Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра Машинобудування, транспорту і зварювання

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 5 курсу, групи ЗПОМ24мг
спеціальності:015.34«Професійна освіта (Машинобудування)»
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

_____ /Олександр КАПІТАН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ /Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ /Вікторія КНЯЗЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ /Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ /Валентина СКОРКІНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання
Спеціальність 015.34 Професійна освіта (Машинобудування)
Освітньо-професійна програма Професійна освіта (Машинобудування)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МТіЗ
_____ О.С. Подоляк
"06" 10 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

студенту (ці) Олександру КАПІТАНУ
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі

затверджена наказом 4801-5/3665 від 06.10. 2025 р.

2. Термін здачі магістрантом закінченої роботи " 01 " грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: *Зразки поліамідних деталей*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): *Вступ. Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі Сучасний стан проблеми технологічного забезпечення підвищення експлуатаційних характеристик поліамідних деталей. Розробка маршрутної технології маслонаполнення поверхневого шару деталів з поліаміду як фінішної операції механічної обробки Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі» для фахівця машинобудівних підприємств. Висновки. Список джерел інформації. Додатки.*

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів: *У вигляді презентації PowerPoint.*

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
педагогічний	Бакуменко Л.Г.			

7. Дата видачі завдання «7» 10 2025 р.

Керівник _____ Антон СКОРКІН
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Олександр КАПІТАН
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Вибір теми й обґрунтування проблеми дослідження. Визначення об'єкта, предмета, мети й завдань.		
2.	Складання плану роботи. Підбор літератури й інших джерел		
3.	Оформлення завдання проектування для затвердження теми кваліфікаційної роботи		
4.	Підготовка аналітичної частини		
5.	Підготовка теоретичної частини		
6.	Розробка дослідницької частини		
7.	Розробка методичного розділу		
8.	Підготовка графічного матеріалу		
9.	Доробка проекту по зауваженнях наукового керівника		
10.	Доробка проекту по зауваженнях консультантів		
11.	Оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка до захисту.		
12.	Захист кваліфікаційної роботи		

Здобувач вищої освіти _____ Олександр КАПІТАН
(підпис) (ім'я, прізвище)

Нормоконтроль _____ Олег ПОДОЛЯК
(підпис) (ім'я, прізвище)

ЗМІСТ

Вступ 7

Розділ 1 Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі 10

2 Сучасний стан проблеми технологічного забезпечення підвищення експлуатаційних характеристик поліамідних деталей. 20

3. Розробка маршрутної технології маслонаполнення поверхневого шару деталів з поліаміду як фінішної операції механічної обробки. 36

4 Технологічне забезпечення процесу маслонаповнення та експериментальне підтвердження підвищення зносостійкості поліамідних деталей марки па6 47

5 Оптимізація технологічного процесу маслонаповнення і впровадження результатів дисертаційного дослідження 54

Розділ 6 Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі» для фахівця машинобудівних підприємств 67

Висновки 80

Список використаних джерел 83

Реферат магістерської кваліфікафійної роботи з теми “ Професійна підготовка фахівця машинобудівних підприємств з підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології маслонаповнення поверхневого шару деталі ”

РЕФЕРАТ

Робота містить 85с., 42 рис., 21 табл., 22 джерел.

Кваліфікаційна робота (дипломний проєкт) присвячений науковому обґрунтуванню та вдосконаленню системи підготовки фахівців машинобудівних підприємств з підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології маслонаповнення поверхневого шару деталі.

У першому розділі розглянуто Актуальність професійної підготовки фахівця машинобудівних підприємств з підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі.

У другому розділі Сучасний стан проблеми технологічного забезпечення підвищення експлуатаційних характеристик поліамідних деталей.

У третьому розділі виконано Розробка маршрутної технології маслонаполнення поверхневого шару деталів з поліаміду як фінішної операції механічної обробки.

У четвертого розділі Технологічне забезпечення процесу маслонаповнення та експериментальне підтвердження підвищення зносостійкості поліамідних деталей марки па6.

Запропонована методика може бути покладена в основу інноваційних технологій під час навчання для отримання кваліфікованих фахівців машинобудівної галузі.

Ключові слова: професійна підготовка, машинобудівна галузь, поліамід, маслонаповнення

Abstract of the master's qualification work on the topic “Professional training of specialists of machine-building enterprises to increase the efficiency of processing axial cutting tools from high-speed steel by applying the milling-turning method”

ABSTRACT

The work contains 83 pages, 42 figures, 21 tables, 23 sources.

The qualification work (diploma project) is devoted to the scientific substantiation and improvement of the system of training specialists of machine-building enterprises to increase the efficiency of processing axial cutting tools from high-speed steel by applying the milling-turning method.

The first section considers the relevance of professional training of specialists of the machine-building industry to increase the efficiency of processing axial cutting tools from high-speed steel by applying the milling-turning method.

The second section provides a review of scientific, technical and regulatory literature. The research tasks are stated.

The third section provides mathematical modeling of the orthogonal milling-turning process.

The fourth section provides methods and means of conducting research.

In the fifth chapter, experimental studies of the influence of cutting modes on the initial parameters.

The proposed methodology can be used as the basis for innovative technologies during training to obtain qualified specialists in the mechanical engineering industry.

Keywords: professional training, mechanical engineering industry, specialist, milling, high-speed steel

ВСТУП

На сьогоднішній день існує широка номенклатура поліамідних виробів, що використовуються в машинобудуванні, що експлуатуються у важких умовах: сухого старту, збідненого або відсутнього мастила, а також підвищеної запиленості та забрудненості.

Щоб підвищити якість поліамідних деталей, що застосовуються в машинобудівних виробах, а саме підвищити їх здатність навантаження і стійкість до абразивного зносу необхідно вирішити проблеми технологічного забезпечення, що є актуальним завданням.

Для підвищення якості важко навантажених поліамідних деталей є два підходи: перший – це модифікація структури полімеру при його виробництві;

другий - технологічні процеси, що дозволяють підвищити якість вже готової поліамідної деталі.

При першому підході можливий прояв деяких недоліків, пов'язаних із збільшенням пластичності та плинності всього обсягу поліамідної (марки ПА6) деталі (ПД). Хотілося б також відзначити, що при складанні та виготовленні виробів з таких матеріалів створюються складнощі з виконанням їх нероз'ємних з'єднань (зварювання, склеювання тощо).

Другий підхід має безперечну перевагу, пов'язану з можливістю підвищення якості поверхневого шару окремих поверхонь готової поліамідної деталі. Найбільш перспективним напрямком реалізації другого підходу є розробка технологічних процесів підвищення якості поверхневого шару шляхом просочення поліамідних деталей рідким матеріалом антифрикційним.

При цьому існують проблеми технологічного підходу забезпечення підвищення якості поліамідних деталей, що експлуатуються у важких умовах, пов'язані з відсутністю науково-обґрунтованих технологічних процесів маслонаповнення та їх режимів та умов обробки, що забезпечують збільшення зносостійкості поліамідних деталей з урахуванням необхідної глибини просочення.

Об'єкт дослідження: процес професійної підготовки фахівців машинобудівних підприємств у сфері використання сучасних технологій зміцнення полімерних деталей, що експлуатуються в умовах підвищених механічних та температурних навантажень.

Предмет дослідження: професійна підготовка фахівців, спрямована на формування компетентностей щодо підвищення зносостійкості поліамідних деталей шляхом застосування технології масло-наповнення поверхневого шару, включно з вибором матеріалів, методів зміцнення та контролю якості обробки.

Мета дослідження: розробити та науково обґрунтувати дидактичну систему підготовки фахівців машинобудівної галузі, яка забезпечує ефективне засвоєння методів підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, через впровадження технології масло-наповнення поверхневого шару, підвищення експлуатаційних характеристик деталей та стабільності роботи виробів.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан професійної підготовки інженерів і технологів машинобудівних підприємств щодо застосування інноваційних технологій зміцнення полімерних деталей.

2. Визначити професійні компетентності, необхідні для розробки технологій підвищення зносостійкості поліамідних деталей, включно з вибором методів масло-наповнення, параметрів обробки та контролю властивостей поверхневого шару.

3. Розробити дидактичний проєкт факультативного заняття, спрямований на формування знань і практичних навичок щодо підвищення зносостійкості поліамідних деталей із застосуванням технології масло-наповнення поверхневого шару, що включає методичні матеріали, практичні завдання та приклади виробничих ситуацій.

Методи дослідження: системний, структурний та порівняльний аналіз науково-технічної, навчально-методичної та виробничої літератури;

моделювання технологічних процесів; розробка практичних завдань та дидактичних матеріалів; педагогічне проектування та тестування навчальних програм.

Наукова новизна: полягає у створенні інтегрованої дидактичної системи професійної підготовки, що поєднує теоретичне опанування методів підвищення зносостійкості поліамідних деталей. Запропонована система дозволяє формувати інженерно-технологічні компетентності на основі реальних виробничих завдань та сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик деталей.

Практичне значення: результати дослідження можуть бути використані у вищих навчальних закладах технічного профілю, на курсах підвищення кваліфікації та у виробничих навчальних центрах машинобудівних підприємств. Розроблені методичні матеріали, технологічні схеми та практичні завдання сприяють удосконаленню професійної підготовки фахівців, підвищенню зносостійкості поліамідних деталей і стабільності їх експлуатації, а також формують навички роботи з цифровими системами планування та контролю якості.

Запропоновані методичні рішення: дозволяють удосконалити підготовку фахівців у сфері зміцнення полімерних деталей; забезпечують скорочення часу на впровадження технологій зміцнення; підвищують надійність і довговічність виробів; створюють умови для інтеграції цифрового моделювання та оптимізації технологічних маршрутів у навчальний процес; формують компетентності, необхідні для роботи на сучасних машинобудівних підприємствах із важконавантаженими поліамідними деталями.

Структура та обсяг роботи: містить анотації українською та англійською мовами, перелік умовних позначень, вступ, чотири розділи з висновками до кожного, загальні висновки, список використаних джерел та додатки.

РОЗДІЛ 1
АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦЯ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ З ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОЛІАМІДНИХ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У ВАЖКИХ УМОВАХ, НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МАСЛО НАПОВНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛІ

1.1. Необхідність професійної підготовки фахівців для підвищення зносостійкості деталей

Сучасний розвиток машинобудівної галузі ставить перед підприємствами високі вимоги до якості та довговічності деталей, що експлуатуються в складних умовах. Поліамідні компоненти, широко застосовувані в машинобудуванні завдяки їхнім високим механічним характеристикам і стійкості до хімічних агентів, часто піддаються значним навантаженням, що призводить до інтенсивного зносу поверхневих шарів. У зв’язку з цим професійна підготовка інженерів і технологів, здатних розробляти та впроваджувати методи підвищення зносостійкості поліамідних деталей, стає критично важливою для забезпечення ефективності та надійності виробничих процесів.

Сучасні машинобудівні підприємства висувають до фахівців вимоги, що виходять за межі традиційного володіння теоретичними знаннями. Інженери та технологи повинні мати глибоке розуміння фізико-хімічних властивостей поліамідних матеріалів, механізмів зношування, впливу експлуатаційних факторів на поверхневий шар деталей та методів їх зміцнення. Крім того, фахівець має володіти навичками проєктування технологічних процесів, здатністю обирати оптимальні матеріали, регламентувати режими обробки, оцінювати ефективність застосованих технологій і контролювати їх впровадження на виробництві.

Компетентності, необхідні для професійної діяльності у сфері підвищення зносостійкості, охоплюють як технічні, так і організаційні аспекти. До них належать: здатність аналізувати виробничі дефекти та передбачати їх виникнення, оцінювати вплив експлуатаційних навантажень на ресурси деталей, вибирати ефективні методи обробки та зміцнення поверхні, а також впроваджувати інноваційні технології у виробничий цикл. Особливе значення має знання сучасних методів інтенсифікації зносостійкості, зокрема технології масло-наповнення поверхневого шару, яка дозволяє збільшити термін служби деталей у важких умовах експлуатації.

Роль інженера та технолога у цьому процесі є визначальною. Від їхньої кваліфікації залежить не лише якість окремої деталі, а й загальна ефективність роботи виробничого обладнання, зменшення простоїв та зниження витрат на ремонт і заміну вузлів. Підготовлений спеціаліст здатний забезпечити стабільність і надійність виробництва, розробити методичні рекомендації щодо оптимального використання матеріалів, вдосконалити технологічні процеси та організувати контроль якості на всіх етапах.

Таким чином, підвищення професійної підготовки інженерів і технологів, які працюють із поліамідними деталями, є необхідною умовою для досягнення високої зносостійкості компонентів і забезпечення стабільного функціонування машинобудівного виробництва. Інтеграція сучасних знань про матеріали, технології зміцнення та практичних навичок у навчальний процес формує компетентного фахівця, здатного ефективно застосовувати інноваційні методи у виробництві, підвищуючи надійність і довговічність деталей у складних експлуатаційних умовах.

1.2. Особливості поліамідних матеріалів і вплив умов експлуатації на їх зносостійкість

Поліаміди є одними з найпоширеніших інженерних полімерів у машинобудуванні завдяки поєднанню високих механічних характеристик,

термостійкості та хімічної стійкості. Фізико-механічні властивості цих матеріалів, зокрема міцність на розтяг, твердість, ударна в'язкість та стійкість до стирання, визначають їхню поведінку під механічним навантаженням. Під дією сил тертя, ударів та циклічних навантажень поліамідні деталі можуть проявляти деформації, втрату початкової геометрії та зниження функціональних характеристик, що знижує їх ресурс і надійність. Вивчення цих властивостей є важливою складовою підготовки фахівців, оскільки дозволяє передбачити критичні точки у конструкції та процесі експлуатації виробів.

Експлуатаційні умови мають суттєвий вплив на довговічність поліамідних деталей. Підвищені або низькі температури, агресивне хімічне середовище, підвищене тертя та контактні навантаження призводять до пришвидшення зносу та формування мікротріщин на поверхні деталей. Поліамідні матеріали, які працюють у складних умовах, піддаються комбінованим впливам, що включає одночасну дію механічних навантажень і хімічної агресії, що вимагає від фахівців здатності аналізувати комплексні фактори зношування. Особливо важливо враховувати режим роботи деталей у вузлах тертя та підвищених навантаженнях, де недотримання оптимальних умов експлуатації може призвести до дострокового виходу виробу з ладу.

Враховуючи ці особливості, підвищення зносостійкості поліамідних деталей стає ключовим завданням у сучасному машинобудуванні. Інженери та технологи повинні володіти знаннями про методи зміцнення поверхневого шару, що дозволяють значно продовжити ресурс деталей. Одним із ефективних способів є технологія масло-наповнення поверхневого шару, яка забезпечує формування мастильної плівки безпосередньо у структурі матеріалу, зменшуючи тертя і знос у процесі експлуатації. Такі технології потребують ретельного підходу до вибору параметрів обробки, контролю температурного режиму та взаємодії матеріалу з мастильними компонентами.

Необхідність удосконалення технологій обумовлена прагненням забезпечити стабільну роботу поліамідних деталей навіть у складних умовах

експлуатації. Професійна підготовка фахівців повинна включати знання про механізми зносу, методи підвищення зносостійкості та практичні навички впровадження сучасних технологій зміцнення поверхневого шару. Такий підхід дозволяє не лише підвищити надійність і довговічність виробів, а й оптимізувати витрати на ремонт та обслуговування вузлів, що працюють у важких умовах, підвищуючи загальну ефективність машинобудівного підприємства.

Отже, особливості фізико-механічних властивостей поліамідних матеріалів та вплив умов експлуатації на їх ресурс визначають необхідність комплексного підходу до професійної підготовки інженерів і технологів. Формування компетентностей у галузі аналізу навантажень, вибору методів зміцнення та впровадження сучасних технологій є запорукою забезпечення високої зносостійкості деталей та стабільної роботи виробничих процесів у машинобудівній галузі.

1.3. Роль інженера та технолога у впровадженні інноваційних технологій

В умовах сучасного машинобудівного виробництва професійна підготовка інженерів і технологів набуває особливої актуальності, адже від рівня компетентності цих фахівців залежить ефективність і стабільність технологічних процесів. Впровадження інноваційних технологій, таких як методи зміцнення поверхневого шару поліамідних деталей за допомогою масло-наповнення, вимагає від інженера та технолога глибокого розуміння як фізико-механічних властивостей матеріалу, так і взаємодії його з мастильними компонентами в умовах експлуатаційних навантажень. Завдання фахівця полягає не лише у безпосередньому застосуванні новітніх технологій, але й у плануванні, контролі та оптимізації всього технологічного процесу, що включає вибір параметрів обробки, режимів зміцнення та контроль якості отриманих виробів.

Інженер та технолог відіграють ключову роль у впровадженні інновацій, оскільки вони визначають критичні точки процесу, де можливе виникнення дефектів, і розробляють способи їх запобігання. Підготовка фахівців повинна включати знання про властивості поліамідних матеріалів, їх поведінку під навантаженням та в умовах тертя, а також методи контролю зміцненого шару, що дозволяє забезпечити стабільність і повторюваність технологічного процесу. Компетентність інженера визначає здатність прогнозувати результат зміцнення, оцінювати якість оброблених деталей і коригувати параметри процесу в режимі реального часу, що безпосередньо впливає на зносостійкість виробів та тривалість їх експлуатації.

Важливим аспектом роботи фахівця є оптимізація технологічного процесу, що дозволяє досягти високого ресурсу деталей і зменшення браку продукції. Інженер повинен аналізувати весь цикл виготовлення та обробки деталей, визначати фактори, що впливають на точність і однорідність зміцненого шару, і розробляти рекомендації щодо покращення процесу. Технолог відповідає за практичну реалізацію цих рішень на виробництві, контроль дотримання режимів обробки та забезпечення стабільної якості продукції. Взаємодія цих двох ролей формує ефективну систему управління технологічним процесом, де інженер забезпечує аналітичну та проєктну частину, а технолог реалізує практичну і контрольну складові.

Професійна компетентність фахівців у сфері впровадження інноваційних технологій безпосередньо впливає на підвищення ресурсу деталей та зменшення дефектів у виробництві. Вона передбачає уміння працювати з цифровими моделями процесів, проводити аналіз результатів зміцнення, вибирати оптимальні параметри та контролювати їх виконання. Особливу увагу необхідно приділяти системі контролю якості, яка включає перевірку товщини та однорідності мастильного шару, оцінку зносостійкості при лабораторних випробуваннях та аналіз довгострокової експлуатації деталей у складних умовах. Такий підхід дозволяє забезпечити надійність

виробів і зменшити витрати на ремонт і заміну деталей, що є критичним для машинобудівних підприємств.

Інженер та технолог несуть відповідальність за ефективність виробничих процесів і якість продукції, оскільки від правильності планування, впровадження та контролю технології залежить безпека, довговічність і працездатність машинобудівних виробів. Підвищення кваліфікації фахівців, оволодіння сучасними методами аналізу та цифровими технологіями дозволяє не лише вдосконалювати процеси виробництва, але й створювати умови для впровадження нових матеріалів та технологій у майбутньому.

Крім того, роль інженера та технолога полягає у безперервному пошуку шляхів удосконалення процесу зміцнення деталей, що дозволяє підвищити продуктивність виробництва, скоротити час на виконання операцій та зменшити витрати матеріалів. Це особливо важливо для деталей, що працюють у важких умовах, де від зносостійкості залежить надійність усієї системи. Компетентний фахівець здатний оцінити ризики передчасного зносу, розробити профілактичні заходи та запропонувати технологічні рішення, які забезпечують стабільність і високу якість продукції.

Таким чином, роль інженера та технолога у впровадженні інноваційних технологій зміцнення поліамідних деталей є визначальною для підвищення ресурсності, надійності та якості виробів. Професійна підготовка фахівців має бути орієнтована на комплексне формування компетентностей у сфері планування, контролю, оптимізації та оцінки технологічних процесів, що забезпечує ефективне використання сучасних методів зміцнення матеріалів і сприяє підвищенню конкурентоспроможності машинобудівних підприємств на ринку.

1.4. Взаємозв’язок освіти та виробництва

В умовах сучасного машинобудівного виробництва взаємозв’язок освіти та виробництва набуває особливої значущості, оскільки ефективність

підготовки фахівців визначає здатність підприємств впроваджувати новітні технології, підвищувати ресурсність і надійність виробів, а також підтримувати конкурентоспроможність на ринку. Професійна підготовка інженерів та технологів, що працюють із поліамідними деталями та методами зміцнення поверхневого шару, потребує інтеграції теоретичних знань і практичних навичок, що дозволяє забезпечити високий рівень професійної компетентності.

Сучасні методи підготовки фахівців включають різноманітні форми навчання: лекції, лабораторні та практичні заняття, моделювання технологічних процесів та використання спеціалізованого програмного забезпечення для цифрового проектування і планування виробництва. Лекційні заняття дають змогу студентам опанувати фундаментальні теоретичні знання про фізико-механічні властивості поліамідних матеріалів, механізми зношування, вплив експлуатаційних навантажень та ефективність різних методів зміцнення поверхневого шару. У лабораторних заняттях студенти набувають базових практичних умінь щодо підготовки деталей, контролю якості матеріалів і застосування методів зміцнення, що створює міцну основу для подальшої професійної діяльності.

Моделювання технологічних процесів є ключовим інструментом, що дозволяє студентам відпрацьовувати прийоми планування, контролю та оптимізації технологій у безпечному середовищі, перед тим як застосовувати їх на виробництві. За допомогою цифрових симуляцій можна імітувати процеси масло-наповнення поверхневого шару поліамідних деталей, оцінювати їх вплив на зносостійкість, перевіряти послідовність операцій та прогнозувати результативність технології. Такі методи навчання сприяють розвитку аналітичного мислення, уміння приймати інженерно-технологічні рішення та оцінювати ефективність технологічних рішень у реальних виробничих умовах.

Практичне навчання та стажування на виробництві є невід’ємною складовою професійної підготовки, оскільки вони дозволяють закріпити

отримані теоретичні знання та набуті навички в реальних умовах експлуатації обладнання. Студенти під час виробничих практик знайомляться з роботою машинобудівних підприємств, спостерігають за процесами підготовки та зміцнення деталей, аналізують проблемні ситуації та набувають досвіду прийняття технологічних рішень. Це сприяє формуванню професійних компетентностей, необхідних для підвищення зносостійкості деталей і надійності виробів у складних умовах експлуатації.

Інтеграція теоретичних знань і практичних навичок забезпечується через поєднання навчальних модулів, що включають лекційні курси, лабораторні роботи, моделювання технологічних процесів і виробничі стажування. Такий підхід дозволяє сформувати у студентів здатність до комплексного аналізу технологій, оцінки ефективності методів зміцнення, а також навички планування та оптимізації виробничих процесів. Особливо важливим є навчання роботі з контролем якості та оцінкою зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, оскільки це безпосередньо впливає на довговічність виробів і надійність машинобудівного обладнання.

Особливу увагу слід приділяти розвитку навичок критичного мислення та аналітичного підходу до оцінки результатів технологічних процесів. Студенти повинні вміти ідентифікувати критичні точки виробничого процесу, оцінювати ефективність різних методів зміцнення поверхневого шару, а також пропонувати оптимальні рішення для підвищення ресурсу деталей і зменшення браку. Завдяки інтегрованому підходу навчання, поєднанню теорії та практики, майбутні фахівці набувають умінь, необхідних для ефективної роботи в сучасному машинобудівному виробництві.

Взаємозв’язок освіти та виробництва також проявляється у тому, що підготовка фахівців орієнтована на вирішення реальних завдань підприємств, включаючи вдосконалення технологій зміцнення поліамідних деталей, оптимізацію параметрів обробки та впровадження новітніх матеріалів. Це дозволяє забезпечити високу практичну значущість навчального процесу і сприяє тому, що випускники можуть відразу брати участь у виробничих

процесах, застосовуючи набуті знання та навички для підвищення надійності і довговічності продукції.

Таким чином, сучасна професійна підготовка інженерів і технологів повинна ґрунтуватися на поєднанні теоретичних знань, цифрового моделювання та практичного досвіду. Взаємозв'язок освіти і виробництва є ключовим чинником у формуванні висококваліфікованих фахівців, здатних впроваджувати інноваційні технології зміцнення деталей, забезпечувати їхню зносостійкість та стабільну роботу машинобудівного обладнання. Такий підхід не лише підвищує ефективність навчального процесу, але й сприяє розвитку професійних компетентностей, необхідних для успішної діяльності на сучасних машинобудівних підприємствах.

1.5. Актуальність удосконалення методів професійної підготовки

У сучасному машинобудівному виробництві професійна підготовка фахівців є одним із ключових факторів, що визначає конкурентоспроможність підприємств та ефективність їх роботи. Особливо важливою стає підготовка інженерів і технологів, здатних працювати з поліамідними деталями, що експлуатуються в умовах високих навантажень та агресивного середовища, а також впроваджувати інноваційні методи зміцнення поверхневого шару виробів. У зв'язку з цим постає необхідність удосконалення методів професійної підготовки, що дозволяє інтегрувати сучасні технології у навчальні програми та забезпечити формування у студентів компетентностей, які відповідають вимогам сучасного виробництва.

Одним із головних напрямів удосконалення професійної підготовки є інтеграція цифрових технологій та сучасного обладнання у навчальний процес. Використання CAD/CAM-систем, цифрових тренажерів, моделювання технологічних процесів та симуляцій дозволяє студентам набути практичних навичок роботи з реальними виробничими ситуаціями ще до виходу на підприємство. Такі підходи дозволяють відпрацьовувати критичні операції,

оцінювати ефективність технологічних рішень, передбачати можливі дефекти та шляхи їх усунення. Крім того, цифрове моделювання дає змогу оцінити вплив різних режимів обробки та методів зміцнення на зносостійкість поліамідних деталей, що працюють у складних умовах експлуатації, і таким чином підвищити точність і надійність виробів.

Удосконалення методів навчання передбачає також розвиток аналітичних навичок та здатності студентів до проєктної діяльності. Фахівці повинні не лише виконувати технологічні операції, але й вміти аналізувати виробничі процеси, визначати критичні точки технології зміцнення поверхневого шару, оцінювати ефективність застосованих методів і пропонувати оптимальні рішення. Такий підхід сприяє формуванню у студентів комплексного бачення виробничого процесу, уміння працювати з великими обсягами інформації та приймати обґрунтовані інженерно-технологічні рішення.

Особлива увага приділяється інтеграції теоретичних знань та практичних навичок через використання дуальної освіти, лабораторних робіт, виробничих практик і стажувань. Практичні заняття на підприємствах дозволяють студентам безпосередньо застосовувати набуті знання, оцінювати вплив технологічних рішень на ресурс і довговічність деталей, працювати з сучасними засобами контролю якості та оптимізації процесу. Таким чином, поєднання теорії та практики забезпечує формування високого рівня професійних компетентностей, необхідних для роботи в умовах сучасного машинобудівного виробництва.

Інноваційні підходи до професійної підготовки також включають навчання методам оптимізації виробничих процесів, що дозволяє зменшити витрати матеріалів, підвищити продуктивність і знизити кількість браку. Студенти отримують можливість вивчати різні способи зміцнення поверхневого шару поліамідних деталей, оцінювати їх вплив на зносостійкість і довговічність, експериментально перевіряти результати та порівнювати їх із

теоретичними розрахунками. Це сприяє розвитку навичок аналітичної роботи, критичного мислення та системного підходу до вирішення виробничих задач.

Не менш важливим аспектом є підготовка фахівців до роботи у команді та взаємодії з іншими підрозділами підприємства. В умовах сучасного виробництва інженери та технологи повинні вміти планувати та координувати технологічні операції, обмінюватися даними між відділами проєктування, виробництва та контролю якості, а також пропонувати удосконалення технологічних процесів. Формування таких навичок у навчальному процесі забезпечує більш швидке впровадження нових технологій та підвищує загальну ефективність виробництва.

Удосконалення методів професійної підготовки безпосередньо впливає на конкурентоспроможність машинобудівних підприємств. Підготовка висококваліфікованих фахівців, здатних впроваджувати інноваційні технології зміцнення поліамідних деталей, дозволяє підприємствам підвищувати ресурс виробів, скорочувати витрати на ремонт та обслуговування, збільшувати продуктивність і зменшувати кількість браку. Це створює переваги на ринку, дозволяє оперативно реагувати на нові вимоги споживачів та підтримувати високий рівень якості продукції.

Таким чином, удосконалення методів професійної підготовки є важливим фактором розвитку машинобудівної галузі, оскільки воно дозволяє інтегрувати сучасні технології у навчальні програми, формувати у студентів навички аналітичної та проєктної діяльності, забезпечувати практичну готовність до виконання складних технологічних завдань і підвищувати конкурентоспроможність підприємств за рахунок підготовки висококваліфікованих фахівців. Системний підхід до освіти та тісна взаємодія з виробництвом забезпечують ефективне освоєння новітніх технологій, підвищення якості та надійності деталей і, як наслідок, стійкий розвиток машинобудівних підприємств у сучасних умовах.

Висновки до розділу 1

Висновки, що випливають із аналізу актуальності професійної підготовки фахівців машинобудівних підприємств, підтверджують необхідність комплексного підходу до формування компетентностей інженерів і технологів у сфері підвищення зносостійкості поліамідних деталей. Сучасне виробництво висуває високі вимоги до кваліфікації персоналу, оскільки робота з поліамідними матеріалами в умовах значних механічних, термічних та хімічних навантажень потребує знань фізико-механічних властивостей матеріалів, технологій зміцнення поверхневих шарів і контролю якості готових виробів.

Професійна підготовка повинна забезпечувати формування у фахівців навичок аналітичної, проєктної та технологічної діяльності, що дозволяє планувати та оптимізувати процеси зміцнення деталей, підбирати оптимальні технологічні режими та методи маслонаповнення поверхневого шару для досягнення високої зносостійкості. У результаті такі компетентності сприяють підвищенню довговічності виробів, скороченню браку та зменшенню експлуатаційних витрат на обслуговування.

Впровадження сучасних методів навчання, включаючи цифрове моделювання, лабораторні роботи та виробничі практики, дозволяє студентам закріплювати теоретичні знання на практиці, оцінювати ефективність технологічних рішень та формувати професійну відповідальність за якість продукції. Дуальна освіта та стажування на виробництві створюють умови для набуття реальних навичок роботи з поліамідними деталями у складних умовах експлуатації, що суттєво підвищує рівень підготовки молодих спеціалістів.

Таким чином, актуальність професійної підготовки фахівців у сфері підвищення зносостійкості поліамідних деталей обумовлена потребою машинобудівних підприємств у висококваліфікованих кадрах, здатних впроваджувати інноваційні технології зміцнення поверхневого шару. Комплексна підготовка забезпечує інтеграцію теоретичних знань і практичних

навичок, сприяє розвитку аналітичного та проєктного мислення і гарантує підвищення надійності, ресурсу та конкурентоспроможності виробів, що експлуатуються у важких умовах.

2 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІАМІДНИХ ДЕТАЛЕЙ.

2.1 Полімерні деталі та умови їх експлуатації

На сьогоднішній день в машинобудуванні, а зокрема, на залізничному транспорті, використовується велика кількість деталей, виготовлених з полімерних матеріалів, експлуатаційні властивості яких використовуються по максимуму [66], такі як антифрикційність, низький знос, гасіння ударних і знакозмінних навантажень, корозійна стійкість, висока ударна в'язкість і жорсткість, помітні, і доводиться застосовувати окремі рішення для їх модифікації під певні завдання з метою збільшення термінів експлуатації та міжремонтних періодів.

Для цього дослідження з метою вивчення деталей, що працюють у різних умовах експлуатації, проведено аналіз виробів залізничного транспорту, у процесі яких під час терміну служби супроводжуються посиленим зношуванням, утворенням тріщин і зламів у відкритих вузлах тертя під час роботи у запилених середовищах.

На малюнку 1.1 представлені деталі візка вагона, що експлуатується на залізниці. Візок 18–578 складається з надресорної балки з центральним розташуванням ресорних комплектів у бічних рамах [22, 98, 99]. Ресорний комплект включає кручені циліндричні пружини, фрикційні клини, гасник коливань.

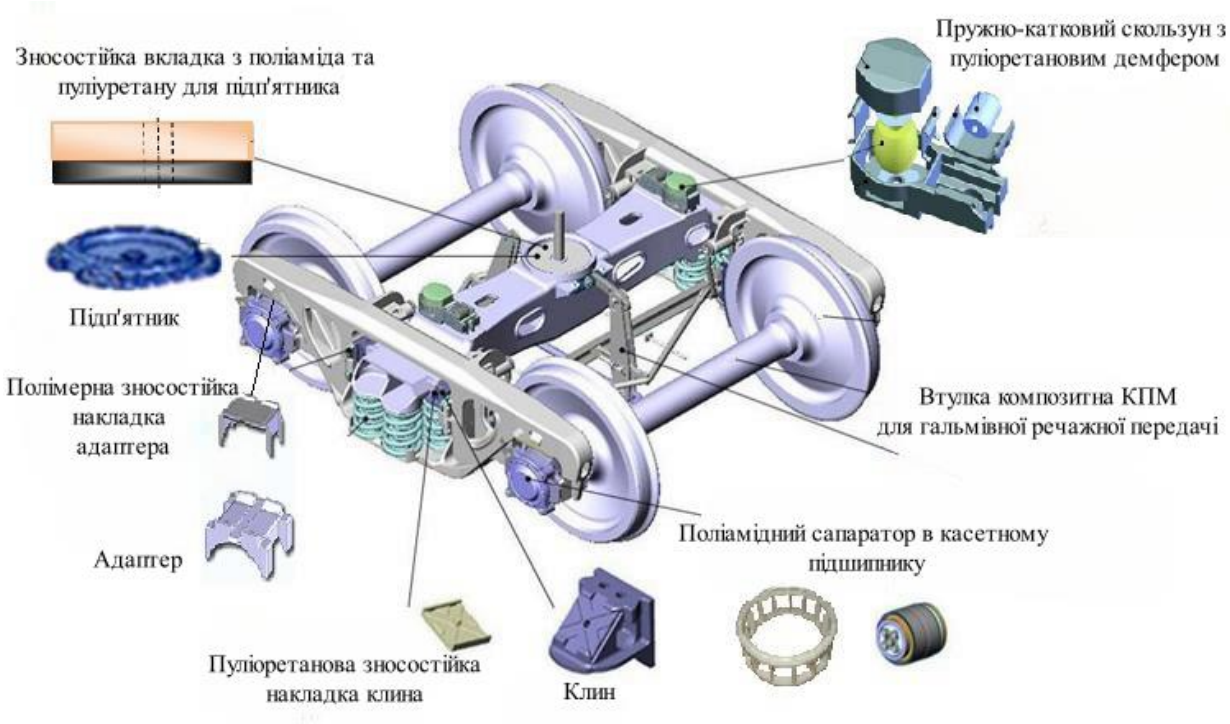


Рисунок 2.1 – Полімерні та композитні деталі візка вагона 18–578 залізничного транспорту

У моторних вагонах електропоїздів, а також у деяких візках пасажирських вагонів замість надресорної балки з упругокатковим ковзуном використовується центральне підвішування зі ковзуном та прокладкою (вкладишем) з композитного матеріалу ОПМ-94 (рисунок 1.2).

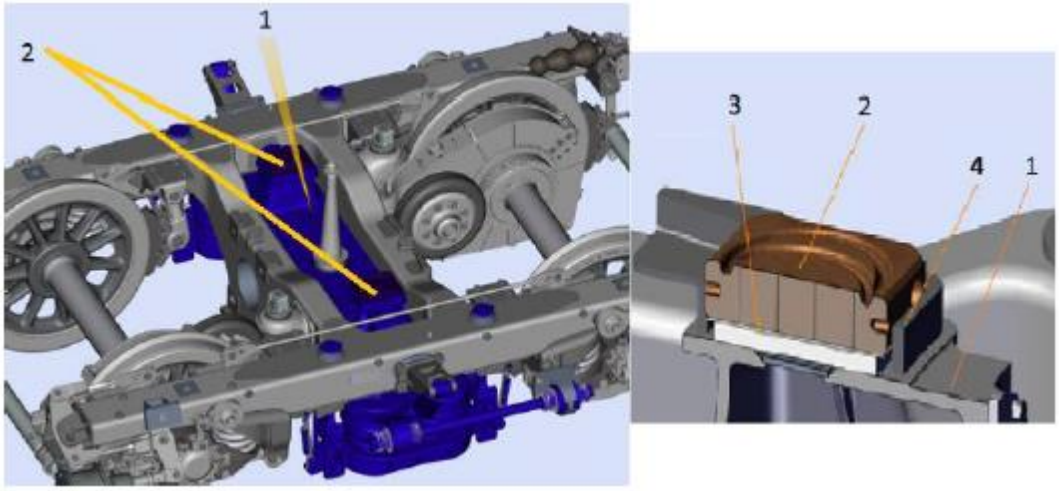


Рисунок 2.2 – Візок моторних вагонів електропоїздів, де: 1 – центральне підвішування; 2 – ковзуни; 3 – вкладка (прокладка); 4 – коробка

Технічні вимоги до вкладки ковзана (рисунок 1.3):

- робоча поверхня вкладиша має бути гладкою, з технологічними пазами; блискуча; без розтріскування матеріалу; без задир.
- фізико-механічні властивості матеріалу вкладиша повинні бути: щільність при 20ºС 1,32г/см³, руйнівна напруга при стисканні не менше 150 Мпа, твердість за Роквеллом не менше 60, ударна в'язкість по Шарпі при температурі мінус 40 ºС не менше 30 кДж.
- водопоглинання за 24 години трохи більше 10%.
- гарантійний термін служби вкладиша має бути не менше ніж 1 млн. км.

Рисунок 2.3 – Вкладиш (прокладка) опорного ковзуна

Статистика за час експлуатації показала, що для даної прокладки (вкладиша ковзуна) характерні виникнення тріщин через низькі температури експлуатації від –40 ºС до –50 ºС.

2.2 Проблеми механічної обробки поліамідних деталей

Поряд з гідністю поліамідних матеріалів необхідно відзначити, що їх механічні властивості, що визначають високі експлуатаційні параметри, створюють, у свою чергу, комплекс проблем, пов'язаних з механічною обробкою, якої здебільшого піддаються поліамідні деталі при їх виготовленні та ремонті [69].

Так як поліамід має низьку температуру плавлення та погану теплопровідність, то тепловиділення в зоні різання в процесі обробки деталей на металорізальних верстатах необхідно зводити до мінімуму. При обробці деталей з термопластів максимальна температура процесу має перевищувати 60 ... 120 °З. Надмірне тепло може призвести до заплавлення кромок різального

інструменту, значного зниження точності обробки виробу. Використання охолодження деталей із застосуванням емульсії або води не є можливим при обробці об'ємно-модифікованих маслом поліамідів у зв'язку з його вимиванням. По можливості слід застосовувати механічні подачі, щоб уникнути прихоплення та руйнування пластмас при нерівномірній ручній подачі.

Дослідження показує, що об'ємна модифікація олією поліамідів знижує їхню міцність на розрив до 27% (рисунок 1.4) з одночасним збільшенням ударної в'язкості до 40% (рисунок 1.5). Такі показники при механічній обробці призводять до зниження жорсткості оброблюваної деталі та утворення зливної стружки, що вимагатиме організації процесу стружколоманія, що виключає можливість її намотування на заготівлю або інструмент, що призводить до зниження якості обробленої поверхні (рисунок 1.6).

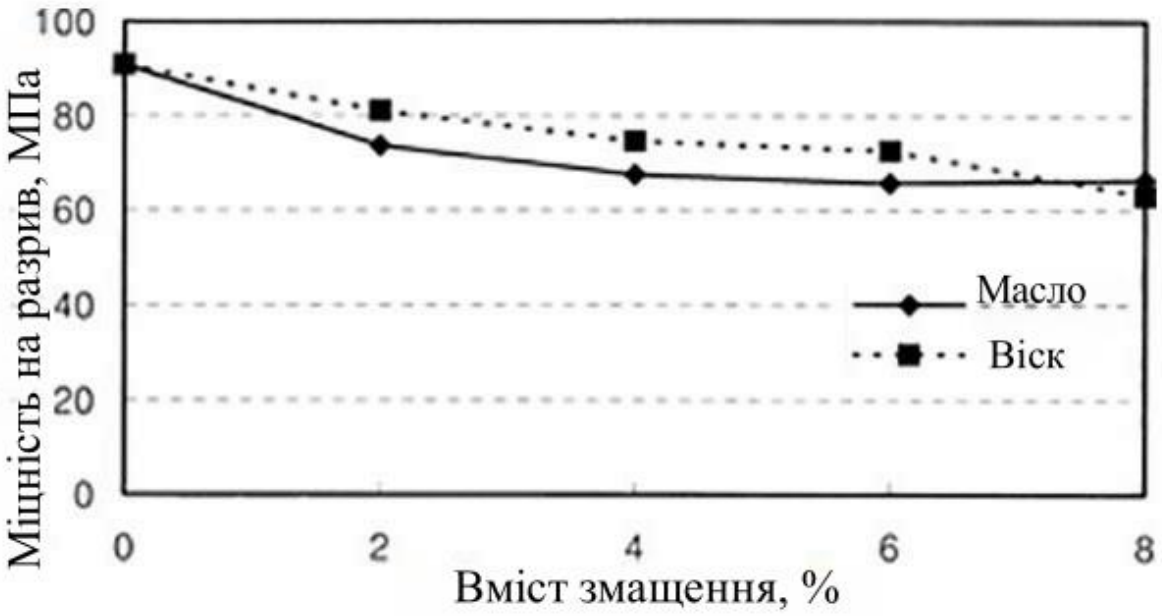


Рисунок 2.4 – Залежність міцності на розрив об'ємно модифікованого поліаміду марки ПА6 від вмісту мастила

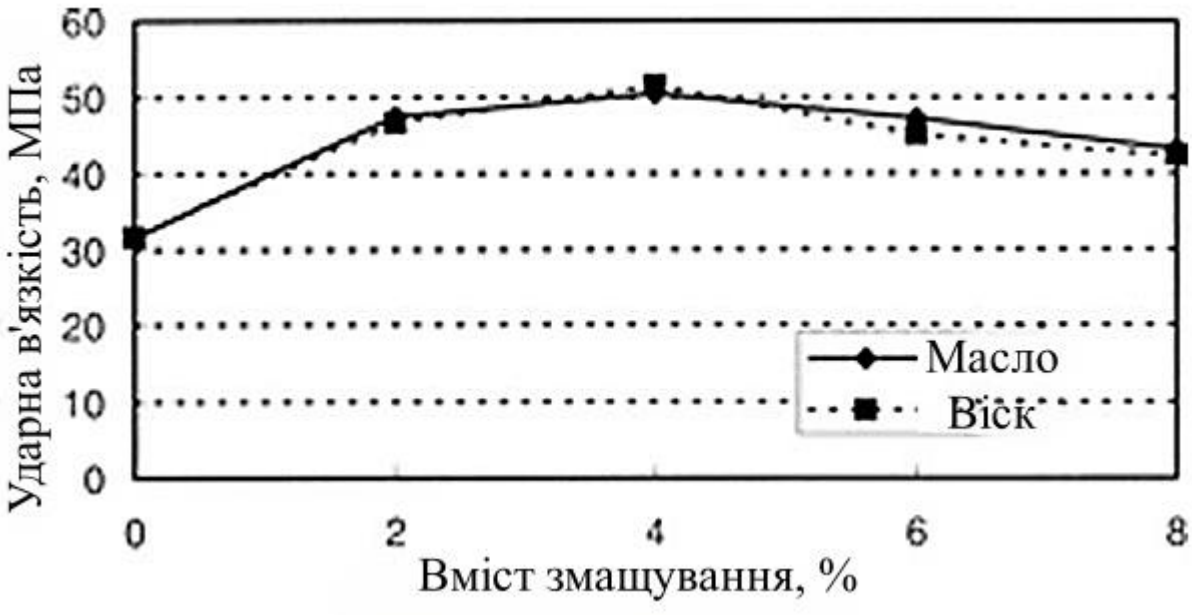


Рисунок 2.5 – Залежність ударної в'язкості об'ємно-модифікованого поліаміду марки ПА6 від вмісту мастила

Рисунок 2.6 – Токарна обробка поліамідної втулки

2.3. Огляд технологічних процесів підвищення експлуатаційних характеристик полімерних деталей

Один з найбільш популярних і часто використовуваних є спосіб удосконалення остаточної механічної обробки полімерів і композитів, що підвищує чистоту поверхневого шару за рахунок зниження шорсткості поверхні. Це досягається вдосконаленням чи створенням нових методів лезової обробки, розробкою ріжучого інструменту з удосконаленням геометрії робочої частини, створенням нових пристроїв [45, 46]. Проте авторами [134]

розроблено новий метод. Технологічний процес обробки різанням у випадках, коли полімерні або композиційні деталі мають властивості, що створюють велику складність обробки, що призводять до неякісного поверхневого шару: низька жорсткість, тонкі стінки, мають сітчасту і пористу структуру. Для вирішення цієї проблеми автори розробили методику збільшення жорсткості конструкції деталі за рахунок наповнення її рідкими матеріалами, які після затвердіння в її тілі, надають значного збільшення жорсткості деталі. Рідким технологічним наповнювачем є: парафін, сплав Вуда, деякі види пластмас, вода з її охолодженням до льоду та ін.

Найбільш ефективним способом обробки є заморожування, що складається з технологічних операцій: полімерна деталь просочується у вакуумній камері водою; заморожування у кріостаті; заповнення рідким азотом; механічне оброблення; промивання теплою водою; сушіння у вакуумній печі.

Розроблений технологічний процес збільшення жорсткості конструкції деталі дозволяє значно підвищити точність обробки та якість поверхневого шару.

Існує також технологічний процес, заснований на створенні деталей із фторопласту з різною пористістю. Технології отримання дисперсного композитного складу шляхом сухого змішування ПТФЕ з адсорбентом у вигляді цеоліту, що володіє високою адсорбцією, у високошвидкісному лопатевому змішувачі протягом 2...4 хв з подальшим сушінням у вакуумній шафі протягом 2 годин при температурі 393...413 К. Зразки прессформи. Рідкофазне наповнення здійснюється шляхом просочення відпресованої полімерної втулки в моторному маслі протягом 24 годин після того, як проводилося запікання отриманого зразка.

Також існує один дуже цікавий технологічний процес, пов'язаний із властивістю полімерів вбирати в себе рідкі речовини, а саме наповнення пористої гуми фарбою для виконання печаток на паперових документах. Технологічний процес флеш-технології виготовлення друкованих форм та

штампів є технологією наповнення полімерних матеріалів – спеціальної гуми. Флештехнологія набула поширення в галузі документообігу: штампи на документах – приклад флештехнології. Суть технології полягає в тому, що береться термочутлива гума пориста, що використовується в штампах і друкованих формах. Накладається трафарет із світлочутливої плівки, який залишає відкритими ті ділянки, які є зображенням або будь-якими словами. Після цього поміщають у спеціальний пристрій, де під дією ультрафіолету ця плівка розплавляється при температурі 70…75 ºС і закупорює ті ділянки пористої гуми, які не є частиною зображення. Відкриті пори, що залишилися, використовуються для заповнення їх фарбою.

3. РОЗРОБКА МАРШРУТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МАСЛОНАПОЛНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛІВ З ПОЛІАМІДУ ЯК ФІНІШНОЇ ОПЕРАЦІЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ.

Для втулки, одержуваної методом механічної обробки (рисунок 2.1), висуваються такі вимоги: чистота поверхні, утвореної d3 – Ra 25. Інші поверхні – Ra 6,3. Полу допуску, що виходить після запресування в обойму для d1 - C11. Поле допусків для отвору у підшипнику після розточування – H7, валу – h6.

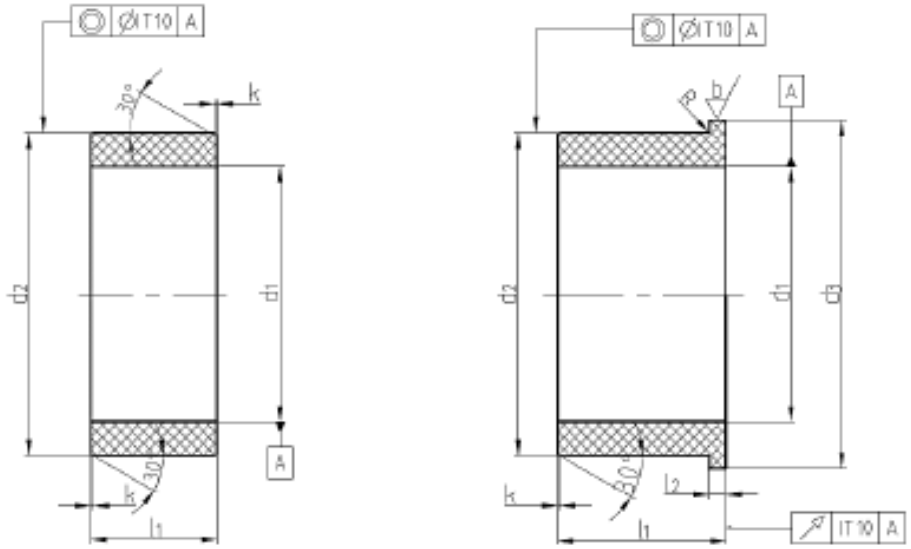


Рисунок 3.1 – Поліамідна втулка, що виготовляється за DIN 1850-6

Втулки працюють у важких умовах, в процесі експлуатації відчувають високий контактний тиск, динамічні та вібраційні навантаження, абразивне забруднення, недолік мастила, що призводить до збільшення їхнього зносу, порушення кінематичної точності сполучення.

Для проектування технологічного процесу необхідно визначити температурні граничні умови експерименту, виходячи з вирішення підвищення ефективності просочення поліамідного зразка шляхом зниження в'язкості моторної олії М8-гексаном [34]. Так як моторні масла можуть розбавлятися рідкими органічними матеріалами з класу алканів [73, 106], пропорції, яка дозволить досягти в'язкості масляного наповнювача близької до в'язкості води. Виходячи з цих пропорцій, необхідно визначити граничні

граничні умови – температуру кипіння суміші та рекомендовані граничні умови – температуру випаровування гексану з неї.

Для вирішення задачі визначення граничних граничних умов необхідно виконати розрахунок температури кипіння суміші гексану та олії для кожної встановленої пропорції, для цього потрібно застосувати другий закон Рауля, оскільки розчин є ідеальним, тобто між ними не відбувається хімічної реакції при змішуванні. Так як гексан є граничною речовиною, тобто вільні зв'язки для вступу в хімічну реакцію з речовиною, що розчиняється відсутні. Відбувається процес розведення.

За законом Рауля [111] при змішуванні двох матеріалів, в якому один - розчинник, інший - речовина, що розчиняється, відбувається процес розведення. Виходячи із цього закону, температура кипіння суміші підвищується щодо температури кипіння гексану.

З вище представленого формулювання слід: розчин закипає при вищій температурі, ніж розчинник окремо, в розчині олії та гексану молекули розчинника мають меншу концентрацію, ніж у чистому гексані.

В даному випадку гексан (C6H14) [133] є розчинником, а моторне масло розчиняється речовиною.

Щоб знайти температуру кипіння розчину, необхідно скористатися формулою

$$T_{\text{кип.}} = T_{\text{кип.а}} + \Delta T_{\text{кип}},$$

де: Ткип.а – температура кипіння розчинника, 68 ºС; ΔТкіп. - Підвищення температури кипіння розчину.

Другий закон Рауля для знаходження підвищення температури кипіння виражається формулою

$$\Delta T_{\text{кип.}} = K_{\text{э}} \cdot C_{\text{m}},$$

де: Ке – ебуліоскопічний коефіцієнт; Cm – молярна концентрація розчину.

Звідси випливає

$$\Delta T_{\text{кип.}} = K_{\text{э}} \cdot \frac{m_{\text{b}} \cdot 1000}{m_{\text{a}} \cdot \mu_{\text{b}}},$$

де: Ке – ебуліоскопічний коефіцієнт; mb – маса розчинної речовини, кг;

ma – маса розчинника, кг; μb – молярна маса розчинної речовини, г/моль.

Для обчислення підвищення температури необхідно знати ебуліоскопічний коефіцієнт Ке. Він розраховується за формулою

$$K_{\text{э}} = \frac{R \cdot T_{\text{a}}^{2} \cdot \mu_{\text{a}}}{\Delta H_{va}},$$

де: R – універсальна газова стала, 8,31 Дж·К–1·моль–1; Та – температура кипіння розчинника, 68 С; μa – молярна маса розчинника, г/моль;

ΔHva – молярна ентальпія пароутворення розчинника, 3000 Дж/моль.

$$K_{\text{э}} = \frac{8,31 \cdot 68^{2} \cdot 86,17}{3000} = 2,7.$$

Також необхідно знати молярну масу розчинної речовини, яка обчислюється за формулою

$$\mu_{\text{b}} = \rho_{b} \cdot V_{\text{m}},$$

де: ρ – густина речовини, 0,886 кг/л; Vm – молярний об'єм газів, 22,4 л/моль.

Також для знаходження температури кипіння розчину необхідно знайти масу речовин: моторної олії та гексану. Розрахунок для моторної олії проведено за формулою

$$m_{\text{b}} = \rho_{\text{b}} \cdot V_{\text{b}},$$

де: ρ – густина речовини, 8,86 кг/м3; Vb - обсяг речовини, л.

Для розрахунку маси гексану використовується формула

$$m_{\text{a}} = M_{\text{a}} \cdot n,$$

де: Ма – молярна маса речовини: гексан 86,17 г/моль, олії 19,84 86,17 г/моль; n – кількість речовини, моль.

Для знаходження кількості речовини використовується формула

$$n = \frac{V_b}{V_m}.$$

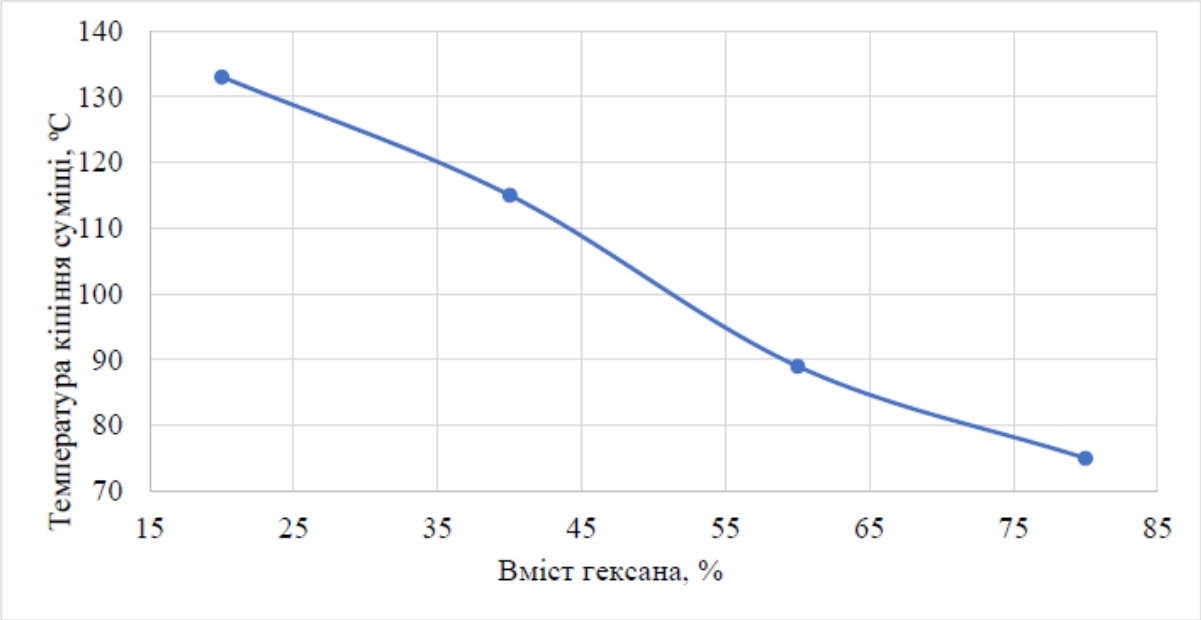


Рисунок 3.2 – Залежність зміни температури кипіння від концентрації суміші

З отриманих результатів видно значне збільшення температури кипіння суміші гексану та олії порівняно з температурою кипіння чистого гексану (68 ºС) [5]. Дані значення температур є граничними граничними умовами кожної суміші і їх не можна перевищувати. На даному етапі визначені межі температури кипіння пропорцій суміші гексану та олії, але існує ймовірність зниження ефективності зниження в'язкості наповнювача, так як не можна в межах температури кипіння виробляти наповнення у зв'язку з можливим випаром гексану з олії, тому необхідно визначити за яких температур при різних пропорціях починає відбуватися його випаровування.

3.1. Маршрутна технологія маслонаповнення поліамідної деталі

Для виконання технологічного забезпечення необхідний спосіб проведення заповнення поліамідних деталей. Відповідно до вже проведеного дослідження умов і режимів технологічного процесу розроблено даний спосіб, який включає сукупність правил, яких необхідно дотримуватися:

- ✓ забезпечити початкові умови НУ щодо проведення технологічного процесу;

- ✓ виконати процес сушіння поліамідної деталі ПД;
- ✓ підготувати масляний наповнювач із необхідною в'язкістю;
- ✓ забезпечити задану температуру поліамідної деталі у допустимих межах відповідно до граничних умов ГУ;
- ✓ зробити заповнення на задану глибину ПД.

На основі проведеного дослідження та розробленого способу складено послідовність проведення технологічного процесу маслонаповнення, що складається з операцій (рисунок 2.3) [49], що виконують встановлені правила:

підготовка ПД, що полягає в очищенні від бруду та від відпрацьованого мастила;

приготування технологічної рідини зі зниженою в'язкістю (ТЖПВ), забезпечення необхідного відсоткового вмісту гексану в олії;

кондиціювання ПД у змінному електричному полі високої частоти на ВЧ-установці, досягнення сухого стану визначається за рахунок контролю за анодним струмом. При виконанні даної операції виконується паралельно високочастотна сушіння і контроль передпробойного стану у відповідність з науково-обґрунтованими технологічними, процесами описаними роботами [24, 57, 88]. ВЧ-сушіння полягає в процесі нагріву, підняття анодного струму до максимуму, що означає, що в даний момент ПД відчуває найкращу можливість приймати ВЧ-енергію і грітися дуже ефективно (досягнення Тсуш = 0,9ƒТплав.). Після закінчення прогріву електрофізичні властивості деталі падають (знижується тангенс діелектричних втрат, падає до мінімуму), що вказує на завершення етапу сушіння, при цьому після акліматизації контролюються часткові розряди (ЧР), щоб уникнути пропал, якщо ЧР виникають у великій кількості, починається підтримка заданої потужності.

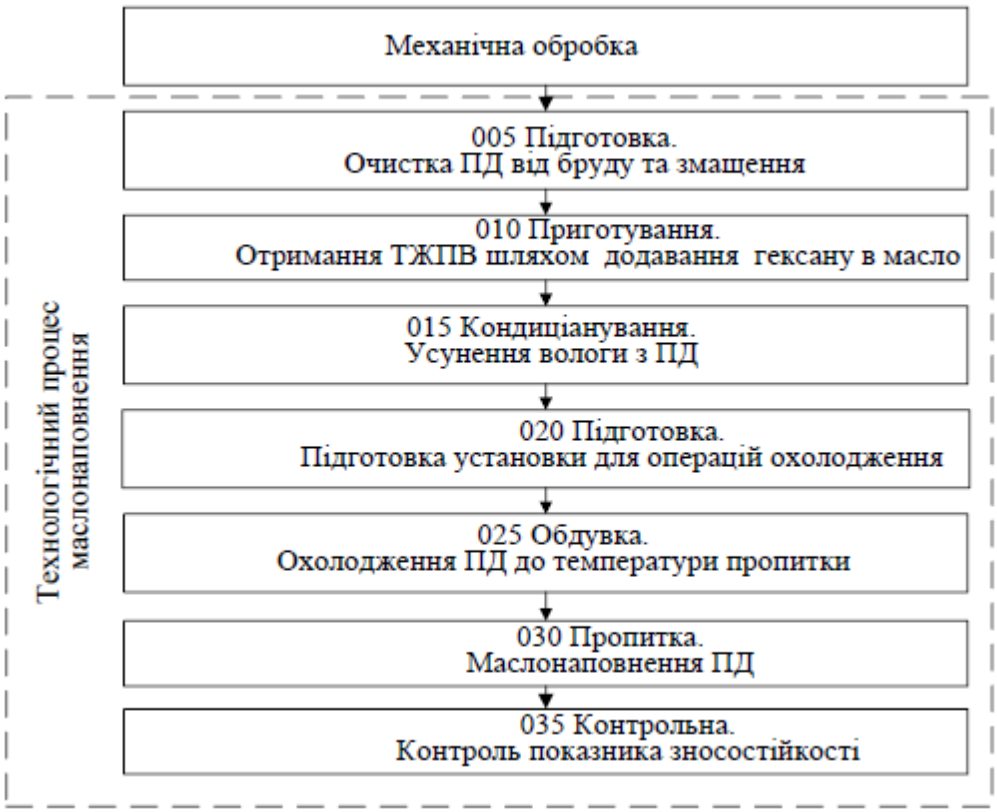


Рисунок 3.3 – Маршрутна технологія маслонаповнення поліамідних деталей

Маслонаповнення конструктивно-складних і простих деталей виконується шляхом занурення виробу наповнювач із забезпеченням просочення на задану глибину поверхневого шару за рахунок обмеження часу процесу наповнення.

За представленою маршрутною технологією можливе маслонаповнення конструктивно-складних (приклад: сепаратор буксового вузла візка 18-578) і простих поліамідних виробів), так як високочастотне нагрівання складних деталей можливе завдяки проведеному дослідженню в нашій школі високочастотної електротермії. Обробка конструктивно-складних поліамідних деталей можлива завдяки розробленому способу конструювання електродів з розбиттям виробу на ділянки, що є елементарними конденсаторами, а також введення розрахункового зазору конструкції електродів, що забезпечує рівномірність енерговпливу на елементи полімерного або композиційного виробу [56].

Для аналітичного визначення технологічних умов та режимів маслонаповнення для забезпечення просочення на задану глибину необхідно розробити математичну модель технологічного процесу просочення, для цього необхідно розібратися у фізичних процесах, що відбуваються при просоченні поліамідного виробу масляним наповнювачем.

3.2 Математична модель просочення поліамідних матеріалів

Для забезпечення підвищення продуктивності технологічного процесу маслонаповнення необхідно досягнення максимальної швидкості просочення поліамідної деталі сумішшю гексану та олії. Як було виявлено раніше, значний вплив на швидкість просочення надаватиме в'язкість наповнювача і температура поліамідної деталі, виходячи з цього, необхідно забезпечення можливості аналітичного способу розрахунку режимів технологічного процесу просочення, для цього необхідно математично представити цю залежність.

Просочення поліамідних матеріалів засноване на досить складних процесах, що протікають у полімері. Залежно від матеріалу наповнення як превалюючі можуть виступати різні види проникнення, що підпорядковуються різним законам. Найчастіше як наповнювачі розглядаються рідкі матеріали, у тому числі вода (гігроскопічність полімеру до 10%) і різні види вуглеводнів, що виступають як розчинниками, так і матеріалами, що змінюють фізико-механічні властивості поліамідних виробів.

Для вирішення задачі математичного моделювання процесу маслонаповнення необхідно визначитися з фізикою процесів, що відбуваються. Розглянуті поліамідні матеріали відносяться до гідрофільних [47, 85, 87, 114] і вбирають до 10% рідини. З іншого боку, технічні умови ТУ2224–036–00203803–2012 на поліаміди передбачають наявність пір у даному матеріалі розмірами від 0,8 мм до 1,5 мм. Об'єм аморфних фаз для поліаміду може становити від 30% до 60%. Проблеми, які з абсорбцією поліамідів, широко відомі. Зважаючи на дослідження зразків розмірами 4x50x50 мм, великої площі та малою глибиною проникнення рідини (зміна

поверхневого шару), процес маслонаповнення можна розглядати у вигляді однонаправленого капілярного явища (рисунок 2.4).

У роботах ряду авторів широко представлені математичні моделі, що описують капілярні явища з використанням закону фільтрації в пористих середовищах, що описуються системою рівнянь нерозривності та закону Дарсі.

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \\ u_x = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}, \quad u_y = u_z = 0 \end{cases}$$

де: ux, uy, uz – швидкість перебігу рідини у напрямках x, y, z відповідно;

k – коефіцієнт фільтрації, що залежить від властивостей рідини (насамперед динамічної в'язкості, μ) та пористого скелета; p – тиск.

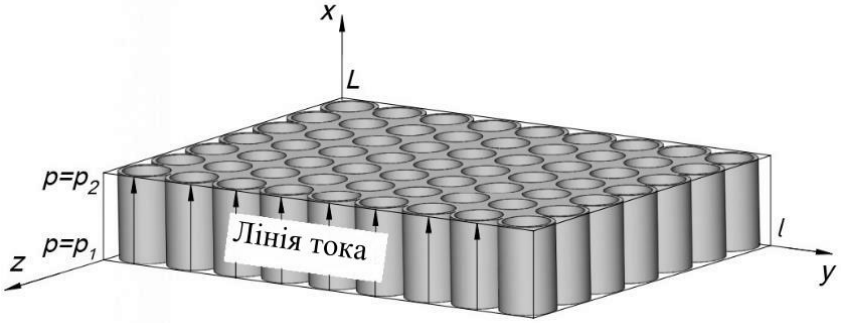


Рисунок 3.4 – Модель технологічної системи просочення

Бічні межі області через незначну висоту зразка можна вважати непроникними. На вході області встановлено постійний тиск x=0, p=p1, на виході x=L – заданий постійний тиск p=p2<p1. Масові сили відсутні. Зміни різниці тиску підпорядковується лінійному закону.

Межовими умовами є: x=0: p=p1; x=L: p=p2.

При аналізі системи рівнянь було виявлено, що з плоскопараллельном фільтраційному перебігу тиск змінюється за лінійним законом.

$$p(x) = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{L}x$$

Також, розглянувши цю модель заповнення, необхідно відзначити неможливість визначення різниці тиску на межах просоченого ТЖПВ шару, і,

отже, стоїть завдання коригування системи рівняння нерозривності та закону Дарсі для використання у виробничих умовах.

Було висунуто гіпотезу про можливість коригування існуючої математичної моделі, заснованої на принципі подібності. При цьому коригуванні складно контрольований параметр різниці тиску замінюється показником різниці температур при охолодженні зразка.

Результат коригування системи рівняння нерозривності та закону Дарсі має такий вигляд. Ця система рівнянь визначає поведінку умовного повністю просоченого ТЖПВ поліамідного зразка з товщиною, що дорівнює глибині просочення.

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u_{Tx,усл.}}{\partial x} = 0 \\ u_{Tx,усл.} = -\dfrac{k_{Tx,усл.}}{\mu}\,\dfrac{\partial T_{усл.}(x)}{\partial x}, \end{cases}$$

де kTx, ум. - Коефіцієнт проникності пористого середовища, що залежить від перепаду температури, м2·Па / ºС.

Межовими умовами є:

при x=0: Тусл.(x)=T1=const;

при x = hусл: Тусл. (x) = T2 = const;

T2> T1;

умова збереження потоку маси на межі пористого середовища та рідини:

ρuTx, ум.=0.

Математична модель має такі припущення, подані далі. Бічні межі області через незначну висоту зразка можна вважати непроникними. Масові сили відсутні. Зміна температури за координатою x підпорядковується лінійному закону.

Критерієм подібності є однакове число Рейнольдса, і умова подібності – однакова швидкість просочення.

$$\mathrm{Re} = \frac{d \cdot u_{Tx,усл.}}{\nu}$$

$$-\frac{k_{px,усл.}}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{h_{усл.}} = -\frac{k_{Tx,усл.}}{\mu} \cdot \frac{\Delta T}{h_{усл.}}$$

$$k_{px,усл.} \cdot \Delta p = k_{Tx,усл.} \cdot \Delta T$$

де: kpx,усл - коефіцієнт проникності при використанні в математичній моделі різниці тиску; kTx,усл - коефіцієнт проникності при використанні в математичній моделі різниці температури; hусл. - Товщина умовного поліамідного зразка.

Рівняння побудовані з припущення лінійності закону зміни температури.

$$T(x) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L} x.$$

Аналіз системи рівнянь (3.3) показує, що для можливості її практичного застосування необхідно на основі натурного експерименту визначити такі невідомі параметри: швидкість просочення, зміна температури за координатою x, які дозволять обчислити коефіцієнт проникності за наступною залежністю:

$$k_{Tx,усл.} = \frac{u_{Tx,усл.} \cdot h_{усл.} \cdot \mu}{\Delta T_{усл.}},$$

де: μ - динамічна в'язкість ТЖПВ, Па·с; ΔТусл. - Різниця температур умовного поліамідного зразка, Т2 - Т1, ºС; hусл. - Товщина умовного поліамідного зразка, м; uT x, ум. - Швидкість просочення умовного поліамідного зразка, м / с.

Для подальшого дослідження з метою проведення експериментального доказу висунутої гіпотези необхідно розробити спосіб, який дозволить

експериментально визначити швидкість просочення поліамідних деталей рідиною зі зниженою в'язкістю.

3.3. Звичайно-різницевий розрахунок впливу розміщення датчиків температури на точність температурно-динамічного способу контролю швидкості просочення

Далі для додаткового обґрунтування висунутої гіпотези було прийнято рішення провести дослідження щодо впливу конвекції та зміни обсягу поліамідного зразка, а також визначення допустимого діаметра отвору та його напрямки розташування в тілі полімеру для встановлення термодатчика. Основна умова полягає в тому, що дані результати відхилення даних при установці в зразок термодатчиків не повинні перевищувати від прийнятих 3%.

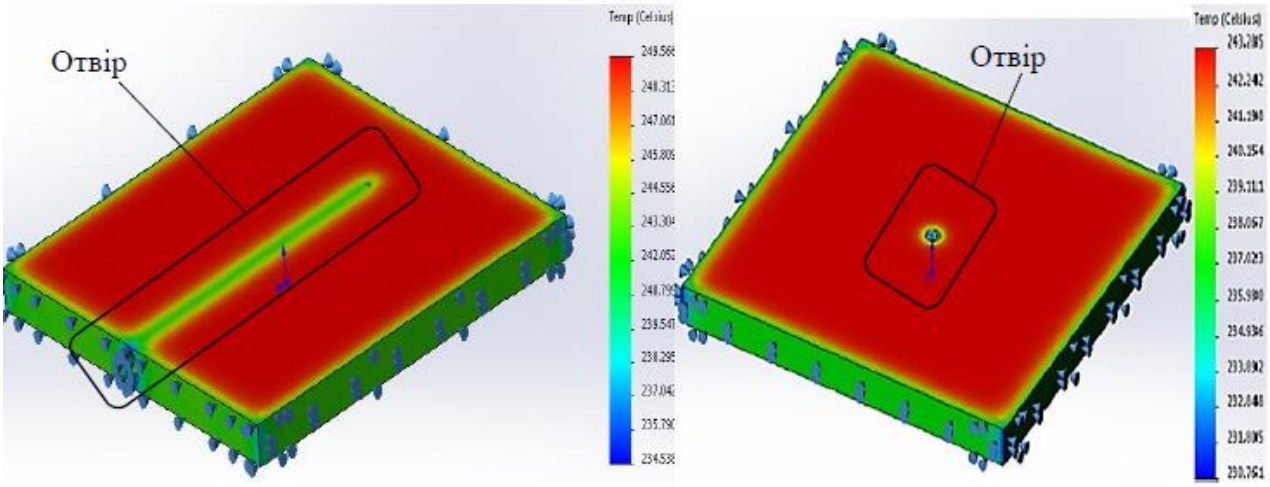
За проведеним раніше аналітичним розрахунком виникла необхідність провести дослідження щодо впливу конвекції та зміни обсягу тіла на температуру при нагріванні від внутрішніх джерел тепла при високочастотній обробці поліамідного зразка.

Для проведення цього дослідження виконані наступні дії: змоделювати процес високочастотного розігріву в програмному комплексі SOLIDWORKS Simulate із застосуванням кінцево-різницевого розрахунку; змоделювати процес високочастотного розігріву в програмному комплексі MSC Sinda (графічний інтерфейс Patran) із застосуванням кінцево-різницевого розрахунку; зробити порівняльний аналіз отриманих даних.

Моделювання процесу високочастотного розігріву в програмному комплексі SOLIDWORKS Simulation із застосуванням кінцево-різницевого розрахунку. Для моделювання процесу високочастотного розігріву в програмному комплексі SOLIDWORKS Simulation побудовано кінцево-різницеву математичну модель розігріву об'єкта, що досліджується, від внутрішніх джерел тепла.

Сітка розбиття тіла: трикутник. Розмір: 1,077 мм; співвідношення: 1,5. Модель конечно-разностного розрахунку представлена малюнку 2.5. В якому відображені температури різних ділянок поліамідного зразка в залежності від

впливу на них конвекції при високочастотному нагріванні (від внутрішніх джерел тепла) у випадках виконання отвору вздовж і поперек зразка. Колірна температура ºС вказана праворуч.



Розташування вздовж Розташування впоперек

Рисунок 3.5 – Результат кінцево-різницевого розрахунку SOLIDWORKS Simulation

Підсумки конечно-разностного розрахунку у програмному комплексі SOLIDWORKS Simulation, наведені у таблиці 2.1

Таблиця 3.1 - Підсумки кінцево-різницевого розрахунку в програмному комплексі SOLIDWORKS Simulation

Діаметр отв., мм	Температура (отв. вздовж), °С	Температура (отв. поперек), °С
0	243,075	243,075
0,25	243,115	243,078
0,5	243,244	243,088
1,0	243,769	243,127
2,0	245,901	243,285
3,0	249,547	243,549

З отриманих результатів можна дійти невтішного висновку у тому, що вплив конвекції надає незначне вплив на температуру нагріву проти тим, як у неї впливає зміна обсягу, внаслідок збільшення діаметра отворів в досліджуваному об'єкті.

Ділянки зразка, на які впливає конвекція, відмічені стрілками та представлені на малюнку 2.5. У міру зменшення обсягу збільшується

температура нагріву від внутрішніх джерел. З даних можна визначити допустимі розміри отвору: поперек 0,95 мм, поперек 0,4 мм. Максимальний розмір діаметра отвору обмежується першою точкою, після якої графік залежності переходить із приблизної паралельності осі абсцис на різке збільшення температури.

Моделювання процесу високочастотного розігріву в програмному комплексі MSC Sinda із застосуванням кінцево-різницевого розрахунку. Для збіжності отриманих результатів було ухвалено рішення провести такі розрахунки в іншому програмному комплексі, а саме MSC Sinda.

Сітка розбиття об'ємного тіла: Elem shape, Tet; Mesher, TetMesh; Topology, Tet10. Модель кінцево-різницевого розрахунку представлена малюнку 2.6. В якому відображені температури різних ділянок поліамідного зразка в залежності від впливу на них конвекції при високочастотному нагріванні (від внутрішніх джерел тепла) у випадках виконання отвору вздовж і поперек зразка. Колірна температура вказана праворуч 102 ºС.

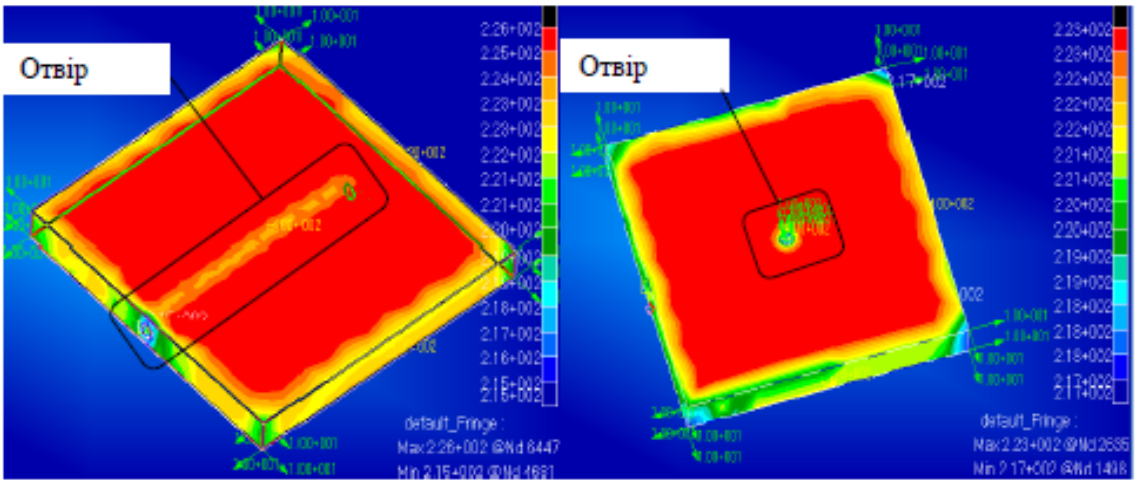


Рисунок 3.6 – Результат кінцево-різницевого розрахунку у програмному комплексі MSC Sinda

Підсумки дослідження у програмному комплексі MSC Sinda представлені у таблиці 3.2

Таблиця 3.2 - Підсумки кінцево-різницевого розрахунку в програмному комплексі MSC Patran 2014, Sinda

Діаметр отв., мм	Температура (отв. вздовж), °С	Температура (отв. поперек), °С
0	223,128	223,128
0,25	223,14	223,122
0,5	223,215	223,117
1	223,587	223,136
2	225,678	223,296
3	228,926	223,527

Підсумки конечно-разностного розрахунку програмному комплексі MSC Sinda схожі з результатами, отриманими у програмному комплексі SOLIDWORKS Simulation. Температура нагрівання зразка має таку ж закономірність зміни від зміни діаметра отвору.

Після закінчення розрахунків у програмному комплексі MSC Sinda було отримано такі діаметри отворів: упоперек – 0,93 мм, вздовж – 0,42 мм.

Аналіз збіжності результатів кінцево-різницевих розрахунків у двох програмних комплексах показав, що вплив конвекції на відкриті ділянки досліджуваного об'єкта (бічні стінки і самі отвори в тілі), площа яких збільшується в міру збільшення отвору. Найбільший вплив на температуру впливу поліамідного зразка надає зміна розміру отвору – чим більший отвір, тим більше нагрівання від внутрішніх джерел тепла.

Зрештою, були визначені максимально допустимі розміри діаметрів отворів у поліамідному зразку для встановлення термодатчика, а також була доведена збіжність розрахунків у двох різних програмних комплексах. Різниця між максимальними температурами становила 20 ºС. У цьому динаміка зміни самої температури ідентична даних розрахунків у програмних комплексах. Найприйнятнішим способом розташування отвору під термодатчик, у якому похибка вимірювань мінімальна, є поперек поліамідного зразка.

Так як у зв'язку зі складністю підбору термодатчика такого малого розміру виникає потреба у виборі більшого діаметра отвору для дослідження температури поліамідного зразка. Найбільш переважним для цього

дослідження є вимірювання температури поліамідного зразка термістором NTC 3950, а не датчика з металевої основи (термопари), так як це може викликати проблеми з високочастотним нагріванням, виникнення прогару зразка в точках розташування термодатчика з причини різких стрибків потужності В . Тому прийнято рішення для цього дослідження застосувати термодатчик моделі NTC 3950 на 10 кОм [11], необхідний діаметр отвору його встановлення становить 2,2 мм. Виходячи з цього, необхідно розрахувати похибку результату вимірювань, що виникли від прийнятого рішення, розрахованих у програмному комплексі SOLIDWORKS Simulation і MSC Sinda, у разі виконання отвору впоперек зразка.

$$\Delta_{\text{Поперек Patran}} = 100 - \frac{T_{\text{без ТП}} \cdot 100}{T_{\text{2,2мм ТП}}}$$

$$\Delta_{\text{Поперек Patran}} = 100 - \frac{223{,}13 \cdot 100}{223{,}44} = 0{,}139\ \%.$$

$$\Delta_{\text{Поперек SolidWorks}} = 100 - \frac{243{,}08 \cdot 100}{243{,}44} = 0{,}148\ \%.$$

де: Δ упоперек, Δ Уздовж – похибка вимірювань вздовж та впоперек поліамідного зразка відповідно, %; Тбез ТП – температура в тілі поліамідного зразка без отворів, ОС; Т2,2мм ТП – температура в тілі об'єкта, що досліджується, з діаметром отвору 2,2 мм.

З отриманих результатів видно, що найбільш доцільним і не перевищує похибка більше 3% є розташування термодатчиків поперек при діаметрі одного отвору 2,2 мм, похибка склала до 0,15%.

Різновидно-елементний математичний розрахунок. Побудова кінцево-елементної математичної моделі щодо розрахунку впливу кількості термопар на нагрівання зразка при високочастотній обробці виконувалося в програмному комплексі MSC Patran Sinda [53, 79]. На малюнку 2.7 відображено температуру різних ділянок поліамідного зразка залежно від впливу на них конвекції при високочастотному нагріванні (від внутрішніх джерел тепла). Колірна температура вказана праворуч 102 ºС.

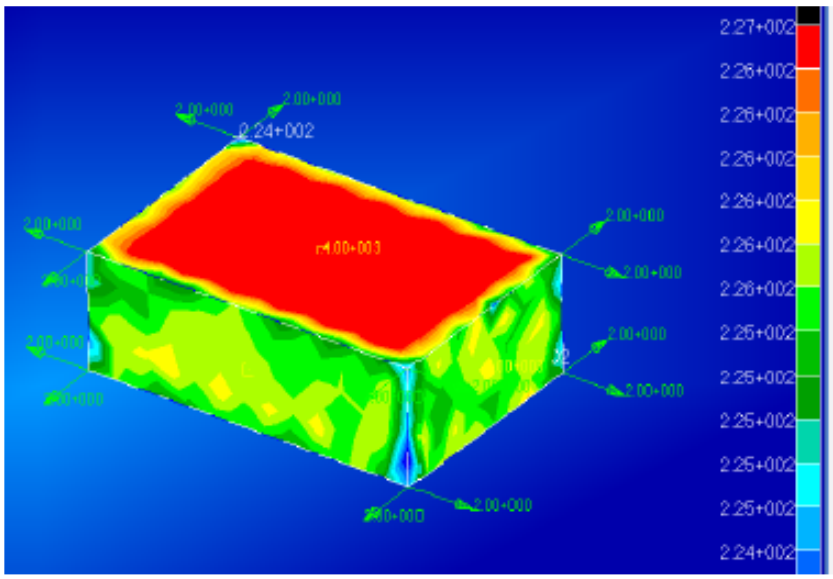


Рисунок 3.7 – Звичайно-елементна математична модель дослідного зразка

З отриманих графічних даних можна дійти невтішного висновку, що з високочастотному розігріві у міру зменшення маси внаслідок виконання отворів у тілі температура поліамідного зразка збільшується у всьому обсязі.

Розрахунок похибки, що виникла від установки термопар в поліамідний зразок.

$$\Delta_1 = 100 - \frac{T_{без\ ТП} \cdot 100}{T_{5\ ТП}} = 100 - \frac{220,746 \cdot 100}{221,500} = 0,34\ \%.$$

де: Тбез ТП – температура в тілі поліамідного зразка без отворів, ОС; Т5ТП – температура в тілі поліамідного зразка з 5 отворами, оС;

Результати побудови разностно–элементной математичної моделі показали, що розраховане значення похибки вбирається у допустимого значення 3%.

Загальний математичний розрахунок розробленого способу контролю. Побудова загальної математичної моделі щодо розрахунку впливу кількості термопар на нагрівання зразка при високочастотній обробці.

Процес об'ємного розігріву поліамідного зразка розмірами 50х50х4 мм від внутрішніх джерел тепла віднесемо до окремого випадку теплопровідності однорідної пластини.

Рівномірне об'ємне нагрівання qv const. Коефіцієнт конвективної тепловіддачі α const та температура навколишнього середовища Твоз const. Внаслідок однакового впливу конвекції на дві сторони пластини температура цих сторін однакова.

Зміна температури лише вздовж осі x (рисунок 2.8), спрямованої нормалі до поверхні тіла. Температури на осі симетрії зразка і його поверхні позначені Т0 і Тпов.

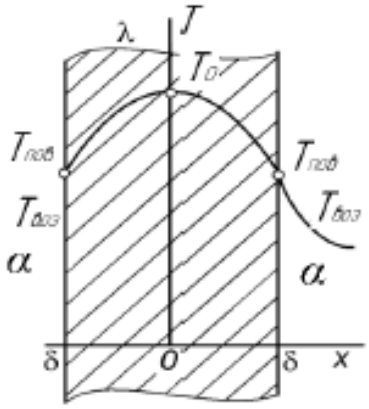


Рисунок 3.8 – Розрахункова схема теплопровідності однорідної пластини

При розрахунку похибки, що виникає від кількості отворів під термопари, виконаним за допомогою різницево-елементної моделі в програмному комплексі MSC Sinda (Δ1 дорівнює 0,34%), і загальної математичної моделі за розрахунковими формулами (Δ1 дорівнює 0,57%). За підсумком проведеного етапу дослідження похибка вимірювань від застосованого способу контролю температури становить до 0,57% згідно з отриманим максимальним значенням.

Після вибору розмірів досліджуваного поліамідного зразка та розробки розрахунково- та експериментально обґрунтованого способу контролю температури всього його об'єму, а також допустимого діаметра отворів під термодатчик необхідно перейти до розробки контрольної операції технологічного процесу маслонаповнення.

3.4. Експериментальне визначення невідомих параметрів математичної моделі.

Для знаходження невідомих параметрів математичної моделі було розроблено експериментальну автоматизовану установку. Причому нагріву передував процес сушіння, що забезпечило гарантоване дотримання умов однофазного заповнення пористого матеріалу.

Експеримент з маслонаповнення проводився з використанням поліаміду марки ПА-6 і моторного масла М8-В (з числа найбільш широко використовуване за параметрами в'язкості) в суміші з гексаном (ТЖПВ, гексану 20%, масла 80%), що відповідало умовам, що пред'являються до складу робочої рідини (РЖ).

РЖ застосовується для проведення випробувань поліамідних деталей як стандартне вуглеводневе середовище.

Важливою умовою експлуатації робочої рідини є широкий діапазон робочих температур до +90 ºС.

Для експериментів використовувалися зразки розмірами 4х50х50 мм розігріті до температури 50 °С.

Зразки поміщалися у ванну з ТЖПВ, температура якої становила 25±2 ºС. Визначення температури за глибиною поліамідного зразка визначалася термодатчиками ТД, розрахункова схема розташування яких представлена на малюнку 2.9.

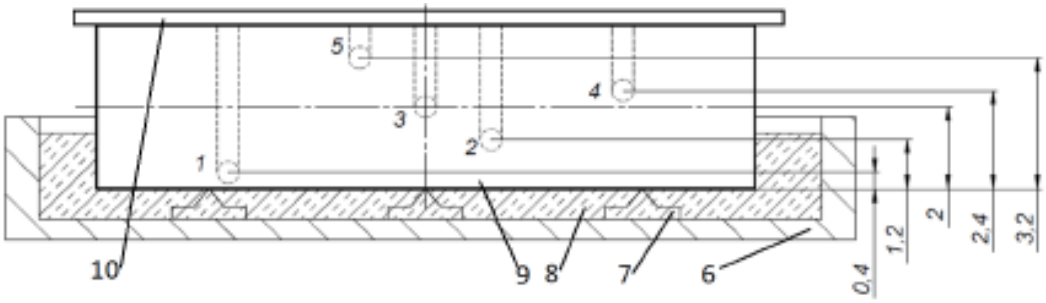


Рисунок 3.9 – Схема пристрою маслонаповнення із зазначенням координат розташування термодатчиків у зразку, де: 1…5 – термодатчики; 6 – ванна; 7 – опори для створення зазору між зразком та ванною; 8 – масляний наповнювач; 9 – поліамідний зразок; 10 – утеплювач

Падіння температури поліамідного зразка відбувалося внаслідок проникнення рідини (ТЖПВ), що відрізняється своєю температурою нагріву. У ході експерименту проводився автоматизований контроль температури поліамідного зразка для визначення моменту досягнення заданої глибини наповнювачем.

Визначення моменту досягнення ТЖПВ заданої глибини проводилося по різкій зміні динаміки падіння температури, оброблені в ПЗ Power-Graph дані графічно представлені малюнку 3.10.

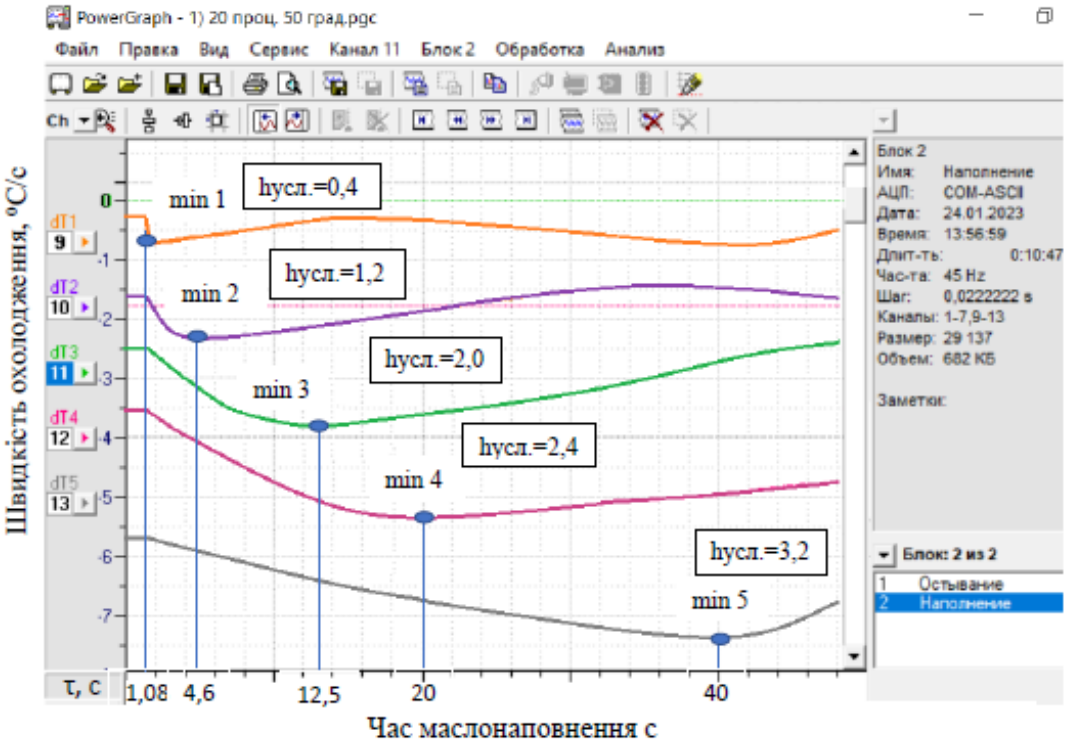


Рисунок 3.10 – Експериментальні дані зміни динаміки температури полемічного зразка при маслонаповненні, де: dT – динаміка падіння температури за часом τ; min 1…5 – точки екстремуму зміни динаміки температури, що відповідає товщинам умовного поліамідного зразка hусл.

Отримані дані часу досягнення РЖ дозволили визначити швидкість просочення.

Побудовано залежність зміни температури зразка за перерізами, зафіксовані у моменти досягнення суміші у вимірюваних точках розташування ТД, представленому на малюнку 2.11.

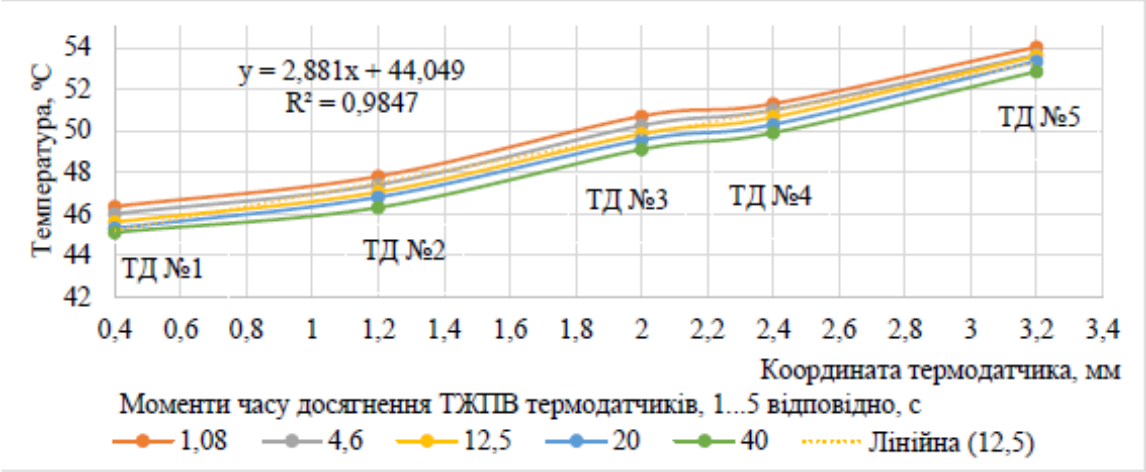


Рисунок 3.11 – Графіки зміни температури зразка у моменти досягнення ТЖПВ кожного термодатчика за координатами їх розташування

Температури на вході в поліамідний зразок, так і на товщині ППО при маслонаповненні, змінюються у вузькому діапазоні, відхилення від середньої температури становить ±1%. Отже, можна дійти невтішного висновку у тому, що температури межі розділу середовищ (наповнювача і поліамідного зразка) і глибині (hусл.) просочення постійні, що відповідає прийнятим граничним умовам математичної моделі.

Отриманий висновок підтверджує відповідність граничних умов математичної моделі рівнянню нерозривності та закону Дарсі, де за граничних умов тиск на вході та виході постійно.

У виробничих умовах замість стандартної робочої рідини можна використовувати робочі рідини з різною в'язкістю, створені на основі різних масел. У зв'язку з цим наступна глава була спрямована на проведення дослідження, що дозволяє визначити режими та умови, що забезпечують підвищення експлуатаційних характеристик виробів із поліамідних матеріалів, оброблених за технологією маслонаповнення.

4 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ МАСЛОНАПОВНЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОЛІАМІДНИХ ДЕТАЛЕЙ МАРКИ ПА6

Для експериментального підтвердження підвищення експлуатаційних характеристик виробів з поліамідних матеріалів, отриманих із застосуванням розробленої раніше технології високочастотного електротермічного маслонаповнення, необхідно провести експериментальні дослідження поліамідних зразків на прикладі випробування експлуатаційних властивостей, які надають найбільш значний вплив на ресурс роботи поліамідних деталей у складних умовах, а саме випробування на абразивний знос.

Так як прийнято рішення проводити нагрівання поліамідної деталі, необхідно використовувати відповідне обладнання із забезпеченням контролю процесу нагрівання.

Крім випробування експлуатаційних характеристик маслонаполненных поліамідних деталей, необхідно визначити один з основних параметрів технологічного процесу, що впливає на параметр продуктивності, а саме швидкість просочення.

Для проведення експериментальних досліджень швидкості руху наповнювача в поліамідних зразках та підтвердження підвищення експлуатаційних характеристик поліамідних деталей, оброблених за технологічним процесом маслонаповнення, необхідно розробити спеціалізоване обладнання та оснащення для проведення технологічного процесу маслонаповнення.

4.1 Розробка обладнання для технологічного забезпечення процесу олійного наповнення поліамідних деталей.

З метою забезпечення технологічного процесу маслонаповнення розроблена автоматизована система управління сушіння та маслонаповнення поліамідних матеріалів на основі модернізації обладнання УЗП 2500 (рисунок 3.1) шляхом впровадження в нього блоку управління з розробленою керуючою

програмою, в якій за основний керований параметр взята величина анодного струму, по якому проводиться управління температурою нагріву для нагріву. Саме визначення наповненого стану виконується за представленим раніше способом.

Рисунок 4.1 – Промислове встановлення УЗП 2500

Схема блоку управління автоматизованої установки маслонаповнення представлена малюнку 3.2.

Блок управління складається з компонентів: Кер. плата - керуюча плата установки як Arduino mega 2560; Дат. струму – датчик струму із замірюваним значенням до 5 ампер, моделі ACS712; Диф. посилив. – диференціальний підсилювач моделі ADDB для збільшення сигналу струму; T1…T5 – датчики температури, як термістор NTC 3950 на 10 кОм (розмір резистора відповідає допустимому діаметру отвору в поліамідному зразку під термодатчик, 2,2 мм); R1 9k, R2 1k, R3 10k – резистори на 9, 1 та 10 ком відповідно; PC817 – транзисторна оптопара та її обв'язка з резисторів, необхідна для захисту керуючої плати від високих наведень термісторами від змінного електричного поля під час нагрівання поліамідного зразка; Дат. кута повороту - датчик кута повороту WH148 50 кОМ рукоятки потужності ВЧ-генератора; електромагніт – для підняття поліамідного зразка; Хутро. реле - механічне реле, як SRD-05VDC-SL-C, необхідне для включення електромагнітного штовхача (електромагніт) і вентиляторів обдування зразка від поверхневої вологи (Вент. обдування зразка); Акум. 12V-акумулятор на 12 вольт для живлення: плати

управління електромагніта, вентиляторів і драйвера A4988 крокового двигуна Nema 17 17HS4401, 1,7 А, необхідних для обертання рукоятки потужності ВЧ-генератора; Тв. тел. реле - власне розроблене оптоволоконне твердотільне реле включення та відключення ВЧ-генератора; Бат. 9V - батарея 9 вольт, для живлення твердотільного реле. Налаштування та калібрування датчиків проведено згідно з документацією [2].

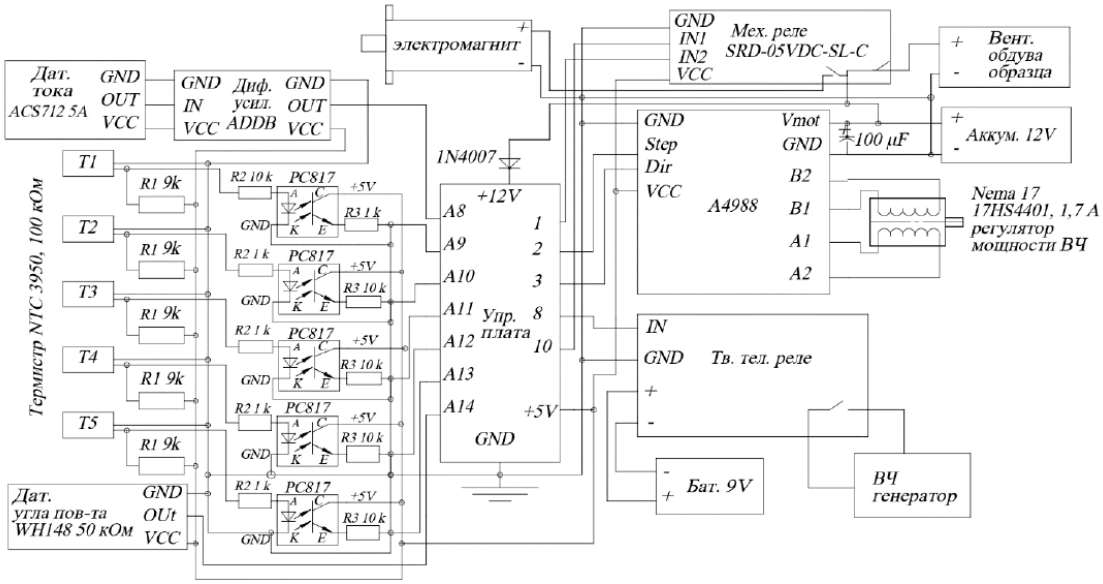


Рисунок 4.2 – Схема блоку управління автоматизованої установки маслонаповнення

При проведенні попередньо перевірочних експериментальних досліджень була виявлена проблема наведення великих перешкод, що виникають від змінного електричного поля високої частоти, що переходять через термодатчики на плату, що управляє (Arduino) і викликає її вихід з ладу. Виходячи з цього були прийняті рішення застосувати для передачі даних показань температури від датчиків через транзисторну оптопару PC817. Також з метою додаткового способу вирішення виявленої проблеми та модернізації дослідної установки виникла задача визначення інтервалу величини анодного струму, при якому досягається стан повністю висушеного зразка з розмірами 4x50x50 мм. І тому експериментально визначено значення інтервалу анодного струму, у якому досягається повна сушіння і відбувається прогар зразка, стала

0,25…0,35 А [27]. Певний інтервал значення анодного струму відповідає приблизно 170 ºС.

4.2 Розробка технологічного алгоритму забезпечення підвищення зносостійкості поліамідної деталі при маслонаповненні

Для визначення в'язкості ТЖПВ, що відповідає виявленим режимам та умовам технологічної операції, які дозволяють максимально знизити швидкість абразивного зносу, необхідно визначити в'язкість для заданої температури Т, яка визначається через формулу

$$\nu_T = \nu_{T_0} e^{-u_{vis}(T-T_0)},$$

де: νto – кінематична в'язкість, мм2/с для даної температури, То, ºС; u – показник крутості віскограми, 1/°С, визначається за формулою

$$u_{vis} = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{\nu_{T_1}}{\nu_{T_2}},$$

де νt1, νt2 – кінематична в'язкість при температурах Т1 та Т2 відповідно.

Вихідними даними для визначення в'язкості ТЖПВ будуть: гексан 40%, олія М8-60%, температура просочення 75 ºС.

Першим етапом необхідно визначити кінематичну в'язкість за температури 75 ºС для 100% вмісту гексану. Для цього знайдено дані кінематичної в'язкості гексану за різних температур: 0,683 і 0,401 мм2/с за температур -17,8 і 37,8 ºС відповідно [32, 48]. Визначимо показник крутості

$$u_{vis} = \frac{1}{37,8-(-17,8)} \ln \frac{0,683}{0,401} = 0,0096\ 1/^0C.$$

Визначаємо кінематичну в'язкість гексану для температури 75 ºС, за відомої температури 37,8 ºС

$$\nu_t = 0,401 \cdot e^{-0,00096 \cdot (75-37,8)} = 0,281\ \text{мм}^2/\text{с}.$$

Наступним етапом визначимо кінематичну в'язкість олії М8-В для температури 75 ºС при відомих: 1200 і 8 мм2/с при температурах 0 і 100 ºС відповідно за ГОСТ 10541-78. Показник крутості дорівнює

$$u_{vis} = \frac{1}{100-0} \ln \frac{1200}{8} = 0,05\ 1/^0C.$$

Визначаємо кінематичну в'язкість гексану для температури 75 ºС, за відомої температури 37,8 ºС

$$\nu_t = 0,401 \cdot e^{-0,00096 \cdot (75-37,8)} = 0,281\ \text{мм}^2 / \text{с}.$$

Виходячи з отриманих даних кінематичної в'язкості для температури просочення 75 ºС та 100% вмісту олії та гексану, визначимо в'язкість суміші для 40% вмісту гексану в маслі за номограмою Моліна-Гурвіча [32, 48], представленою на малюнку 3.3. З огляду на те, що компонент А відповідає маслу М8-В, а компонент Б відповідає гексану.

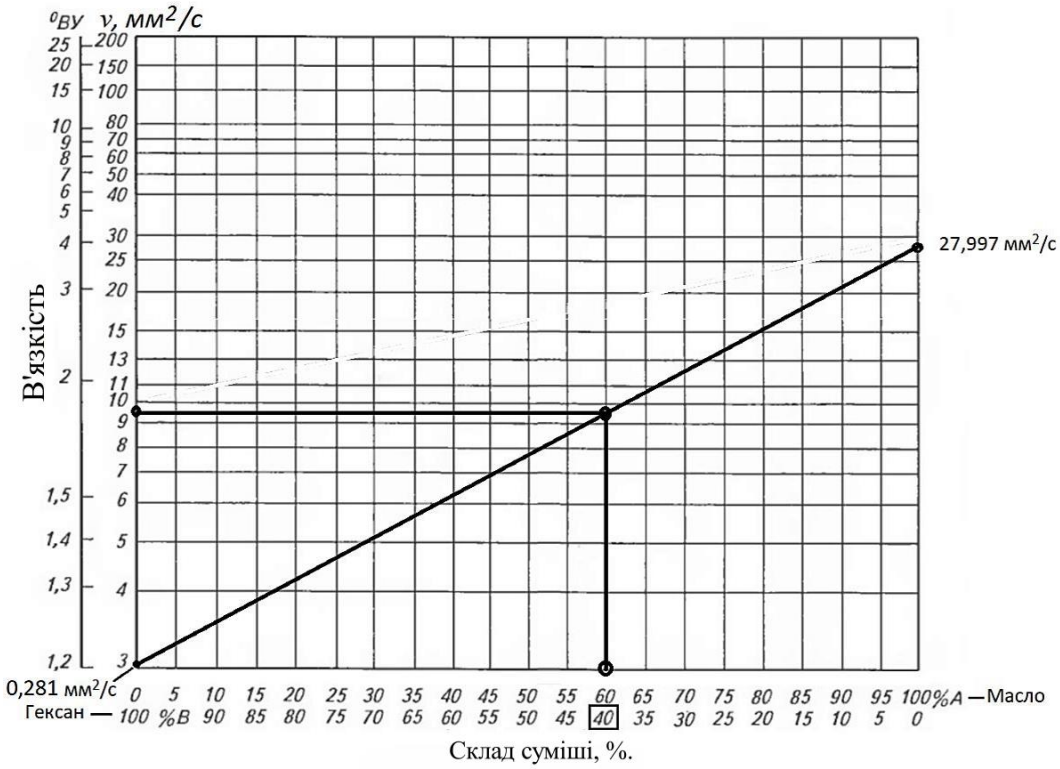


Рисунок 4.3 – Номограма Моліна-Гурвіча для визначення в'язкості суміші нафтопродуктів

З отриманого результату побудови ліній на діаграмі видно, що кінематична в'язкість ТЖПВ, що дозволяє максимально знизити швидкість абразивного зношування ПД, є при вмісті гексану 40% і температурі зразка поліамідного 75 ºС, відповідає 9,4 мм2/с.

Також необхідно врахувати, що кінематична в'язкість ТЖПВ з іншими оліями повинна відповідати кінематичній в'язкості у відповідність до рекомендацій проведення технологічного процесу маслонаповнення для конкретно виявленого відсоткового вмісту гексану в маслі М8-В. Визначення вмісту гексану для ТЖПВ з іншими маслами для досягнення заданої кінематичної в'язкості необхідно проводити за раніше представленою методикою.

Необхідно врахувати, при підвищенні вмісту гексану в ТЖПВ більше 60% температура наповнення не повинна перевищувати 52 ºС, якщо більше 40% не повинна перевищувати 78 ºС. У разі перевищення цього обмеження необхідно знизити температуру просочення та виконати перерахунок кінематичної в'язкості ТЖПВ.

Область застосування для даної кінематичної в'язкості 9,4 мм2/с для температури 75 ºС для даних умов та параметрів масла М8-В, але для інших масел будуть інші значення температури та в'язкості, що дозволяють досягти максимального зниження швидкості абразивного зносу. Для цього випадку необхідно здійснити аналогічні експериментальні дослідження.

Для визначення часу просочення представлені значення коефіцієнта проникності для оптимальних режимів та умови виконання технологічного процесу маслонаповнення, отримані за методикою, представленою вище.

Для визначення коефіцієнта проникності з використанням розробленої математичної моделі визначено оптимальну динамічну в'язкість.

$$\mu_T = \rho_T \cdot \nu_T = 9{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot 847{,}9 = 7{,}97 \cdot 10^{-3}\ \text{Па} \cdot \text{с},$$

де: νТ – оптимальна кінематична в'язкість, 9,4·10–6 м2/с; ρТ – щільність ТЖПВ із вмістом гексану 40% при температурі 75 ºС, визначена експериментально, 847,9 кг/м3.

На підставі раніше представленої математичної моделі просочення отримані результати, представлені в таблиці 3.1, які необхідні для визначення режимів та умов технологічного процесу маслонаповнення поліамідної деталі.

Таблиця 4.1 – Експериментальне визначення коефіцієнта проникності kT та градієнта температури за умови 60% та режиму 75 ºС

Товщина, $h_{усл}$, м	Час, τ, с	Швидкість, $u_{Tx,усл.}$, м/с	Температура, $\Delta T_{усл}$, ºС	Динамічна в'язкість, μ, Па·с	Коефіцієнт, $k_{Tx,усл.}$, $м^2 \cdot Па$ / ºС
0	0	–	22,3	$7{,}97 \cdot 10^{-3}$	–
0,0004	0,95	$4{,}2 \cdot 10^{-4}$	68,1		$2{,}93 \cdot 10^{-11}$
0,0012	3,8	$3{,}2 \cdot 10^{-4}$	69,5		$6{,}41 \cdot 10^{-11}$
0,0020	9,09	$2{,}2 \cdot 10^{-4}$	72,4		$7{,}0 \cdot 10^{-11}$
0,0024	13,3	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$	73,2		$6{,}78 \cdot 10^{-11}$
0,0032	22,86	$1{,}4 \cdot 10^{-5}$	76,1		$6{,}64 \cdot 10^{-11}$
Примітка: Матеріал зразка ПА6 з розмірами 4х50х50 мм. Склад наповнювача: гексана – 40% та моторного мастила М8–В – 60%. Температура наповнення 75 ºС.					

Експериментальні дані, подані в таблиці 3.1, апроксимуються наступними залежностями

$$\Delta T = 2902{,}4 \cdot h_{проп} + 44{,}21$$

(достовірність апроксимації R2 = 0,9998);

$$k_T = 6{,}287 \cdot 10^{-3}\, h_{проп.}^{3} - 4{,}531 \cdot 10^{-5}\, h_{проп.}^{2} + 1{,}029 \cdot 10^{-7}\, h_{проп} - 5 \cdot 10^{-12}$$

(достовірність апроксимації R2 = 0,9993);

Отримані параметри при оптимальній в'язкості необхідні визначення швидкості та часу просочення для наповнення на задану глибину готової поліамідної деталі при виконанні технологічного процесу маслонаповнення.

У зв'язку з тим, що в дослідженні поставлено завдання досягнення максимальної зносостійкості поліамідної деталі, прийнято рішення виконувати руйнівну контрольну операцію шляхом визначення абразивного зношування ПД або зразків-свідків.

Загальні відомості про операцію контролю ПД після маслонаповнення з використанням зразків-свідків:

- ✓ Визначення параметра зносостійкості поліамідних деталей проводять на зразках-свідках, виготовлених із цих деталей, їх розміри та геометрична форма повинні відповідати ГОСТ
- ✓ Зразки-свідки піддаються обробці спільно з ПД у технологічних операціях: 015, 025, 030
- ✓ Перед прийманням поліамідна деталь не повинна мати на поверхні залишки ТЖПВ, для її усунення необхідно обтерти сухим ганчірком.
- ✓ Приймання виробляють на підставі встановленого значення об'ємного абразивного зносу даних поліамідних деталей.
- ✓ При проведенні вибіркового контролю визначається маса зразка-свідка після притирання та після випробування за допомогою аналітичних ваг (з точністю до 0,0001 г), далі за формулою визначають об'ємний знос на метр стирання.
- ✓ При незадовільній якості зносостійкості поверхневого шару рекомендується проводити повторне дослідження на зразках-свідках, виготовлених з деталей, що належать до тієї ж партії.

5 ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МАСЛОНАПОВНЕННЯ І ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Для вирішення задачі оптимізації потрібно сформувати цільову функцію, необхідну для визначення ступеня досягнення поставленої мети підвищення зносостійкості поліамідних деталей, оброблених за розробленим технологічним процесом маслонаповнення. Також цільова функція необхідна розуміння, які параметри технологічного процесу забезпечуватимуться і як оцінюватимуться. Цільова функція необхідна кількісного вираження критеріїв оптимальності. Визначення оптимальних критеріїв забезпечує досягнення поставленої мети цього дослідження, а саме: підбір умов і режимів технологічного процесу, які дадуть найкращий результат проникнення наповнювача за найкоротший час на задану глибину ПД не менше ніж на допустиму величину зносу, що забезпечить максимальну її зносостійкість.

Параметрами технологічного процесу маслонаповнення є: продуктивність, стабільність, якість [39, 40, 70, 100]. Для представлення параметра технологічного процесу необхідно визначити критерій, яким він оцінюватиметься. Критерій оцінювання параметра має бути чисельно виражений і мати конкретний фізичний зміст, якщо він позитивно позначається на результаті процесу, то досягнення його максимального значення, якщо ж він негативно впливає, то досягнення його мінімального значення:

продуктивність – критерій оцінювання максимальної швидкості просочення на задану глибину;

стабільність – критерій оцінювання мінімального відхилення результатів підвищення будь-якої експлуатаційної характеристики поліамідної деталі або швидкості просочення за однакових режимів та умов проведення процесу маслонаповнення;

якість – досягнення максимального чи мінімального значення зносостійкості поліамідної деталі, що визначають надійність та довговічність машин.

Для параметрів технологічного процесу маслонаповнення, продуктивності та якості поліамідної деталі необхідно формування цільової функції, яку необхідно вирішити із застосуванням експериментальних досліджень, спрямованих на пошук оптимальних значень температури поліамідного зразка та в'язкості наповнювача. Окрім іншого, визначення критерію оцінювання параметра продуктивності – швидкість просочення – необхідне застосування теоретичних та практичних основ фізики фільтрації пористих тіл та методу кінцево-різницевого розрахунку.

Для оцінювання продуктивності, швидкості просочення і глибини проникнення можливе визначення шляхом проведення неруйнівного способу контролю (наприклад, контроль зі зміни температури поліамідного зразка в процесі просочення) або ж руйнуючий метод контролю (наприклад, додавання в наповнювач барвника і після проведення процесу наповнення розріз поліамідного зразка в поперечному перерізі у напрямку просочення. шляхом проведення випробування на абразивне зношування зразків-свідків.

Параметр стабільності не потребує складання цільової функції, оскільки він залежить від умов проведення техпроцесу. Даний параметр забезпечується кондиціюванням (сушінням) поліамідної деталі, а також забезпеченням початкових та граничних умов проведення процесу, визначених раніше. Кондиціювання проводиться для насичення вологою поліаміду до рівноважного стану з метою досягнення стабільності одержаних результатів технологічного процесу [120].

По проведеній постановці завдання оптимізації було з'ясовано, що необхідно сформувати цільову функцію для двох параметрів: продуктивності технологічного процесу та якості обробленої поліамідної деталі по даному процесу маслонаповнення. Дані параметри технологічного процесу залежать від його умов та режимів: температура ПД та відсотковий вміст гексану в

масляному наповнювачі. Виходячи з цього, необхідно зробити оптимізацію даних умов та режимів, для цього потрібно скласти цільову функцію для виявлення найбільшого підвищення зносостійкості ПД та досягнення найбільшої продуктивності технологічного процесу маслонаповнення.

У зв'язку з тим, що процес оптимізації необхідно провести для двох параметрів технологічного процесу, необхідно формування двох цільових функцій для двох параметрів [42, 80, 116].

Для оцінювання ступеня досягнення мети цього дослідження найважливішим параметром є якість ПД, найменш важливим – продуктивність технологічного процесу.

Щодо якості поліамідної деталі, згідно з проведеним аналізом вище, у важких умовах експлуатації важливою експлуатаційною характеристикою є зносостійкість. Чим вище зносостійкість, тим менше швидкість зносу ПД, тим більший ресурс її експлуатації. З точки зору розв'язання задачі оптимізації необхідно розглянути швидкість зносу, а для практичного застосування технологічного процесу важливим є факт зниження зносостійкості. Виходячи з цього, для критерію оцінювання параметра якості необхідно використовувати швидкість абразивного зносу - вона повинна прагнути мінімального значення, цільова функція даного параметра виглядатиме таким чином.

$$u_{н}(T, \mu) \rightarrow \min,$$

де: ui – швидкість зношування, мм/хв; T – температура поліамідної деталі, НС; μ – в'язкість наповнювача, Па·с.

Цільова функція параметра продуктивності полягає в забезпеченні заданої глибини просочення масла в найкоротші терміни, тому необхідно, щоб швидкість просочення була максимальна, даний критерій необхідний для оцінювання параметра продуктивності. Даний критерій також залежить від температури поліамідної деталі та в'язкості наповнювача відповідно до пропорцій гексану та олії в суміші. Виходячи з цього, цільова функція параметра продуктивності матиме наступний вигляд

$$u_{п}(T, \mu) \to \max.$$

5.1 Розв'язання оптимізаційної задачі

Рішення оптимізаційної завдання здійснювалося графічним методом, у якому використовується візуалізація функції визначення її мінімуму [39, 82, 130]. В даному випадку функція двох змінних (температура ПД, в'язкість наповнювача) представлена у вигляді тривимірного графіка (рисунок 5.1).

За отриманими результатами було прийнято рішення розробити двовимірну цільову функцію підбору оптимальних умов та режимів обробки. Дані рекомендації будуються на основі раніше отриманих результатів з обмеженням значення абразивного зношування до 1 мм і часу досягнення цієї межі для зразків, оброблених за різних умов і режимів. Результати розрахунку швидкості абразивного зношування представлені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Залежність швидкості абразивного зносу до 1 мм від температури поліамідного зразка та вмісту гексану в наповнювачі

Склад гексана в наповнювачі, %	Температура поліамідного озразка, ^{O}C	Час зносу до 1 мм, хв	Швидкість абразивного зноса до 1 мм, $u_{н}$, мм/хв
20	35	39,9	0,0251
20	50	52,0	0,0192
20	75	43,0	0,0233
40	35	47,0	0,0213
40	50	50,2	0,0199
40	75	63,0	0,0159
60	35	35,5	0,0282
60	50	34,0	0,0294

Тривимірне зображення залежностей вмісту гексану в масляному наповнювачі та температури при наповненні сумішшю від швидкості абразивного зношування поліамідного зразка розмірами 50х50 мм до 1 мм представлено на малюнку 4.1.

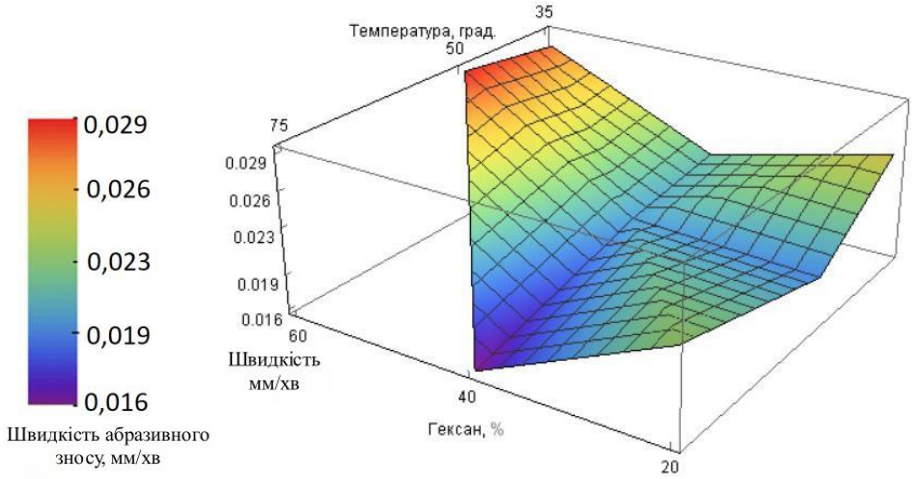


Рисунок 5.1 – Залежність абразивного зносу ПД від умов та режимів технологічного процесу високочастотного маслонаповнення поліамідних виробів при випробуванні

Для вирішення завдань оптимізації технологічного процесу маслонаповнення з погляду зменшення абразивного зносу розроблена двовимірна цільова функція для досягнення максимуму або мінімуму ефективності підвищення якості поверхневого шару поліамідного виробу. Побудована поверхня визначається проектними параметрами: вміст гексану в олії та температура наповнення для визначення значення швидкості абразивного зношування поліамідного зразка до 1 мм розмірами 4х50х50 мм.

Подальшою дією стало складання двовимірної цільової функції підбору оптимальних параметрів умов і режимів обробки підвищення продуктивності технологічного процесу. За отриманими раніше експериментальними даними щодо визначення швидкості просочення, було прийнято рішення взяти для складання двовимірної функції значення швидкості просочення до 2 мм згідно з нормативною документацією [98, 99], дана межа зазначена вертикальною пунктирною лінією. Підсумкові значення швидкості просочення до 2 мм в залежності від умов та режимів технологічного процесу маслонаповнення вказані в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результат визначення швидкості просочення на глибину 2 мм поліамідного зразка (ПЗ), мм/с

Склад гексана в напвнювачі, %	Температура ПО, °С		
	35	50	75
	Швидкість пропитки, $u_п$, мм/с		
20	0,10	0,16	0,11
40	0,27	0,12	0,22
60	0,45	0,47	–

За певними даними побудовано двовимірну цільову функцію для визначення швидкості просочення поліамідного зразка наповнювачем, представлену на малюнку 4.2.

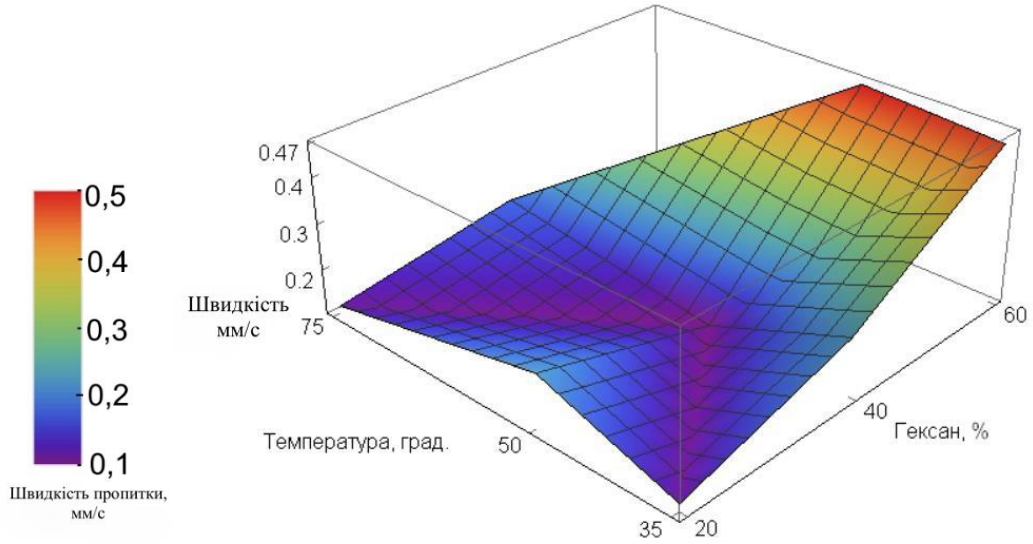


Рисунок 5.2 – Залежність швидкості просочення ПД від умов та режимів технологічного процесу маслонаповнення поліамідних виробів

Для вирішення завдань оптимізації технологічного процесу олійного наповнення з точки зору збільшення швидкості просочення розроблена двовимірна цільова функція для досягнення максимуму або мінімуму ефективності підвищення продуктивності технологічного процесу олійного наповнення. Побудована поверхня визначається проектними параметрами: вміст гексану в олії та температура наповнення для визначення швидкості

просочення поліамідного зразка масляним наповнювачем до 2 мм розміром 4х50х50 мм.

Аналіз за представленою на малюнку 5.1 залежності показав, що максимальне зниження швидкості абразивного зносу (0,16 мм/хв) досягається при температурі поліамідної деталі 75 ºС та вміст гексану в ТЖПВ 40%. За даними оптимальних параметрів можна побудувати залежність uп(ТПД,μ) для будь-якої глибини просочення hпроп, ґрунтуючись на експериментальних даних, представлених на малюнку 6 (приклад для hпроп=2 мм див. рисунок 4.2). Використовуючи цю залежність визначається швидкість просочення (uп,=0,22 мм/с) та основний час операції маслонаповнення (to=hпроп/uп= 9,1 с).

Таким чином прийнято оптимальними режим та умову процесу маслонаповнення, якими є: ТПД =75 ºС, вміст гексану в ТЖПВ – 40% при кінематичній в'язкості ТЖПВ – 9,4 мм2/с.

РОЗДІЛ 6
РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ НА ТЕМУ «ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОЛІАМІДНИХ ДЕТАЛЕЙ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У ВАЖКИХ УМОВАХ, НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МАСЛО НАПОВНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛІ» ДЛЯ ФАХІВЦЯ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ

6.1. Постановка цілей факультативного заняття з теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі»

В таблиці 6.1 наведено оперативні цілі з теми.

Таблиця 6.1

Постановка цілей факультативного заняття

№	Цілі факультативного заняття	Цілі формування різних рівнів засвоєння навчального матеріалу	Умови досягнення цілей	Результат у вигляді дій здобувачів освіти
1	2	3	4	5
1	Ознайомити студентів із фізико-механічними властивостями поліамідних матеріалів та їх поведінкою під навантаженням	Засвоєння базових знань про структуру та характеристики поліамідних деталей	Лекційний матеріал, наочні демонстрації, мультимедійні засоби	Студенти пояснюють особливості матеріалів, визначають властивості деталей для конкретних умов експлуатації

Продовження табл. 6.5

1	2	3	4	5
2	Розглянути принципи та технології маслонаповнення поверхневого шару деталей	Формування розуміння процесу зміцнення та підвищення зносостійкості	Демонстрація технологічного процесу, лабораторні роботи на макетах або стендах	Студенти ідентифікують ключові етапи технології, пояснюють механізм впливу масла на поверхневий шар
3	Сформувати навички аналізу впливу умов експлуатації на ресурс деталей	Розвиток аналітичних і прикладних умінь	Практичні завдання, моделювання навантажень, кейс-стаді	Студенти аналізують сценарії роботи деталей у важких умовах та пропонують оптимальні методи зміцнення
4	Розвинути вміння оцінювати ефективність технологічних рішень для підвищення довговічності деталей	Формування компетентностей в проєктуванні технологій і контролі якості	Практичні вправи, обговорення результатів, використання цифрових симуляцій	Студенти пропонують технологічні рішення, прогнозують результат зміцнення поверхневого шару, визначають оптимальні параметри процесу
5	Підвищити професійну відповідальність та готовність до впровадження інноваційних технологій	Розвиток ціннісних та мотиваційних аспектів навчання	Дискусії, групові проєкти, аналіз виробничих ситуацій	Студенти аргументовано обґрунтовують вибір технологій, демонструють готовність впроваджувати їх у виробництво

6.2. Перелік літературних джерел з теми

1. Кузьменко, В.І. Матеріалознавство полімерів та композитів. – К.: Видавництво «Наукова думка», 2020. – 312 с.

2. Іваненко, С.П., Петренко, О.М. Технології зміцнення поверхневих шарів деталей машинобудівних підприємств. – Х.: Технічна література, 2019. – 256 с.

3. Левченко, Д.І. Зносостійкість полімерних матеріалів у важких умовах експлуатації. – Л.: Машинобудування, 2021. – 198 с.

4. Сидоренко, М.В. Інноваційні методи підвищення довговічності деталей у машинобудуванні. – К.: Техніка, 2022. – 224 с.

6.3. Конструювання дидактичних матеріалів з теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі»

Підготовка фахівців машинобудівних підприємств передбачає комплексне формування теоретичних знань, практичних навичок та аналітичних здібностей. Для ефективного опанування теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей на основі технології маслонаповнення поверхневого шару» необхідно створити дидактичні матеріали, які забезпечують логічне поєднання теорії та практики.

Основна мета конструювання дидактичних матеріалів полягає у формуванні у студентів професійних компетентностей, що включають: розуміння фізико-механічних властивостей поліамідних матеріалів, оцінку впливу експлуатаційних факторів на ресурс деталей, а також здатність вибирати та застосовувати сучасні методи зміцнення поверхневого шару.

До складу дидактичних матеріалів входять:

1. Теоретичні модулі – презентації та конспекти лекцій, які висвітлюють структуру поліамідних матеріалів, принципи зносостійкості та методи масло-насичення поверхневого шару.

2. Ілюстративні матеріали – схеми, графіки, фотознімки та відео процесів зміцнення деталей, що дозволяють наочно демонструвати механізми впровадження технології та результати впливу на довговічність.

3. Практичні завдання – кейси, лабораторні роботи та моделювання, що передбачають аналіз дефектів, розрахунок оптимальних режимів насичення поверхневого шару маслом та оцінку експлуатаційних характеристик деталей.

4. Контрольні та аналітичні матеріали – тести, контрольні питання та задачі для самостійної роботи, що дозволяють перевірити рівень засвоєння знань та сформованість практичних навичок.

Особлива увага приділяється інтеграції цифрових моделей і симуляцій технологічного процесу масло-насичення, що дає змогу студентам відпрацьовувати методи зміцнення поверхневого шару без безпосереднього використання дорогої виробничої техніки. Це дозволяє не лише підвищити ефективність навчального процесу, а й забезпечити безпечні умови практичної підготовки.

Конструювання дидактичних матеріалів ґрунтується на принципах поступового ускладнення навчального матеріалу, поєднання теоретичних знань з практичними навичками та розвитку аналітичного мислення. Завдяки такому підходу студенти отримують цілісне уявлення про технологію підвищення зносостійкості поліамідних деталей і здатні застосовувати набуті знання у реальних виробничих умовах.

6.4. Аналіз базових умов навчання з теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі»

В таблиці 6.2 приведено вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань.

Таблиця 6.2

Вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань

Перелік базових понять, законів, способів дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій
1	2	3
1. Вступ до матеріалознавства поліамідних деталей	Метод – усне опитування. Форма – фронтальна. Засіб – контрольні питання, тестові завдання. Контрольні питання: 1. Яка структура поліамідних матеріалів і як вона впливає на їхні фізико-механічні властивості? 2. Які основні фізико-механічні властивості визначають зносостійкість поліамідних деталей? 3. Як умови експлуатації впливають на ресурс поліамідних деталей?	використовуються усні опитування та обговорення раніше вивчених матеріалів щодо фізико-механічних властивостей поліамідних матеріалів, впливу навантажень, температур та середовищ на їх ресурс.
2. Технології підвищення зносостійкості поліамідних деталей	1. Які методи поверхневого зміцнення використовуються для підвищення зносостійкості поліамідних деталей? 2. У чому полягає принцип дії технології маслонаповнення поверхневого шару деталей? 3. Чим інноваційні методи зміцнення відрізняються від традиційних?	

Продовження табл. 6.2

1	2	3
3. Вплив експлуатаційних факторів на ресурс деталей	1. Як температура та механічні навантаження впливають на поліамідні деталі? 2. Який вплив на зносостійкість деталей мають тертя та агресивні середовища? 3. Які механізми деградації поліамідних деталей можна виділити при важких умовах експлуатації?	Це дозволяє студентам актуалізувати базові теоретичні знання і сформувати усвідомлення причинно-наслідкових зв'язків між властивостями матеріалу та умовами його експлуатації.
4. Проєктування технологічного процесу зміцнення деталей	1. Які основні етапи планування технологічного процесу зміцнення деталей? 2. На що слід звертати увагу при виборі параметрів насичення маслом поверхневого шару деталей? 3. Яку роль відіграє цифрове моделювання у процесі проєктування технології зміцнення деталей?	
5. Контроль та оцінка ефективності технології	1.Які методи використовуються для оцінки зносостійкості поліамідних деталей після зміцнення? 2.Як оцінюється ресурс та довговічність деталей після впровадження технології маслонаповнення? 3.Які фактори впливають на ефективність технології та її застосування в промислових умовах?	

6.5. Проєктування мотиваційних технологій навчання з теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі»

На рис. 6.3 представимо характеристику мотиваційних технологій навчання.

Таблиця 6.3

Визначення способів реалізації мотивації

Способи реалізації мотивації	Внутрішня мотивація
1	2
Вступна мотивація	Доброго дня, шановні здобувачі освіти! У сучасному машинобудуванні питання підвищення зносостійкості деталей є ключовим чинником надійності та довговічності обладнання. Поліамідні деталі, які працюють у важких умовах, піддаються значним механічним, термічним та хімічним навантаженням. Недостатня зносостійкість таких компонентів призводить до швидкого виходу з ладу вузлів, збільшення часу простою машин, високих витрат на заміну деталей та ремонт. Технологія маслонаповнення поверхневого шару деталей є одним із перспективних методів, що дозволяє підвищити ресурс поліамідних виробів, покращити їхню експлуатаційну надійність та стабільність роботи у складних умовах. Засвоєння цієї технології вимагає від фахівців не лише глибоких теоретичних знань з матеріалознавства, трибології та механіки, а й практичних навичок у плануванні та контролі процесів зміцнення поверхневого шару. Мотивація вивчення даної теми полягає у формуванні у студентів розуміння того, що ефективна реалізація технологій зміцнення безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики машинобудівних виробів. Студенти отримують можливість зрозуміти причинно-наслідкові зв’язки між параметрами технології, властивостями матеріалу та довговічністю деталей, що, у свою чергу, формує відповідальне ставлення до проектування та оптимізації виробничих процесів. Вивчення цього матеріалу стимулює розвиток критичного мислення, здатності до аналізу та вибору оптимальних методів технологічного впливу, а також навичок практичної роботи з сучасним обладнанням для зміцнення поверхневих шарів. Реальні виробничі приклади та моделювання процесів дозволяють студентам побачити результати своїх рішень у дії, що підвищує їхню мотивацію та усвідомлення важливості професійних компетентностей у машинобудуванні. Таким чином, засвоєння матеріалу з підвищення зносостійкості поліамідних деталей через технологію маслонаповнення поверхневого шару є необхідним кроком для підготовки висококваліфікованих інженерів і технологів, здатних

Продовження табл. 6.3

1	2
	впроваджувати інноваційні рішення, підвищувати ефективність виробництва та довговічність машинобудівних виробів.

6.6. Проєктування технології формування орієнтовної основи діяльності на факультативному занятті з теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі»

Вибір методів, форм та засобів формування ООД наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

Способи формування ООД на факультативному занятті

Рівень засвоєння (Б. Блум)	Форми організації навчання	Методи навчання	Засоби навчання
1	2	3	4
Знання / Пам’ять	Лекційне заняття, фронтальна робота	Пояснення, демонстрація, усне опитування	Презентації, схеми поліамідних матеріалів, відео демонстрації технології маслонаповнення
Розуміння	Лекції, дискусії, групова робота	Пояснення, обговорення, аналіз прикладів, робота з текстами	Наочні матеріали, приклади виробів, креслення деталей
Застосування	Лабораторні та практичні заняття	Практичні вправи, моделювання процесу,	Лабораторне обладнання для моделювання процесу, макети деталей, засоби

Продовження табл. 6.4

1	2	3	4
		демонстрації технології	вимірювання зносу
Аналіз	Групова робота, лабораторні заняття	Порівняльний аналіз, мозковий штурм, дискусія	Таблиці з даними експериментів, цифрові моделі деталей, програмне забезпечення для моделювання поверхневих шарів
Синтез	Практичні заняття, проєктна робота	Розробка технологічного процесу зміцнення, об'єднання знань у проєкт	Комп'ютерні системи моделювання, лабораторне обладнання, інструкції з технології маслонаповнення
Оцінювання	Самостійна робота, презентації, захист проєктів	Контроль ефективності обраних технологій, оцінка результатів експериментів	Звіти про виконану роботу, протоколи вимірювань, програмне забезпечення для аналізу результатів

6.7 Проєктування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті з теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі»

Вибір методів, форм та засобів формування виконавчих дій наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 6.5

Способи формування виконавчих дій з теми

Рівень засвоєння навчального матеріалу	Форми, методи, засоби
1	2
Знання (запам'ятовування та розуміння)	Форми: фронтальні заняття, усні опитування, дискусії. Методи: пояснення, демонстрація, аналіз науково-технічної літератури. Засоби: презентації, схеми поліамідних деталей, макети поверхневого шару, відео процесу маслонаповнення. Вправа: описати фізико-механічні властивості поліамідів та пояснити вплив маслонаповнення на зносостійкість.
Застосування (практичне використання знань)	Форми: лабораторні заняття, групові вправи. Методи: практичне моделювання технології, розрахунки параметрів обробки, робота з макетами деталей. Засоби: макети деталей, лабораторне обладнання для нанесення масла, вимірювальні прилади для оцінки зносу. Вправа: провести експериментальне моделювання нанесення масла на поліамідну деталь і оцінити зміни властивостей поверхневого шару.
Аналіз (оцінка та порівняння процесів)	Форми: групові дискусії, кейс-стаді. Методи: порівняльний аналіз результатів експериментів, обговорення причин зносу деталей. Засоби: графіки зносу, зразки деталей до і після обробки, цифрові моделі. Вправа: визначити критичні зони зносу на поверхні поліамідної деталі та порівняти ефективність різних параметрів маслонаповнення.
Синтез (планування та проєктування процесу)	Форми: індивідуальна та групова робота, проектні завдання. Методи: розробка оптимальної технології зміцнення поверхневого шару, моделювання процесу в CAD-системі. Засоби: комп'ютерні програми моделювання, таблиці параметрів обробки, інструкції з технології маслонаповнення. Вправа: спланувати технологічний процес нанесення масла на поліамідну деталь для конкретних умов експлуатації, обґрунтувати вибір параметрів.
Оцінка (оцінювання ефективності та пропозиції вдосконалення)	Форми: індивідуальна робота, захист результатів, звіт. Методи: аналіз отриманих даних, обґрунтування рекомендацій, розробка пропозицій щодо покращення технології. Засоби: звіти лабораторних робіт, графіки зносу, результати вимірювань.

Продовження табл. 6.5

1	2
	Вправа: оцінити ефективність обраного способу маслонаповнення та запропонувати методи підвищення зносостійкості деталей у конкретних умовах.

6.8 Проєктування контрольних дій з теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі»

Вибір методів, форм та засобів формування контрольних дій наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

Засоби контролю з теми факультативного заняття

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми, методи, засоби
1	2
III рівень	Письмове опитування. Рівень 1: Пізнавальний (знання та розуміння) 1. Ознайомлення з фізико-механічними властивостями поліамідних матеріалів: визначити характеристики, що впливають на зносостійкість (твердість, модуль пружності, міцність на стиск і розтягування). 2. Вивчення принципів технології маслонаповнення поверхневого шару: описати етапи процесу та очікуваний ефект для зносостійкості деталей. 3. Усне опитування щодо факторів, що зменшують ресурс поліамідних деталей під час експлуатації у важких умовах (температура, тертя, агресивне середовище). Рівень 2: Практичний (застосування знань) 1. Провести демонстраційний експеримент на макеті деталі: оцінити поточний стан поверхневого шару до і після маслонаповнення.

Продовження табл. 6.6

1	2
	1. Виконати розрахунок параметрів процесу масло-насичення для конкретного поліамідного виробу, враховуючи робочі умови та навантаження. 2. Визначити оптимальну товщину поверхневого шару та концентрацію масла для підвищення зносостійкості. Рівень 3: Аналітичний (аналіз). Порівняти ефективність технології маслонаповнення з іншими методами зміцнення поліамідних деталей (термостабілізація, армування волокнами, покриття). 3. Проаналізувати результати експериментів та визначити, які параметри процесу впливають найбільше на довговічність деталі. 4. Виявити критичні зони зносу та запропонувати технологічні рішення для їх зміцнення. Рівень 4: Проєктний (синтез і оцінка) 5. Розробити покроковий технологічний процес масло-насичення конкретної поліамідної деталі, враховуючи її геометрію та експлуатаційні умови. 6. Скласти протокол випробувань для оцінки зносостійкості після впровадження технології. Підготувати звіт із обґрунтуванням вибору параметрів процесу, порівнянням результатів із вихідними характеристиками та рекомендаціями щодо підвищення ресурсу деталей.

6.9 Розробка сценарію факультативного заняття з теми «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології масло наповнення поверхневого шару деталі»

Сценарій заняття, його структура й зміст структурних елементів представлені у вигляді табл. 4.7.

Таблиця 6.7

Сценарій факультативного заняття

№ з/п	Структурні елементи заняття	Зміст структурних елементів
1	2	3
1	Організаційний момент	Привітання студентів, перевірка присутніх. Створення робочої атмосфери та налаштування на
		активну навчальну діяльність. Нагадування правил безпеки та технологічної дисципліни при роботі з поліамідними деталями, інструментами та вимірювальними приладами.
2	Повідомлення теми і мети заняття	Тема: «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей у важких умовах експлуатації за рахунок технології маслонаповнення поверхневого шару». Мета: сформувати у студентів знання та практичні навички аналізу стану деталей, визначення зон зносу, підбору оптимальних параметрів технології маслонаповнення та оцінки ефективності зміцнення поверхневого шару.
3	Мотивація навчальної діяльності	Обговорення актуальності теми: підвищення ресурсу поліамідних деталей у важких умовах експлуатації, скорочення частоти ремонту та збільшення довговічності виробів. Демонстрація прикладів деталей до та після зміцнення поверхневого шару маслом. Пояснення, як технологія маслонаповнення покращує експлуатаційні характеристики деталей.
4	Актуалізація базових знань	Усне опитування та дискусія щодо: • Фізико-механічних властивостей поліамідних деталей; • Впливу тертя, навантаження, температури та агресивних середовищ на знос; • Основних методів зміцнення поверхневого шару деталей; • Роль технологічних параметрів у формуванні ресурсу деталі. Методи: дискусія, усне опитування. Форма: фронтальна. Засоби: зразки деталей, креслення, контрольні запитання.

Продовження табл. 6.7

1	2	3
5	Формування нового навчального досвіду (ООД)	Демонстрація процесу маслонаповнення на макетах та симуляціях. Студенти аналізують розподіл масла у поверхневому шарі, визначають критичні ділянки зносу та обговорюють вплив технологічних параметрів (тиску, температури, часу насичення) на ефективність зміцнення. Методи: пояснення, демонстрація, дискусія, мозковий штурм.
6	Формування вмінь та дій (ВД)	Практичні вправи: 1. Виявлення дефектів та зон зносу на поліамідних деталях; 2. Вибір параметрів маслонаповнення для конкретної деталі; 3. Проведення демонстраційного експерименту на макеті; 4. Оцінка ефективності зміцнення шляхом вимірювання твердості та зносу; 5. Розробка рекомендацій щодо оптимізації технології зміцнення для конкретних умов експлуатації.
7	Формування компетентності (КД)	Обговорення результатів практичних вправ та контрольні питання: • Вплив параметрів технології на зносостійкість; • Методи оцінки ефективності поверхневого зміцнення; • Аналіз доцільності застосування маслонаповнення у виробництві; • Пропозиції щодо вдосконалення технологічного процесу.
8	Підбиття підсумків, видача домашнього завдання	Підсумок заняття: значення використання технології маслонаповнення для підвищення зносостійкості поліамідних деталей у важких умовах, роль аналізу та контролю параметрів процесу. Домашнє завдання: підготувати звіт із експериментальної перевірки технології, визначити критичні ділянки деталей та запропонувати рекомендації щодо оптимізації процесу зміцнення поверхневого шару.

Висновки до розділу 6

Проведена розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «Підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, на основі використання технології маслонаповнення поверхневого шару деталі» дозволяє зробити низку важливих висновків.

По-перше, проведене дослідження підтвердило актуальність підвищення професійної компетентності фахівців машинобудівних підприємств у сфері застосування інноваційних технологій зміцнення поліамідних деталей. Сучасні виробничі умови та вимоги до ресурсу деталей, що працюють у складних експлуатаційних режимах, зумовлюють необхідність знання та практичного опанування методів поверхневого зміцнення, зокрема технології маслонаповнення.

По-друге, дидактичний проєкт дозволяє системно організувати навчальний процес, поєднуючи теоретичні знання з практичними навичками. Завдяки застосуванню демонстрацій, симуляцій та практичних вправ, студенти набувають умінь оцінювати стан деталей, визначати критичні ділянки зносу, обирати оптимальні параметри технології та контролювати ефективність зміцнення поверхневого шару. Такий підхід сприяє формуванню у здобувачів освіти аналітичних, проєктних та технологічних компетентностей, що є ключовими для роботи на сучасних машинобудівних підприємствах.

По-третє, розроблений сценарій факультативного заняття забезпечує формування комплексних навичок, включаючи планування експериментальних робіт, роботу з макетами та вимірювальними приладами, оцінку результатів технологічних процесів і розробку рекомендацій щодо підвищення зносостійкості деталей. Це дозволяє не лише підвищити рівень професійної підготовки студентів, але й сприяє розвитку їх відповідальності за якість та надійність виробничих процесів.

Нарешті, практичне застосування запропонованого дидактичного проєкту у навчальних закладах і виробничих центрах дає змогу інтегрувати сучасні технології у процес професійної підготовки, скоротити час адаптації фахівців до реальних виробничих умов та підвищити конкурентоспроможність підприємств. Таким чином, розроблений дидактичний проєкт є ефективним інструментом підвищення рівня знань і

практичних навичок майбутніх фахівців у сфері вдосконалення технологій зміцнення поліамідних деталей.

ВИСНОВКИ

По досягненню поставленої мети цього дослідження, було досягнуто підвищення зносостійкості поліамідних деталей, які у важких умовах, що дозволило зробити значний внесок у галузь машинобудування. У тому числі:

Проведено аналіз сучасного стану та існуючих проблем технологічного забезпечення підвищення експлуатаційних характеристик поліамідних деталей, що працюють у важких умовах, що дозволив висунути гіпотезу про перспективність розробки нової технології виготовлення поліамідних деталей із застосуванням процесу маслонаповнення як фінішної операції механічної обробки.

На підставі наведених результатів теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано новий спосіб підвищення зносостійкості поліамідних деталей, що полягає в олійному наповненні їх поверхневого шару модифікованої рідиною зниженої в'язкості. Визначено допустимі межі вибору температурного режиму (35…75 ºС) та вмісту гексану у наповнювачі (20…60%).

Розроблено температурно-динамічний спосіб визначення швидкості просочення на основі пошарового контролю динаміки зміни температури в процесі маслонаповнення деталей з поліамідного матеріалу марки ПА6. Похибка вимірювання застосовуваного способу склала 0,6%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf
2. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 204 с.
3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УІПА, 2019. – 174 с.
4. Лебедик Л.В., Стрельніков В.Ю., Стрельніков М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельніков, М. В. Стрельніков. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.
5. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.
6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УІПА, 2024. – 82 с.

7. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» першого (бакалаврського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

8. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» другого (магістерського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

9. Семенова А.В. Професійна педагогіка: Підручник. / Авт. : О.В. Грабовський, Л.В. Коломієць, О.С. Савєльєва, А.В. Семенова, В.Ф. Яні; за заг. ред. А.В. Семенової. – Одеса: Бондаренко М.О., 2020. – 575 с.

10. Сайт дистанційної освіти Університету – Режим доступу: https:// moodle.karazin.ua

11. EdEra – студія онлайн-освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ed-era.com/

12. Український освітній онлайн-портал для вчителів «На Урок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://naurok.com.ua/

13. «Освіторія Медіа» – онлайн медія про освіта та виховання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://osvitoria.media/

14. Освіта.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://osvita.ua

15. Всеосвіта – освітня платформа для професійного зростання педагогічних працівників та підвищення їх педагогічної майстерності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vseosvita.ua/

16. Bhagat S., Babu N. R., Saikia L. C., Chiranjeevi T. A review on various secondary controllers and optimization techniques in automatic generation control // Archives of Computational Methods in Engineering. 2023. Vol. 64. P. 759-768.

17. Chen X., Hou Y., Chen S., Liu X., Zhong X. Characteristics of frictional pressure drop of two–phase nitrogen flow in horizontal smooth mini channels in diabatic/adiabatic conditions // January Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 162. P. 114-121.

18. Eltahir Y., Saeed H., Xia Y., He Y., Yimin W. Mechanical properties, moisture absorption, and dyeability of polyamide 5,6 fibers // The Journal of The Textile Institute (China). 2015. Vol. 107(2). P. 1-7.

19. Junhao Y., Suya G., Wenchuan L., Tairan C., Timothy L. Experimental study of flash boiling spray with isooctane, hexane, ethanol and their binary mixtures // (2021) Fuel 292(3). 2021. P. 415-420.

20. Malea C. I., Niţu E. L. Optimization of the technological process and equipment of complex profiled parts // IOP Conference Series Materials Science and Engineering 916. (Romania). 2020 Vol. 926. P. 1890-1899.

21. Qing F., Shuai Z., Haoming L., Mingyuan D., Fuchuan H. Review of polymer self– lubricating coatings // IOP Conference Series Earth and Environmental Science (India). 2020 Vol. 526. P. 120-127.

22. Tan S., Luo Y., Yang J., Baoguang Jia W. W. Mechanism of thermoviscoelasticity driven solid–liquid interface reducing friction for polymer alloy coating // Friction (China). 2023. Vol. 11. P. 1-18.