі в Інтернет; необхідність постійного доступу до джерел інформації. Потрібна хороша технічна оснащеність, але не всі студенти мають комп'ютер і вихід в Інтернет; потрібна технічна готовність до використання засобів дистанційного навчання;

• високі вимоги до постановки завдання на навчання, адміністрування процесу, складність мотивації слухачів;

• проблема аутентифікації користувача при перевірці знань. Неможливо сказати, хто на іншому кінці дроту;

• необхідність наявності цілої низки індивідуально-психологічних умов;

• студент, щоб пройти дистанційне навчання, повинен мати виняткову самоорганізацію, працьовитість і певний стартовий рівень освіти;

• висока вартість побудови системи дистанційного навчання на початковому етапі створення системи, значні витрати на створення системи дистанційного навчання, самих курсів дистанційного навчання і купівлю технічного забезпечення;

Наразі дистанційне навчання зазнає тимчасових труднощів, таких як:

1) недостатня комп'ютерна грамотність студентів і викладачів, відсутність досвіду дистанційного навчання; багато викладачів і студентів ще не готові до такого методу викладання, віддаючи перевагу класичній освіті;

2) недостатня розвиненість інформаційно-комунікаційних інфраструктур;

3) навчальні дистанційні курси недостатньо добре розроблені через те, що це потребує (окрім кваліфікованих фахівців) значних затрат часу;

4) слабке використання стандартів в дистанційному навчанні;

5) проблема пошуку фахівців. Потрібна висока кваліфікація розробників; для створення якісних мультимедійних курсів потрібна команда з фахівця предметної області, художника, програміста і т.д.

Але не дивлячись на перелічені складнощі та деякі наявні протиріччя між дистанційною та очною формами навчання, в умовах глобалізації та пандемії дистанційні технології завойовують своє місце в освітньому процесі.

УДК 621
П'янков В.П.[1], Зіненко І.І.[2]
[1] канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] асист. НУ «Запорізька політехніка»

## ВИПРОМІНЮВАННЯ ІЗ СЕКТОРІАЛЬНОГО РУПОРА З ВБУДОВАНОЮ МЕТАЛОПЛАСТИНЧАТОЮ ЛІНЗОЮ

Мета даної роботи – розрахунок характеристик випромінювання та параметрів узгодження з збуджуючим хвилеводом компактної антенної симетричної структури, яка складається із Н-площинного рупора з вбудованою металопластинчатою лінзою (рис. 1), розміри яких дорівнюють декільком одиницям довжини хвилі $\lambda$. Для аналізу таких структур методи геометричної оптики та Кірхгофа-Гюйгенса неприйнятні. У даній роботі для розрахунків використовується точний електродинамічний метод добутку областей [1], який у роботі [2] був застосований для чисельного аналізу випромінювання із двомірного Н-площинного рупора зі складним кусково-лінійним контуром.

На рис. 1 позначені: $a$ – ширина збуджуючого хвилеводу, $R$ – довжина стінок рупора, $2\beta$ – кут його розкриву, $D$ – ширина розкриву рупора та лінзи, $O$ – точка, в якій розташований фокус еліптичного профілю лінзи, $f$ – фокусна відстань, $b$ – відстань між пластинами лінзи. Точка $O$ вибрана, як точка відліку. Пластини лінзи, стінки рупора та хвилеводу вважались нескінченно тонкими та ідеально провідними.

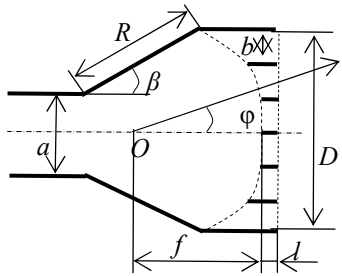



Рисунок 1 – Контур рупора з вбудованою металопластинчатою лінзою.

На рис. 2 приведені розраховані нормовані амплітудні діаграми спрямованості (ДС) випромінювання у дальній зоні для двох структур з розмірами: 1 – $R = 2{,}807\lambda$; $\beta = 24{,}88°$; $D = 3{,}125\lambda$; $f = 3{,}381\lambda$; 2 – $R = 4{,}920\lambda$; $\beta = 29{,}77°$; $D = 5{,}625\lambda$; $f = 6{,}085\lambda$. Однакові данні: $a = 0{,}71\lambda$; $l = 0{,}5\lambda$; $b = 0{,}625\lambda$. Еліптичний профіль розраховувався при коефіцієнті заломлення – 0,6.

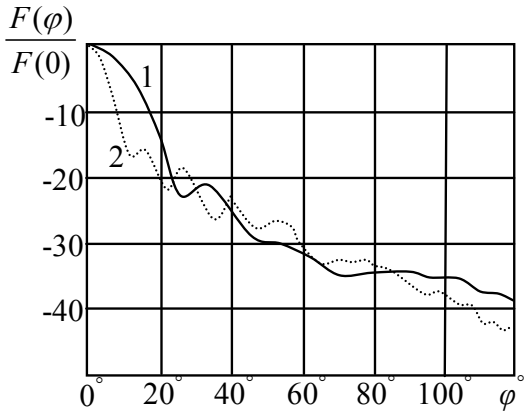



Рисунок 2 – Нормовані амплітудні ДС випромінювання у дальній зоні.

Були розраховані також: $|\Gamma|$ – модуль коефіцієнта відбиття, $\varphi_{0,1}$ – половина ширини головної пелюстки ДС на рівні 0,1 потужності, РБП – рівень бічних пелюсток (рівень максимуму найбільшої бічної пелюстки). Для пер-

шої структури було отримано: $|\Gamma| = 0{,}226$; $\varphi_{0,1} = 17{,}0°$; РБП=–20,9 дБ; для другої структури: $|\Gamma| = 0{,}201$; $\theta_{0,1} = 8{,}9°$; РБП= –15,7 дБ.

На завершення відзначимо, що структури "рупор з вбудованою металопластинчатою лінзою" має приблизно таке ж значення $|\Gamma|$, як і структури "рупор з невбудованою лінзою" з меншими стінками рупора та вказаними розмірами лінз, але значно менше заднє випромінювання, якщо порівнювати з результатами роботи [3].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Чумаченко В. П. Решение задачи дифракции волн на многоугольной цилиндрической поверхности методом произведения областей / В. П. Чумаченко // Доклады АН УССР. – 1989. – № 7. – С. 73–76.

2. Пьянков В. П. Решение Н-плоскостной задачи излучения из двумерного рупора со сложным кусочно-линейным контуром / В. П. Пьянков, В. П. Чумаченко // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1990. – Т. 33, № 5. – С. 604–610.

3. Пьянков В. П. Характеристики излучения Н-плоскостного рупора с металлопластинчатой линзой / В. П. Пьянков, В. П. Чумаченко // Радиотехника. – 1991. – № 3. – С. 70–72.

УДК 539.312
Фасоляк А.В.
канд. фіз.-мат. наук, старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

## ЗАСТОСУВАННЯ БІПОЛЯРНОЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТ ДО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК У ПРУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглядається пружне однорідне середовище з вільною поверхнею, яка задається площиною. Нехай середовище містить циліндричну порожнину, яка підкріплена тонкою пружною оболонкою. Припускається, що вісь циліндричної порожнини та площина поверхні – паралельні, а відстань між ними в межах від одного до шести радіусів порожнини. Розглядається випадок, у якому до внутрішньої поверхні оболонки прикладене динамічне навантаження, яке залежить від часу як одинична функція Хевісайда. Також використовується припущення, що навантаження не залежить від осьової координати, тобто задача зводиться до плоскої задачі теорії пружності.

Для отримання розв'язку, використовується біполярна система координат (БСК) [1]:

$$x = \frac{a_0 \sin\beta}{ch\alpha + \cos\beta},\ y = -\frac{a_0 sh\alpha}{ch\alpha + \cos\beta},\ a_0 = \sqrt{L^2 - R^2}\ , \qquad (1)$$

де $L$, $R$ – глибина залягання та радіус порожнини відповідно; $\{x,\ y\}$ – декартова система координат, центр якої лежить на осі порожнини, а вісь $Oy$ – перпендикулярна вільній поверхні середовища; $\{\alpha,\ \beta\}$ – БСК. На основі рівнянь теорії пружності у ортогональній системі координат [2] із застосуванням співвідношень (1) отримано рівняння теорії пружності у БСК. Рух описувався наближеними рівняннями теорії оболонок, що задовольняють гіпотезі Кірхгофа-Лява, та у БСК отримуються на основі відповідних рівнянь у ортогональній системі координат [3].

З геометричної точки зору, область, що розглядається в задачі є півплощиною з круговим отвором. Застосування БСК дозволяє відобразити цю нескінченну область у декартовій системі координат у прямокутник скінченних розмірів.

Для отримання розв'язку за просторовими координатами використовується метод скінченних різниць, а за часовою координатою – ітераційний процес (θ-метод Вільсона) [4].

Отримані результати порівняно з відповідними результатами аналогічної задачі розв'язанної методом скінченних елементів [4].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Уфлянд Я. С. Биполярные координаты в теории упругости / Я. С. Уфлянд. – Л. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1950. – 232 с.

2. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. – М. : Мир, 1975. – 872 с.

3. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем / А. П. Филиппов. – М. : Машиностроение, 1970. – 736 с.

4. 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.

УДК 539.3
Антоненко Н.М.[1], Харитонов І.А.[2], Шевченко М.О.[2]
[1] канд. фіз.-мат. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»
[2] студ. гр. Е-410 НУ «Запорізька політехніка»

# ПРО ОДИН ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ОСЕСИМЕТРИЧНОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ДЛЯ ШАРУВАТОЇ ПЛИТИ З НЕІДЕАЛЬНИМ ТЕПЛОВИМ КОНТАКТОМ МІЖ ШАРАМИ

Розглянемо шарувату плиту, що складається з $n$ пружних, однорідних та невагомих шарів. На спільних межах шарів виконуються умови неідеального теплового контакту. На верхній та нижній межах плити задано температуру. Необхідно знайти розподіли температури в точках плити.

Шари нумеруватимемо зверху вниз. У кожному шарі введемо локальну циліндричну систему координат так, як показано на рис. 1.

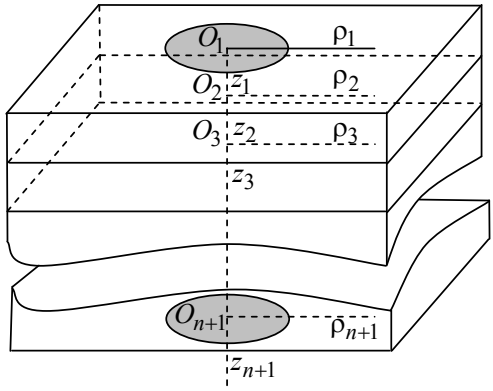



Рисунок 1 – Шарувата плита.

Крайові умови задачі:

$$T_1(\rho,0)=f(\rho),\ T_n(\rho,h_n)=\widetilde{f}(\rho),$$

де $f(\rho)$, $\widetilde{f}(\rho)$ – відомі функції.

Умови на спільних межах шарів плити:

$$k_{Tk}\frac{\partial T_k}{\partial z}(\rho,h_k)=\frac{1}{R_k}\left[T_{k+1}(\rho,0)-T_k(\rho,h_k)\right],$$

$$k_{T\,k+1}\frac{\partial T_{k+1}}{\partial z}(\rho,0)=k_{T\,k}\frac{\partial T_k}{\partial z}(\rho,h_k),\ k=\overline{1,n-1},$$

де $R_k$ – коефіцієнт теплового опору, $k_{T\,k}$ – коефіцієнти теплопровідності шарів.

У просторі трансформант Ганкеля вираз для визначення температури в точках $k$ -го шару можна представити у вигляді лінійної комбінації допоміжних функцій [1] $\eta_k=\overline{T}_k(p,0)$, $\varepsilon_k=\frac{1}{p}\frac{d\overline{T}_k}{dz}(p,0)$: $\overline{T}_k(\xi,z)=\mathrm{ch}pz\,\eta_k+\mathrm{sh}pz\,\varepsilon_k$. Увівши допоміжний шар з номером $(n+1)$, вважаючи, що на спільній межі $n$ -го та $(n+1)$-го шарів виконуються умови ідеального теплового контакту, отримано рекурентні формули для знаходження допоміжних функцій:

$$\varepsilon_k=-r_k\eta_k+F_k\eta_{n+1},$$

$$\eta_{k+1}=\left(C_k+L_kpS_k-r_k\left(S_k+L_kpC_k\right)\right)\eta_k+\left(S_k+L_kpC_k\right)\eta_{n+1},$$

де $\Delta_k=\frac{k_{T\,k}}{k_{T\,k+1}}$, $S_k=\mathrm{sh}\,p_k$, $C_k=\mathrm{ch}\,p_k$, $p_k=ph_k$, $L_k=R_kk_{Tk}$,

$r_n=\mathrm{cth}\,p_n$, $F_n=\frac{1}{S_n}$, $r_k=\frac{\Delta_kS_k+r_{k+1}\left(C_k+L_kpS_k\right)}{\Delta_kC_k+r_{k+1}\left(S_k+L_kpC_k\right)}$,

$F_k=\frac{F_{k+1}}{\Delta_kC_k+r_{k+1}\left(S_k+L_kpC_k\right)}$, $k=\overline{1,n-1}$.

Функції $\eta_1$ та $\eta_{n+1}$ знаходять з крайових умов задачі, а решту функцій знаходять за наведеними вище формулами. Після підстановки отриманих допоміжних функцій у вирази для трансформант температури та застосування до них оберненого перетворення Ганкеля, отримаємо шукані розподіли температури в точках шарів плити.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Величко І. Г. Осесиметрична мішана задача термопружності для багатошарової основи / І. Г. Величко, І. Г. Ткаченко // Динамические системы. – 2009. – Вып. 26. – С. 3–12.

Наукове електронне видання

Можна використовувати в локальному та
мережному режимах

# ТИЖДЕНЬ НАУКИ-2021.
# Машинобудівний факультет

Збірник тез доповідей щорічної
науково-практичної конференції викладачів,
науковців, молодих учених, аспірантів та студентів
19–23 квітня 2021 року

Один електронний оптичний диск (DVD-ROM);
супровідна документація.
Тираж 100 прим. Зам. № 309

Видавець і виготовлювач
Національний університет «Запорізька політехніка»
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

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