

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

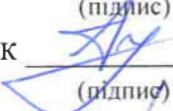
Підготовка фахівців машинобудівної галузі з підвищення ефективності
технологічних процесів віброабразивної обробки деталей
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студентка5 курсу, групи ДІТ-
ПОМ23мг

спеціальності: 015.34 «Професійна освіта
(Машинобудування)»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

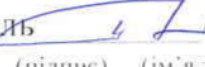
 / Ангеліна ЗАХАРОВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник  / Олександр ПЕРМЯКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент  / Наталія АНТОНЕНКО
(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)

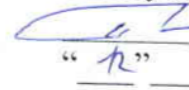
Харків – 2024 рік

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.Л. Подоляк
“12” 10 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти
студенту (ці) Ангеліні ЗАХАРОВІЙ
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підготовка фахівців машинобудівної галузі з підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей
затверджена наказом 4801-5/3345 від 12.10. 2024 р.
2. Термін здачі магістрантом закінченої роботи 5 грудня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: Зразки деталей для віброабразивної обробки, нормативні документи, паспортні дані обладнання, каталоги, стандарти на засоби технічного оснащення..
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): Вступ. теоретичні дослідження обробки внутрішніх поверхностей деталей вільними абразивами. експериментальні дослідження процесу віат деталей, що мають різно розміщені поверхні. рекомендації з проектування технологічних процесів віат деталей, що мають різно розміщені поверхні
Методичний розділ. 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	Вероніка БАКАТАНОВА			

7. Дата видачі завдання «12» 10 2024р.

Керівник



Олександр ПЕРМЯКОВ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання



Ангеліна ЗАХАРОВА

(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



Ангеліна ЗАХАРОВА

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)



(ім'я, прізвище)

Олег ПОДОЛЯК

Додаток 2 до Порядку проведення перевірки наукових праць, навчально-методичних видань та дипломних робіт (проектів) працівників та здобувачів вищої освіти на наявність запозичень з інших документів (нова редакція)

Введено в дію:

наказ ректора № 0204 -1/088 від 27.02.2020 р.

Протокол контролю оригінальності дипломної роботи (проєкту)

Підготовка фахівців машинобудівної галузі з підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей

студента ЗАХАРОВА Ангеліна Олександрівна
(назва роботи)
(прізвище, ім'я та по батькові)

науковий керівник Пермяков Олександр Анатолійович
(прізвище, ім'я та по батькові)

В результаті перевірки роботи в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com встановлено наступні значення Коефіцієнтів Подібності

Коефіцієнт Подібності 1: 0,21,

Коефіцієнт Подібності 2: 0,00 ,

Сигнал „Тривога!": ☐ – немає; ☐ – є, кількість разів у тексті ____.

Вченою радою факультету (навчально-наукового інституту) затверджено наступні показники оригінальності (за значенням коефіцієнту K1):

не більше 20% – оригінальна робота,

від __% до __% – задовільно оригінальна робота,

від __% до __% – умовно оригінальна робота,

більше __% – неоригінальна робота.

Відповідно до цього, робота може бути класифікована як:

☒ оригінальна,

☐ задовільно оригінальна,

☐ умовно оригінальна,

☐ неоригінальна.

Висновок:

☒ робота може бути допущена до захисту,

☐ необхідно провести розгляд Повного Звіту Подібності із залученням фахівців із тематики дипломної роботи (проєкту).

Примітки Системного Оператора про виявлені запозичення:

Системний Оператор


(підпис)

Скоркін А.О.

(прізвище та ініціали)

26.11.24

(дата)

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1 Актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі	8
2 Стан питання та постановка завдання досліджень	14
3 Теоретичні дослідження обробки внутрішніх поверхностей деталей вільними абразивами	28
4 Експериментальні дослідження процесу віат деталей, що мають різно розміщені поверхні	36
5 Рекомендації з проектування технологічних процесів віат деталей, що мають різно розміщені поверхні	52
Розділ 6 Розробка методичних вказівок до проведення семінару на тему «підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей»	55
Висновки	69
Список використаних джерел	70

Реферат магістерської кваліфікаційної роботи з теми “ Підготовка фахівців машинобудівної галузі з підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей ”

РЕФЕРАТ

Робота містить 70с., 35 рис., 24 табл., 24 джерел.

Кваліфікаційна робота (дипломний проєкт) присвячений науковому обґрунтуванню та вдосконаленню системи підготовки фахівців машинобудівної галузі з підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей.

У першому розділі розглянуто актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі з технологічного забезпечення та підвищення якості поверхневого шару евольвентних поверхонь зубів.

У другому розділі виконано огляд досліджень та публікацій з проблеми підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей.

У третьому розділі виконано теоретичне дослідження обробки внутрішніх поверхностей деталей вільними абразивами.

У четвертому розділі виконано експериментальні дослідження процесу віат деталей, що мають різно розміщені поверхні.

У п'ятому розділі розроблено рекомендації з проектування технологічних процесів віат деталей, що мають різно розміщені поверхні.

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

Ключові слова: професійна підготовка, машинобудівна галузь, фахівець, віброабразивна обробка, верстат ЧПУ, методика практичного заняття.

Abstract of the master's qualification work on the topic “Training of specialists in the machine-building industry to increase the efficiency of technological processes of vibro-abrasive processing of parts”

ABSTRACT

The work contains 70 pages, 35 figures, 24 tables, 24 sources.

The qualification work (diploma project) is devoted to the scientific substantiation and improvement of the system of training specialists in the machine-building industry to increase the efficiency of technological processes of vibro-abrasive processing of parts.

The first section considers the relevance of professional training of specialists in the machine-building industry in technological support and improving the quality of the surface layer of involute tooth surfaces.

The second section reviews research and publications on the problem of increasing the efficiency of technological processes of vibro-abrasive processing of parts.

The third section carries out a theoretical study of the processing of internal surfaces of parts with free abrasives.

The fourth section carries out experimental studies of the process of viat of parts with differently located surfaces.

The fifth section develops recommendations for the design of technological processes for parts with differently arranged surfaces.

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, vibro-abrasive processing, CNC machine tool, practical training methodology.

ВСТУП

Технологія машинобудування – наука, що вивчає технологічні процеси виготовлення виробів машинобудування необхідної якості у заданих кількостях за найменшої собівартості. Для забезпечення необхідного рівня якості застосовують різні методи фінішної обробки. Розвиток цифрових технологій спричинило так звану промислову революцію 4.0. Інтеграція цифрових технологій у машинобудівне виробництво підвищує його ефективність за рахунок зниження витрат на технологічну підготовку виробництва, скорочення термінів виготовлення виробу, підвищення автоматизації та гнучкості виробництва, створення безлюдного виробництва.

Одним із недоліків машинобудівного виробництва є складність реагування на зміну номенклатури продукції, що виготовляється. Цифрові технології дозволили створити концепцію цифрового виробництва – гнучкого автоматизованого виробництва. Деякі методи фінішної обробки не можуть повноцінно використовуватися в цифровому виробництві, оскільки викликають складність автоматизації і не мають необхідної гнучкості. Для вирішення цього питання було розроблено методи обробки у вільних абразивах. Одним із перспективних та найпоширеніших методів є віброабразивна обробка. Даний метод обробки має широкі технологічні можливості, високий рівень автоматизації та успішно впроваджений на багатьох підприємствах.

Важливим питанням цифрового виробництва є надійність технологічної системи технологічних процесів. Цифрове виробництво має на увазі «безлюдне виробництво». Більшість часу верстати працюють без участі людини за допомогою датчиків та інтернету речей. Це дозволяє збирати дані про процеси, що відбуваються під час обробки у вигляді неструктурованої інформації та перетворювати її на структуровану, зрозумілу людині інформацію, яку можна використовувати для забезпечення надійності технологічного процесу.

Великий обсяг проведених досліджень у галузі ВіАТ дозволив виявити технологічні можливості методу. Разом з цим багато вчених розробили теоретичні та емпіричні залежності впливу технологічних параметрів процесу на знімання металу та шорсткість обробленої поверхні. Незважаючи на значний обсяг робіт, деякі питання викликають особливий інтерес. Одним із таких питань є вплив розташування поверхонь деталі на продуктивність та якість обробки. Відомі результати експериментальних досліджень, у яких встановлено відмінність обробки зовнішніх і внутрішніх поверхонь, але теоретичні дослідження цієї обставини не проводилися. Ця робота присвячена вирішенню цього питання.

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

Однією з проблем підготовки технічних фахівців у регіонах є нерівномірний розподіл країн науково-освітнього потенціалу: збільшення концентрації вузів і пов'язане з цим скупчення випускників у великих промислових містах регіону. Якщо у 1970 -ті роки існував механізм кадрової підтримки регіональної промисловості – централізоване розподіл випускників вузів, то сьогодні у зв'язку з його ліквідацією «можливість задоволення потреб регіонів у молодих фахівцях зведена практично до нуля».

Підготовка кадрів для промисловості регіонів не можна вирішувати у відриві від завдання із закріплення на місцевих підприємствах – навіть успішно підготовлені фахівці – вихідці з малих міст та регіональних населених пунктів після закінчення технічних університетів в обласному центрі втрачають зв'язок із регіональними підприємствами та прагнуть знайти роботу у великих промислових містах, загострюючи проблему кадрового забезпечення місцевої промисловості.

Крім того, останнім часом загострилася ситуація з підготовкою лінійних інженерів – фахівців, які безпосередньо вирішують оперативні виробничі завдання промислових підприємств. «Вітчизняна система технічної освіти має бути націлена на підготовку інженерів, чий навички, кваліфікація відповідають вимогам, потребам підприємств. Це не лише головні конструктори та дослідники, це і так звані лінійні інженери, на них і тримається вся професія».

Перелічені проблеми підготовки технічних фахівців для регіонів вимагають аналізу практичних заходів, що склалися, і засобів їх вирішення, а також виявлення та апробації перспективних моделей підготовки, що і поставлено метою дослідження. В основу методу дослідження покладено подання регіональної освіти як соціально-економічної системи, необхідний цілеспрямований характер якої забезпечується підсистемою управління, що

забезпечує інтеграцію та узгодження переваг її активних компонентів: потенційних абітурієнтів, адміністрації та підприємств регіонів, головного вишу та його регіональних підрозділів.

Еволюція підходів до підготовки технічних спеціалістів для регіональних промислових підприємств.

Однією із спроб наблизити професійну освіту до реального виробництва стало бурхливе зростання філій вишів (у тому числі – у малих містах) за останні 20 років. Однак багато новостворених філій не мали необхідної науково-навчальної бази підготовки випускників з вищою технічною освітою. Повінь регіонів країни такими псевдофіліями, а також проблеми фінансування вищої освіти призвели до рішення Міністерства науки та освіти України щодо ліквідації у 2013–2016 роках багатьох із них за критеріями їхньої невідповідності нормативним показникам ефективності. Але цей етап «оптимізації» вищої школи не можна визнати задовільним. Так, ряд керівників наукомістких галузей промисловості (атомна енергетика, автомобілебудування), провідних вузів країни та вищих органів представницької влади та органів місцевого самоврядування в цей період вказували, що не мають наукового обґрунтування та складені без урахування думки роботодавців критерії ефективності технічних філій вузів можуть завдати збитки для підготовки фахівців для регіонів. Єдине прохання – не занепасти це. Якщо ввести до філій ті ж вимоги, що й до головних університетів, тобто оцінювати за тими ж параметрами, то університети почнуть скидати філії», що й сталося за минулі 2014-2016 роки.

Розглянемо стан справ із підготовкою кадрів з прикладу конкретного регіону та її мономіст, зокрема, Східної України, де історично сформувався і продовжує розвиватися металообробний і машинобудівний кластер, має загальноукраїнське значення. До підприємств цього кластера відносяться: ТОВ «Краматорський машинобудівний завод», ПАТ «Турбоатом», ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ», ДНВП «Об'єднання Комунар», Харківське державне авіаційне виробниче підприємство, ДП «Харківський

машинобудівний завод «ФЕД», ТОВ «Харківський завод підйомно-транспортного устаткування», ДП «Завод ім. Малишева».

В НТУ «ХП» реалізували підготовку лінійних інженерів за найважливішими для місцевих підприємств напрямками: "Конструкторсько-технологічне забезпечення машинобудівних виробництв", "Технологія машинобудування", "Проектування технічних та технологічних комплексів". Така спрямованість підготовки обумовлена як запитами великих регіональних підприємств, а й ще одним найважливішим чинником – наявністю у цьому регіоні крім загальноосвітніх шкіл низки освітніх закладів середньої професійної освіти: автомеханічний коледж, машинобудівний коледж, автодорожний коледж, автотранспортний коледж. Їхні випускники прагнуть здобути вищу інженерну освіту в рамках освоєної в технікумі спеціальності, не залишаючи свого регіону, щорічно в кількості 70–80 осіб.

Збитки для регіональної промисловості та мономіст від ліквідації філій технічних ЗВО останні намагаються виправити розширенням заочної форми навчання. Але крім таких її недоліків, як низький рівень підготовки, зумовлений суттєвим скороченням часу аудиторної роботи, неготовність учнів до ударних «сесійних» навантажень, заочне навчання має наступний «мінус». Під час підготовки технічних фахівців, зокрема – машинобудівників, постійне практико-орієнтована взаємодія учня з викладачем у предметно-професійному середовищі у процесі вирішення конкретних виробничих завдань важливо [8], що, проте, важко забезпечити без структурного підрозділу вузу, висунутого у регіон.

Для регіональної промисловості та малих міст такими «іншими організаціями» насамперед є високотехнологічні промислові (нерідко – містоутворюючі) підприємства, зацікавлені у вирішенні своїх кадрових проблем, як в оперативній, так і в довгостроковій перспективі. Освітні програми при цьому розробляються з урахуванням особливостей виробничих завдань підприємства-партнера та затверджуються освітньою організацією за згодою з ним.

Мережева модель підготовки фахівців може бути успішно реалізована за наявності базових кафедр на великих регіональних підприємствах.

Таким чином, підготовку лінійних інженерів для регіональної промисловості на основі базових кафедр правомірно подати як функціонування цілеспрямованої соціально-економічної системи ефективність якої проявляється та зростає при інтегруванні концепції базових кафедр із принципами цільової підготовки та проектним підходом.

Цільова підготовка фахівців має велику історію та безперервно вдосконалюється, у тому числі й у НТУ «ХПІ». Останнім часом серед сучасних абітурієнтів, які збираються вступати до ЗВО, така форма навчання стала користуватися більшою популярністю, що пов'язано як з планами вітчизняної промисловості, що розвивається, гарантовано забезпечити виробництво фахівцями та їх своєчасну ротацію, так і з прагненням абітурієнта легше вступити до вузу. Так, у 2015/2016 навчальному році у українських вишах навчалися 168 тисяч студентів, які надійшли за умов цільового прийому. Ще 84 тисячі осіб надійшли на загальних підставах та уклали договори про цільове навчання пізніше.

В НТУ «ХПІ» нині навчається 1104 цільові студенти, у тому числі для організацій оборонно-промислового комплексу – 1060 студентів за 43 напрямками підготовки/спеціальностями, причому кількість таких студентів збільшується. Так, наприклад, частка студентів-цільовиків, які уклали договори з оборонними підприємствами м. Харкова за напрямом підготовки «Конструювання та технологія виробництва електронних засобів», зростає та досягла у 2018 р. 80% від тих, що надійшли на перший курс.

Однак ця потенційно ефективна організаційна модель у разі підготовки технічних фахівців для регіональної промисловості має суттєвий недолік з точки зору їх закріплення на місцевих підприємствах, оскільки випускник вишу досі практично нічим не ризикував у разі працевлаштування на іншому – «нецільовому» підприємстві, що знаходиться, як правило, у великому промисловому центрі - там, де розташовувався ЗВО, здійснювалася його

теоретична підготовка, виконувались навчальні, виробничі та переддипломна практики.

Більшого та достовірно прогнозованого результату, на наш погляд, можна досягти, наблизивши освітній процес до регіональної високотехнологічної промисловості, поєднуючи цільову підготовку з розглянутою вище мережевою організацією підготовки технічних фахівців. Такий підхід реалізовано, зокрема, в організації підготовки лінійних інженерів на замовлення Павлівського автобусного заводу за напрямом «Технологія машинобудування» на створеній на його основі спеціалізованій базовій кафедрі.

Він є основою будь-якої, зокрема освітньої, інноваційної діяльності. Відповідно до цього підходу процес підготовки технічних фахівців пропонується реалізувати у вигляді освітніх проектів – інноваційних циклів. Ініціація першого циклу є початком радикальної інновації, яка визначає фазу зародження та формування якісно нової освітньої програми (ОП), затребуваної промисловістю. Ініціація кожного наступного циклу є початком інкрементальної інновації, яка забезпечує кількісне зростання проектної освітньої діяльності на основі розширення кола замовників спеціалістів. Інновації в освіті, як і в будь-якій діяльності, мають тимчасову ефективність, тому при насиченні профільними кадрами регіональних підприємств-партнерів ЗВО має перейти на інший інноваційний цикл (відповідно до нових запитів промисловості). Така реалізація проектного підходу була апробована в освітній діяльності спеціального факультету НТУ «ХПІ» (факультет цільової підготовки та перепідготовки фахівців) та показала високу результативність.

Сказане вище стосується засобів проектного підходу як інструментарію організаційних освітніх інновацій. Іншою стороною освітніх інновацій є семантичний аспект, що визначає конкретну множину компетенцій, освоєних випускником вишу. Його доцільно реалізувати на основі подання ВП як диференційованого продукту ЗВО. Така модель ОП дозволяє цілеспрямовано забезпечити її високу якість з урахуванням формалізованого обліку запитів

ринку праці. Практичне застосування моделі ОП як диференційованого продукту викликало кратне збільшення замовлень на цільову підготовку фахівців.

Висновки до розділу 1

Виявлено обмеження застосовуваних підходів до вирішення проблем регіональної підготовки кадрів. Показано перспективні організаційні моделі підготовки технічних фахівців для місцевої промисловості - моделі, які освітні установи, що функціонують в регіонах, можуть застосовувати, розвивати і гнучко поєднувати в різних варіантах у рамках організаційно-правових умов, що склалися.

На основі апробації цих моделей доведено, що необхідною та достатньою умовою ефективності їх застосування є інтеграція цілей та ресурсів промислових підприємств, головного вузу, його базових підрозділів, установ освіти та адміністрації регіонів на засадах інноваційної соціально-економічної системи, а також адаптивне перепроєктування освітніх програм у відповідно до мінливих запитів регіонів.

Дуже корисним для технічних ЗВО, і в першу чергу для опорних університетів, що відіграють особливу роль у регіонах, представляється подальший обмін досвідом щодо реалізації підходів, які показали високу ефективність при вирішенні кадрових проблем регіональної промисловості.

2. СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Технологічне забезпечення цифрового виробництва

Цифрові технології вже давно є невід'ємною частиною життєдіяльності людства. Інтеграція цифрових технологій у машинобудівне виробництво дозволяє підвищити гнучкість виробництва, ефективність технологічної підготовки виробництва, забезпечити надійність технологічних процесів та скоротити витрати на виробництво.

Нові технологічні системи обладнані датчиками, сенсорами для збору інформації про стан та процеси, що протікають у зоні обробки. Технологічні системи, об'єднані в одну індустріальну мережу, здатні обмінюватися інформацією і за допомогою штучного інтелекту приймати рішення без участі людини. Такий підхід до виробництва вже давно прогнозується четвертою промисловою революцією, яка реалізується через концепцію Індустрія 4.0 [68,81].

Концепція «Індустрія 4.0» спочатку з'явилася Німеччині [75], де її називають «Industrie 4.0». Концепція полягає у підвищенні ефективності машинобудівних виробництв за допомогою впровадження цифрових систем. Ефективність полягає в оснащенні технологічних систем, заготовок, деталей, оснастки "цифрою", за допомогою якої можна відстежувати весь життєвий цикл виробу від проектування до утилізації. Ці системи перебувають у постійному обміні для забезпечення необхідного рівня якості виробів. Впровадження концепції «Індустрія 4.0» дозволить машинобудівним виробництвам забезпечити необхідну якість виробів, забезпечити надійність технологічних систем та процесів, підвищити гнучкість виробництва, його економічність та екологічність.

Важливою перевагою цифрового виробництва є високий рівень автоматизації та гнучкості, що дозволяє виготовляти продукцію з індивідуальними характеристиками.

Для реалізації високої гнучкості виробництва особливо на фінішних операціях розроблено методи обробки у гранульованих середовищах. Реалізується це за рахунок можливості обробляти одночасно велику кількість нежорстких деталей різних форм, розмірів та конфігурації без базування та закріплення. Високий ступінь автоматизації досягається за рахунок застосування магнітних барабанів для сепарації деталей від робочих гранул, а у випадку, якщо деталь є немагнітною автоматичних розвантажувальних пристроїв.

2.2. Сутність та технологічні можливості віброабразивної обробки деталей

Машинобудування є галуззю, що активно розвивається. Завдання забезпечення необхідного рівня якості виробів за мінімальної собівартості реалізується на фінішних операціях. Для вирішення цього завдання використовуються методи обробки вільними абразивами. З розвитком цифрових технологій автоматизація входить до найважливіших завдань машинобудування. Обробка закріпленням абразивом має як ряд переваг (висока продуктивність, точність, низька шорсткість поверхні деталі), так і недоліків (обмеження в оброблюваній формі поверхонь, високі температури, складність автоматизації). Методи обробки вільними абразивами немає цих недоліків.

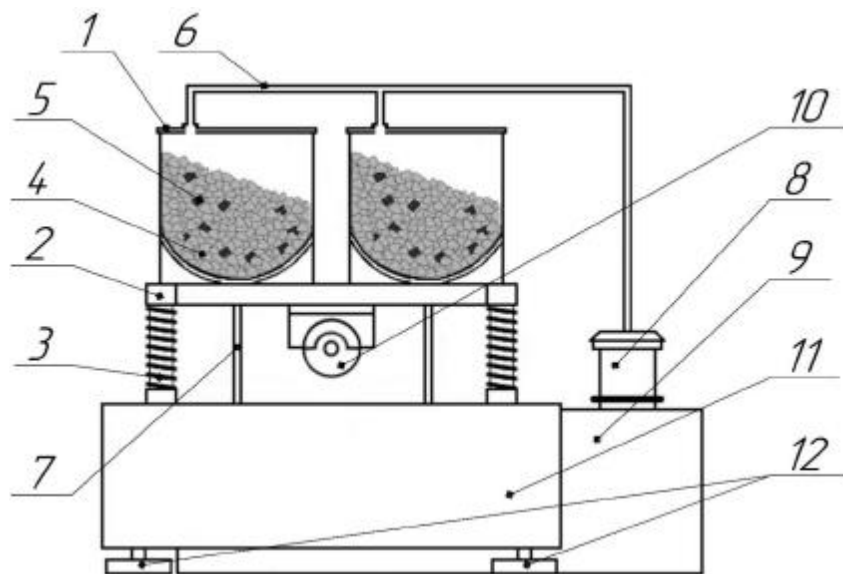
Найбільш поширеним представником цих методів є віброабразивна обробка (ViAT). Віао впроваджена на багатьох виробництвах завдяки своїм широким технологічним можливостям, низькій собівартості, а також високій продуктивності.

Віброабразивна обробка – це механічний метод обробки деталей зі зніманням металу у вигляді мікростружки. При додаванні хімічно активних добавок дозволяє віднести цей метод до комбінованих (хіміко-механічний). У процесі обробки гранули випадково суударяються з поверхнею деталі (стохастично) і в той же час займають різне положення в робочому резервуарі, що дозволяє обробляти різні поверхні рівномірно. У процесі абразивного зношування відбувається згладжування мікрогеометрії поверхні деталі

шляхом мікрорізання гранулами робочого середовища, що здійснюють коливальний рух.

Завдяки конструкції верстата в процесі обробки резервуар повідомляється вібрації, які передаються абразивним гранулам. Результатом цих вібрацій є ударна взаємодія робочих середовищ з поверхнею оброблюваної деталі.

У робочий резервуар, залежно від технологічного завдання, завантажують робочі середовища та деталі. На малюнку 1.1 представлена схема вібраційної обробки серед абразиву.



Малюнок 1.1 Схема процесу віброабразивної обробки

Робочий резервуар (1) базується та закріплюється на віброплатформі (2) та пружних елементах (3), що дозволяє здійснювати коливальні рухи у різних напрямках. Коливання робочий резервуар отримує від віброзбудника (10). ВіАТ здійснюється в низькочастотному діапазоні коливань до 50 Гц та амплітудою від 0,5 мм до 6 мм. Робочий резервуар виконаний в U-подібній формі, який повідомляє робоче середовище та оброблювані деталі циркуляційної рух. На дні резервуара обробка відбувається інтенсивніше за рахунок зусилля всієї маси завантаження.

Віброабразивна обробка супроводжується подачею технологічної рідини для видалення продуктів зносу. Різні хімічні добавки у складі ТЗ можуть проводити інтенсивність обробки, але найголовніше застосування –

запобігання корозії. Конструкція резервуара дозволяє регулювати швидкість зливу ТЗ, тим самим впливати на інтенсивність обробки. ТЖ сприяє охолодженню деталей у процесі обробки, але температура всередині резервуара не висока і не суттєво впливає на процес обробки.

Режими обробки (амплітуда, частота), зернистість та грануляція абразивного середовища, фізико-механічні властивості матеріалу деталі, обсяг заповнення резервуара є основними факторами, що впливають на продуктивність та якість обробки.

Багато дослідників відзначають, що розташування поверхні впливає на продуктивність і якість вібраційної обробки серед абразиву. Пов'язано це з тим, що доступ до гранул може бути утруднений і, відповідно, інтенсивність обробки буде відрізнятися.

1.1 Надійність технологічних процесів віброабразивної обробки

Надійність технологічної системи і здійснюваного їй технологічного процесу - це властивість забезпечувати необхідний рівень якості деталі і нестабільність, що допускається на технологічних операціях, на всіх етапах обробки. [17,18,19,20].

Технологічна система (ТЗ) - це складна динамічно замкнута система, що включає верстат, пристосування, робочі середовища, деталь [16,33,44,66].

Для забезпечення стабільності необхідного рівня якості деталей необхідно проаналізувати роботу технологічної системи ВіАТ та з'ясувати особливості, що перешкоджають забезпеченню надійності технологічного процесу у цифровому виробництві.

Рішення, які може прийняти людина під час виготовлення продукції, можуть впливати на надійність більшою мірою, так званий «людський фактор». Під «людським фактором» розуміється помилкове ухвалення рішення людиною. Що рівень автоматизації виробництва, тим нижче впливає «людський чинник» якість деталі.

На етапі технологічної підготовки виробництва (ТПП) ставиться мета – забезпечити необхідний рівень якості, нестабільність, що допускається,

високу продуктивність при найменшій собівартості. Вирішення такої задачі потребує комплексного підходу у виборі технологічних параметрів та забезпеченні їх мінімального розкиду. Як результат, надійність ТЗ слід забезпечувати як за технічними, так і за економічними показниками. [2,29].

Однією з основних чинників, які впливають на надійність технологічних процесів є технологічні параметри обробки. При ВіАТ має місце зношування обробних середовищ. Як і у випадку зі зносом різального інструменту, знос робочого середовища є джерелом систематичних змінних похибок. Існують дослідження в галузі зношування робочих середовищ при обробці вільними абразивами [40,60]. Отримані залежності дозволяють розрахувати час, через який слід замінити робочі середовища. При ВіАТ має місце розкид технологічних параметрів, що є причиною випадкової похибки. В умовах цифрового виробництва, де обладнання забезпечене датчиками, що дозволяють відстежувати технологічні параметри в режимі реального часу, розроблено систему адаптивного контролю. Штучний інтелект, проаналізувавши інформацію з датчиків, дасть сигнал та здійснить підналагодження обладнання.

Ці похибки значною мірою впливають на надійність ТЗ ТП в цифровому виробництві при обробці особливо точних виробів, так як при великому розкиді технологічних параметрів, необхідний рівень якості і нестабільність, що допускається, не будуть забезпечені.

До основних факторів, що впливають на результат технологічного процесу віброабразивної обробки, відносяться:

- ✓ фізико-механічні властивості матеріалу оброблюваної деталі;
- ✓ розташування поверхонь оброблюваних деталей;
- ✓ технічні вимоги до деталі;
- ✓ режими обробки (амплітуда, частота коливань, застосування ТЗ, обсяг завантаження)
- ✓ параметри обробного середовища (твердість, розмір гранули, зернистість, густина).

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБРОБКИ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ВІЛЬНИМИ АБРАЗИВАМИ

2.1 Дослідження процесів одиничної взаємодії

Для підвищення ефективності обробки внутрішніх поверхонь деталей при ВіАТ насамперед необхідно вивчити механізм взаємодії абразивної гранули із цими поверхнями.

Як зазначалося вище, це дуже складний процес, моделювання якого утруднено визначенням вихідних параметрів обробки. Існуючі залежності розроблені для обробки зовнішніх поверхонь і не враховують їх розташування, що не дозволяє повною мірою використовувати їх для внутрішньої поверхні. Для обліку впливу розташування поверхні необхідно розробити уточнену модель одиничної взаємодії абразивної гранули з внутрішньою поверхнею, що обробляється.

Використовуючи основні положення теорії удару жорсткої сфери по напівпростору, що пластично деформується [45] отримуємо вираз для визначення локального обсягу металу, деформованого при одиничній взаємодії:

$$dV = \frac{V_d}{l} dx;$$

Де V_d – деформований обсяг, при взаємодії гранули з оброблюваною поверхнею,

dx – шлях ковзання

$$V_d = \pi R h^2;$$

де R - радіус гранули,

l – середній діаметр плями контакту.

$$l = 2\sqrt{Rh};$$

де h – глибина застосування гранули.

$$dV = \frac{\pi \cdot R \cdot h^2}{2 \cdot \sqrt{R \cdot h}} dx;$$

$$dV = \frac{\pi}{2} \sqrt{R} h^{\frac{3}{2}} dx.$$

Проінтегрувавши шляхом ковзання гранули, отримаємо:

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{R} \cdot \int_0^{x^*} h^{\frac{3}{2}} dx.$$

Введемо безрозмірні координати:

$$\varepsilon = \frac{h}{h_{\max}};$$

$$\xi = \frac{x}{h_{\max}};$$

де ε – безрозмірне використання,

ξ - безрозмірне ковзання.

Розглянемо випадок, коли енергія руху гранули достатня для того, щоб здійснити мікрорізання. Відомо [6], що кількість металу, що видаляється по краях подряпини, залежить від пластичності матеріалу. З підвищенням пластичності зменшується кількість матеріалу, що видаляється у вигляді мікростружки, і збільшується кількість металу, що деформується, по краях подряпини. Для опису цього явища запропоновано коефіцієнт стружкоутворення.

З урахуванням вищезазначеного запишемо:

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot k_c \cdot \sqrt{R} \cdot h^{\frac{5}{2}} \cdot \int_0^{\varepsilon^*(\xi^*)} \varepsilon^{\frac{3}{2}} d\xi.$$

Взаємодія гранули з напівпростором, що деформується, описується рівнянням:

$$\begin{cases} k_m m \frac{d^2 h}{dt^2} = -P_N \\ k_m m \frac{d^2 x}{dt^2} = -P_\tau \end{cases};$$

Використовуючи відоме співвідношення з теорії ковзання [45], можна вирішити перше рівняння системи:

$$P_N = \pi R h c \sigma_s.$$

Поверхня абразивної гранули має суттєві відмінності порівняно з гладкою сферою. Виражено це як геометричної формою, а й наявністю абразивних зерен лежить на поверхні, утворюють додаткові нерівності. Було введено коефіцієнт зернистості k_R , що враховує фактичну площу контакту абразивної гранули з оброблюваною поверхнею. Після підстановки з урахуванням коефіцієнта k_R отримаємо:

$$k_m m \frac{d^2 h}{dt^2} = -\pi k_R R h c \sigma_s;$$

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = -\frac{3 k_R c \sigma_s h}{4 k_m \rho_e R^2}.$$

За результатами існуючих експериментальних досліджень відомо, що обробка внутрішніх поверхонь відрізняється від зовнішніх. Попередні результати експериментальних досліджень показали знімання з внутрішніх поверхонь вище, ніж із зовнішніх [31,46,54,56,82]. Одна з можливих причин цього явища - це зміна кута зустрічі абразивної гранули з оброблюваною поверхнею. При збільшенні кута зустрічі збільшиться обсяг металу, що видаляється при одиничній взаємодії абразивної гранули з поверхнею, що обробляється деталі. У зв'язку з цим можна припустити, що кут зустрічі абразивної гранули із внутрішньою поверхнею деталі буде близьким до 90° . Однак, якщо кут зустрічі абразивної гранули з поверхнею деталі буде дуже близький до 90° тангенціальна складова руху гранули буде занадто мала, що

приведе до відсутності знімання металу. Для знаходження інтеграла приймемо, що кут взаємодії гранули з внутрішніми поверхнями оброблюваної деталі знаходиться в діапазоні 76-82°. На підставі цього запишемо:

$$f \cdot \operatorname{tg} \beta \geq 1.$$

$$\text{Тоді інтеграл } A1 = \int_0^{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{f \cdot \operatorname{tg} \beta_\varepsilon} - 1 \right)^2}} \varepsilon^{\frac{3}{2}} \left(f + \frac{\operatorname{ctg} \beta_\varepsilon - f}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right) d\varepsilon$$

Для врахування збільшення енергії удару за рахунок приєднаної маси сусідніх гранул та її зменшення за рахунок втрати швидкості [5,51] введемо поняття ефективної швидкості зіткнення гранули з внутрішніми поверхнями деталі при ВіАТ V.

$$V_{\varepsilon\phi.\varepsilon} = k_m V_0 = k_m k_v A \omega.$$

На підставі перерахованого вище, для визначення знімання металу з зовнішніх поверхонь при одиничній взаємодії гранули.

$$q = V \cdot \rho_\partial = 15,5 k_c \frac{R^3}{k_R^{3/4}} \left(V_{\varepsilon\phi} \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_\varepsilon}{3c\sigma_s}} \right)^{\frac{5}{2}} (\operatorname{ctg} \beta - f) \cdot \rho_\partial.$$

Для визначення знімання металу з внутрішніх поверхонь при одиничній взаємодії гранули слід скористатися запропонованою залежністю:

$$q_\varepsilon = V_\varepsilon \cdot \rho_\partial = 8,9 k_c \frac{R^3}{k_R^{3/4}} \left(V_{\varepsilon\phi.\varepsilon} \sin \beta_\varepsilon \sqrt{\frac{\rho_\varepsilon}{3c\sigma_s}} \right)^{\frac{5}{2}} (0,87 \cdot \operatorname{ctg} \beta_\varepsilon - 0,47 \cdot f) \cdot \rho_\partial.$$

2.2 Розрахунок видалення металу

Час, необхідне обробки деталі визначається інтенсивністю видалення металу з її поверхні. Завдання визначення товщини шару віддаленого металу є однією з основних при проектуванні технології даного методу обробки.

Розробка методики обчислення обсягу віддаленого металу дозволяє отримати розрахункові залежності при вирішенні наступних технологічних завдань:

- видалення дефектного шару;
- видалення задирок та облоя;
- заокруглення гострих кромek;
- розрахунок часу досягнення шорсткості, що встановилася.

Як уже зазначалося раніше в процесі віброабразивної обробки мікрорізання має переважний характер і визначення віддаленого металу. Однак ця залежність не враховує впливу розташування внутрішніх поверхонь деталі. Санамян В.Г. досліджував підвищення продуктивності ВіАТ шляхом створення підвищеного тиску у масі завантаження робочого резервуара [61]. В результаті проведених досліджень введені коефіцієнти, що враховують властивість віброкиплячого середовища приймати та передавати динамічні коливання.

Враховуючи основні положення механіки гранульованих середовищ, встановлено, що основні динамічні характеристики їх руху при віброабразивній обробці значною мірою залежать від пористості гранульованого середовища, яке в свою чергу можна регулювати шляхом створення додаткового тиску в робочому резервуарі. При цьому слід враховувати, що створення додаткового тиску супроводжується двома різними тенденціями: по-перше, збільшується просторова неоднорідність динамічного стану гранульованої середовища, що призводить до збільшення зусиль зіткнень гранул, а по-друге, зменшується кількість взаємодій абразивних гранул і оброблюваних деталей за рахунок зменшення їх відносних переміщень. одиничній взаємодії, а також до збільшення кількості взаємодій гранул з одиницею площі поверхні деталі за рахунок більш щільної упаковки абразивних гранул на оброблюваній поверхні.

З вищепереліченого можна зробити припущення, що робоче середовище розташовується досить близько друг до друга у внутрішній

порожнині деталі. У зв'язку з цим обробка внутрішніх поверхонь буде інтенсивніше за рахунок більшого ефекту приєднаної маси [4], більш компактного розташування середовища [61] і передається від внутрішніх стінок оброблюваної деталі масі завантаження, що знаходиться у внутрішній порожнині додаткового імпульсу, а також більшого кута абразивної взаємодії гранули з оброблюваною поверхнею. Звідси випливає, що знімання з внутрішніх поверхонь буде вище, ніж із зовнішніх.

Необхідно також врахувати, що зі збільшенням довжини деталей інтенсивність обробки знижуватиметься, оскільки виникнуть зони «застою» в центрі внутрішньої порожнини, відповідно знімання буде зменшуватися. Оскільки створити правильну математичну модель, яка враховуватиме зони застою на фактичний знімання металу, викликає великі труднощі, доцільно ввести поправочний коефіцієнт, що враховує співвідношення розмірів (співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі).

З урахуванням перерахованого вище для визначення знімання металу з зовнішніх поверхонь слід використовувати залежності.

$$Q = P_1 P_2 \omega t q \frac{S_{\text{дем}}}{4R^2} \text{ при } S_{\text{дем}} > 4R^2;$$

$$Q' = P_1' P_2 \omega t q \text{ при } S_{\text{дем}} < 4R^2.$$

Для визначення знімання металу з внутрішніх поверхонь слід скористатися запропонованими залежностями:

$$Q_{\text{с}} = k_{\text{ср}} P_1 P_2 \omega t q_{\text{с}} \frac{S_{\text{дем}}}{4R^2}.$$

Величину коефіцієнта співвідношення розмірів $k_{\text{ср}}$ визначимо під час проведення емпіричних досліджень.

2.3 Дослідження формування шорсткості обробленої поверхні

Як показано в дослідженнях визначення параметрів шорсткості оброблюваної поверхні при обробці деталей вільними абразивами є більш трудомістким завданням, ніж розрахунок продуктивності обробки. Розв'язання цього завдання дозволить встановити і ранжувати вплив різних технологічних параметрів (режимів обробки, характеристик абразивного середовища, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу) на формування мікропрофілю поверхні, що обробляється.

Останні розробки в галузі теорії абразивної обробки деталей показують, що формування цього мікропрофілю супроводжується багаторазовим накладенням подряпин від окремих зерен, розташованих у різному напрямку та для розробки теоретичних залежностей слід використовувати теорію випадкових функцій [39,71].

Основні положення використані для отримання цієї залежності можна представити в наступному вигляді: як встановлено в багатьох роботах обробка деталей закріпленим і вільними абразивами мають багато загальних закономірностей, викликаних спільністю структури інструменту, що застосовується, особливостями формування слідів мікрорізання зернами абразиву, єдиним процесом сколювання і самозаточування вершин абразивів та впливу фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Для всіх методів абразивної обробки мікровиступи вихідної шорсткості зрізаються і формується новий мікропрофіль, який постійно відтворюється за збереження режимів обробки, а його висотні параметри не залежать від вихідної шорсткості. Таку шорсткість прийнято називати «усталеною».

Під умовною висотою мікронерівностей обробленої поверхні запропоновано розуміти відстань від середньої лінії m , проведеної між вершинами нерівностей у нормальному перерізі деталі, до рівня найглибших западин, що є на цій поверхні. При цьому, враховуючи, що краї подряпин від зерен приблизно рівномірно зміщуються вгору і вниз від лінії m , за глибину впровадження зерен у цьому поперечному перерізі прийматимемо глибину, відраховану від цієї лінії.

При обробці вільними абразивами шорсткість, що встановилася, формується багаторазового перетину і накладання подряпин, утворених окремими гранулами, зіткнення з якими відбувається в різних напрямках і мають стохастичний характер.

2.4 Визначення параметрів шорсткості, що встановилася

Як вказувалося вище в процесі обробки відбувається видалення вихідного мікропрофілю поверхні деталі шляхом багаторазової ударної взаємодії абразивних гранул. $Ra = f(t)$, так як на початку обробки відбувається інтенсивне видалення мікрогребінців, а потім відбувається зниження інтенсивності, яке мало відрізняється від нуля.

З урахуванням вище сказаного розроблено математичну модель, що дозволяє визначити величину шорсткості, що встановилася. Отримана залежність пройшла широку апробацію та адекватно відбиває формування мікропрофілю для зовнішніх поверхонь.

$$Ra_{уст} = 0,09 \sqrt{\frac{h_{\max}}{L_{ед} \cdot z_0}}.$$

Однак, як уже озвучувалося раніше, для опису обробки внутрішніх поверхонь ця залежність вимагає коригування, пов'язаного з особливостями обробки внутрішніх поверхонь, викладеними у розділі 2.1.

У роботі [61] встановлено, що при механічно стиснутому робочому середовищі процес формування мікропрофілю оброблюваної поверхні, незважаючи на відмінності фізико-технологічних властивостей із вільно завантаженим робочим середовищем, мають велику схожість. Головна їхня відмінність полягає в одиничній взаємодії, сліди якої описуються еліпсоїдом з півосями a та b . При механічно стиснутому середовищі максимальна глибина впровадження гранули вище, ніж при вільному завантаженні, що призводить до більшої величини мікропрофілю поверхні. Аналогічне явище спостерігається при обробці внутрішніх поверхонь, коли середовище розташовується більш компактно.

2.5 Розробка методики оцінювання надійності технологічного процесу віброабразивної обробки з урахуванням розташування поверхні

Велике значення для надійності роботи технологічної системи має правильне використання рекомендованих ГОСТ 27.202-83 показників точності, причому в даний час їх розрахунок можливий тільки після вимірювання заданих параметрів якості обробки на декількох партіях оброблених деталей з подальшою статистичною обробкою результатів вимірювань.

При контролі за кількісною ознакою визначають значення показників точності ТС, зазначених у розділі 1.

Враховуючи випадковий характер розсіювання технологічних режимів обробки, можна припустити, що в процесі обробки амплітуда A , частота коливань і грануляція робочих середовищ R можуть змінюватися в певних межах.

Розробивши математичні моделі з визначення основних параметрів ВіАТ, з'являється можливість прогнозування надійності проектного технологічного процесу на етапі ТПП за умов цифрового виробництва. У процесі обробки технологічні параметри мають випадкове розсіювання. Припустимо, що технологічні параметри (амплітуда коливань робочого резервуара, частота коливань робочого резервуара, грануляція абразивного середовища) можуть змінюватися в межах 5%, 10% і 15%. З урахуванням припущення з'являється можливість розрахувати найбільше та найменше значення контрольованого параметра, визначити нестабільність і відповідно до методики оцінки надійності технологічної системи технологічної операції за ГОСТ 27.202-83 розрахувати показники точності, як виступають коефіцієнт миттєвого розсіювання, коефіцієнт зміщення та коефіцієнт запасу точності. При виконанні умови коефіцієнт запасу точності більший за нуль, проєктований технологічний процес вважається надійним.

Створені теоретичні моделі розрахунку знімання металу та шорсткості поверхні при віброабразивній обробці дозволяють здійснювати аналітичне

прогнозування параметрів надійності з урахуванням передбачуваного розкиду вхідних технологічних факторів, наведених вище. Відповідно, можна розрахувати показники точності та оцінити надійність технологічного процесу ще на етапі проектування.

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Технологічне обладнання

Експериментальні дослідження проводили на вібраційному верстаті УВГ 4×10. На малюнку 3.1 представлена фотографія верстата УВГ 4×10.

Простота конструкції та експлуатації є головними перевагами верстата, а його універсальність дозволяє обробляти деталі різної складності, жорсткості та конфігурації. Цей верстат успішно працює на багатьох підприємствах.

Зразки завантажувалися у робочий резервуар без базування та закріплення. Обсяг завантаження робочого середовища та зразків становив 70% від обсягу робочого резервуара. Як технологічна рідина застосовувався розчин кальцинованої соди 0,2% для промивання від продуктів зносу та запобігання корозії. Усі експерименти проводилися з безперервною подачею ТЗ.



Малюнок 3.1 Верстат УВГ 4x10

3.2 Прилади та пристрої для експериментальних досліджень

Для оцінювання шорсткості застосовувався портативний профілометр моделі SURFTEST SJ-210 (Малюнок 3.2) Технічні характеристики представлені в Таблиці 3.1



Малюнок 3.2 – Портативний профілометр SURFTEST SJ-210

Таблиця 3.1 Технічні характеристики профілометра моделі SURFTEST SJ-210

діапазон вимірів	ось X	17,5 мм
	ось Z (датчик)	360 мкм (-200 мкм до +160 мкм)
матеріал шупа	алмаз	
швидкість виміру	0,25 мм/с; 0,5 мм/с; 0,75 мм/с	
швидкість повернення	1 мм/с	
застосовані стандарти	JIS '82 / JIS '94, JIS '01, ISO 97, ANSI, VDA	
параметри оцінки	<i>Ra; Rc; Ry; Rz; Rq; Rt; Rmax; Rp; Rv; Rz; Rsk; Rkv; R_{PC}; R_{sm}; Rz_{1max}; S; HSC; Rz_{JIS}; R_{ppi}; RA; RA_q; RLR; Rmr(c); R_{dc}; Rk; Rpk; Rvk; Mr1; Mr2; A1; A2; Vo; Rpm; tp; Htp; R; Rx; AR</i>	
базова довжина	0,08; 0,25; 0,8; 2,5 мм	
кількість базових довжин (× кіл-ть)	×1; ×2; ×3; ×4; ×5; ×6; ×7; ×8; ×9; ×10 довільна довжина (от 0,3 до 16,0 мм з кроком 0,01 мм)	
мови	понад 17	
функція друку (потрібний принтер)	умови вимірювання, результати розрахунків, оцінений профіль, відносна опорна крива	
зовнішнє введення/ виведення	USB I/F, виведення даних <i>Digimatic</i> , виведення на принтер, RS- 232C I/F, переключатель SW I/F	
зберігання даних	внутрішня пам'ять: 10 умов виміру, 1 вимірюваний профіль	
	картка пам'яті (додатково): більше 500 умов вимірювання, більше 10000 вимірюваних профілів, 500 зображень з дисплея	
калібровка	автоматичне калібрування з введенням числового значення міри шорсткості; доступне калібрування за середнім значенням декількох вимірювань (макс. 5 разів)	
живлення	час зарядки близько 4 годин	
	термін служби близько 1000 вимірів	
розміри (Ш × Г × В)	дисплей 52,1 × 65,8 × 160 мм	
	привід 115 × 23 × 26 мм	
маса	прибл. 500 г	

Оцінювання шорсткості здійснювалося кількісним методом.

Знімання металу визначалося на аналітичних вагах моделі АТ 200 з точністю вимірювання 0,2 мг (Малюнок 3.3).



Малюнок 3.3 – Аналітичні ваги АТ 200

3.3 Зразки для досліджень

Вибір матеріалів ґрунтувався на можливості широкого застосування одержаних результатів у машинобудівному виробництві та перевірки універсальності теоретичної моделі. Використовувалися зразки типу "втулка" різних розмірів. На малюнку 3.4 представлені зразки для проведення експериментальних досліджень.

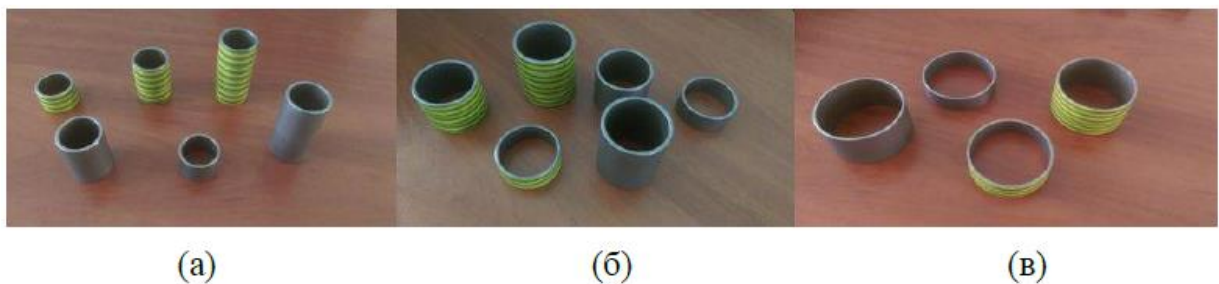


Рисунок 3.4 – Зразки для експерименту

- зовнішній діаметр $\varnothing 30$ мм, внутрішній діаметр $\varnothing 25$ мм, довжина 20, 40, 60 мм (Малюнок 3.4а);

- зовнішній діаметр $\varnothing 50$ мм, внутрішній діаметр $\varnothing 45$ мм, довжина 20, 40, 60 мм (Малюнок 3.4б);
- зовнішній діаметр $\varnothing 70$ мм, внутрішній діаметр $\varnothing 65$ мм, довжина 20, 40 мм (Малюнок 3.4в);

Матеріал Сталь 30ХГСА та алюмінієвий сплав Д16Т.

Під час проведення дослідження процесу ВіАТ використовувалися такі робочі середовища:

бій абразивних кіл на керамічному зв'язуванні, зернистість 16, грануляція $R \sim 0,0057\text{м}$ (Малюнок 3.5);



Малюнок 3.5 Бій абразивних кіл, зернистість 16

тригранні призми ПТ10, грануляція $R = 0,0057\text{м}$ на керамічному зв'язуванні, зернистість 12 (F100), (Малюнок 3.6);



Малюнок 3.6 ПТ10, зернистість 12

тригранні призми ПТ10, грануляція $R = 0,0057\text{м}$ на керамічному зв'язуванні, зернистість 8 (F150), (Малюнок 3.7);



Малюнок 3.7 ПТ10, зернистість 8

тригранні призми ПТ8, грануляція $R = 0,0046\text{м}$ на керамічному зв'язуванні, зернистість 8 (F150), (Малюнок 3.8);



Малюнок 3.8 ПТ8, зернистість 8

тригранні призми ПТ6, грануляція $R = 0,0035\text{м}$ на керамічному зв'язуванні, зернистість 8 (F150), (Малюнок 3.9);



Малюнок 3.9 ПТ6, зернистість 8

Перед проведенням експерименту всі робочі середовища були попередньо об-галтовані протягом 30 хвилин. Обсяг завантаження робочим середовищем становив – 7 дм³.

Для обробки отриманих експериментальних результатів застосовувалися методи статистики [7,9,14,15], оскільки при обмеженій кількості результатів експериментальних досліджень завжди існує елемент випадковості. Для оцінки математичного очікування випадкової величини, використовувалося середнє арифметичне отриманих значень. Після цього визначалися дисперсія та середньоквадратичне відхилення випадкової величини, будувалися довірчі інтервали з довірчою ймовірністю 95%.

Визначається середнє, дисперсія та середньоквадратичне відхилення:
Вибіркове середнє:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

Дисперсія:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

Середньоквадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{S^2}$$

Дослідження шорсткості поверхні проводилося при обробці зразків типу «втулка» із сталі 30ХГСА та алюмінієвого сплаву Д16Т з різною вихідною шорсткістю.

шорсткість зовнішньої поверхні вище, ніж шорсткість внутрішньої поверхні;

шорсткість внутрішньої поверхні вище, ніж шорсткість зовнішньої поверхні;

шорсткість зовнішньої поверхні дорівнює шорсткості внутрішньої поверхні.

Через кожні 30 хвилин зразки виймалися, промивалися і сушилися. Проводилося 5 вимірів шорсткості зовнішньої та 5 вимірів шорсткості внутрішньої поверхні зразків. Потім обробка тривала до досягнення шорсткості, що встановилася.

Для визначення знімання металу з внутрішніх поверхонь на зовнішню поверхню у деяких зразків була нанесена ізоленда (Малюнок 3.4). Через кожні 30 хвилин зразки витягувалися, видаляли ізолятор, промивали, сушилися і зважувалися. Після цього нова ізоленда наносилася на зовнішню поверхню і обробка тривала. Різниця в зніманні металу у не ізольованих та ізольованих зразків дозволила визначити знімання із зовнішніх поверхонь і провести порівняння результатів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІАТ ДЕТАЛЕЙ, ЩО МАЮТЬ РІЗНО РОЗМІЩЕНІ ПОВЕРХНІ

В результаті вивчення робіт у галузі ВіАО та теоретичних досліджень, для підтвердження адекватності отриманих моделей у розділі 2, була проведена серія експериментальних досліджень щодо визначення впливу технологічних режимів, грануляції та зернистості робочого середовища, матеріалу та розташування оброблюваних поверхонь деталі на величину середнього арифметичного відхилення профілю шорсткості та знімання металу внутрішніх поверхонь.

4.1 Визначення коефіцієнта ефективної швидкості зіткнення абразивної гранули з внутрішніми поверхнями

Для використання теоретичної моделі процесу обробки внутрішніх поверхонь при Віао необхідно визначити величину коефіцієнта ефективної швидкості. При розрахунках використовувалися такі значення технологічних параметрів: $A = 2,5 \text{ мм}$, $n = 30 \text{ Гц}$, $\rho = 3900 \text{ кг/м}^3$.

У ході проведення експериментальних досліджень отримано значення знімання металу з внутрішніх поверхонь. Отримані розрахункові значення та усереднені значення за результатами п'яти експериментів зведено до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Маса знятого металу з внутрішніх поверхонь деталей, г

Технологічні параметри	Розрахункові значення		Експериментальні результати	
	Сталь 30ХГСА	Д16Т	Сталь 30ХГСА	Д16Т
Зернистість 8, Частота 30 Гц, Грануляція 0,0057 м	0,00000141	0,00000092	0,0068	0,0044
Зернистість 8, Частота 35 Гц, Грануляція 0,0057 м	0,00000260	0,00000139	0,0124	0,0068
Зернистість 8, Частота 30 Гц, Грануляція 0,0046 м	0,00000129	0,00000081	0,0064	0,0040
Зернистість 8, Частота 30 Гц, Грануляція 0,0035 м	0,00000124	0,00000069	0,0062	0,0036
Зернистість 12, Частота 30 Гц, Грануляція 0,0057 м	0,00000201	0,00000109	0,0096	0,0054
Зернистість 16, Частота 30 Гц, Грануляція 0,0057 м	0,00000239	0,00000141	0,0120	0,0068

Користуючись набутими значеннями, розрахуємо величину раніше введеного коефіцієнта ефективної швидкості для ВіАТ внутрішніх поверхонь

$$k_{эф.в} = \left(\frac{Q_{в\,експ}}{Q_{в\,теор}} \right)^{2/5}$$

Результати розрахунку коефіцієнта ефективної швидкості для ВіАТ внутрішніх поверхонь зведено до таблиці 4.2

Таблиця 4.2

Розрахункові значення коефіцієнта ефективної швидкості обробки внутрішніх поверхонь деталі

Технологічні параметри	Сталь 30ХГСА	Д16Т
зернистість 8, частота 30 Гц, грануляція 0,0057 м	29,7	29,6
зернистість 8, частота 35 Гц, грануляція 0,0057 м	29,6	29,9
зернистість 8, частота 30 Гц, грануляція 0,0046 м	30,1	30,1
зернистість 8, частота 30 Гц, грануляція 0,0035 м	30,2	30,6
зернистість 12, частота 30 Гц, грануляція 0,0057 м	29,6	30
зернистість 16, частота 30 Гц, грануляція 0,0057 м	30,2	29,7

Варто відзначити, що зміна матеріалу оброблюваної деталі, частоти коливань робочого резервуара, грануляції та зернистості робочого середовища не призвело до зміни величини коефіцієнта ефективної швидкості внутрішніх поверхонь.

4.2 Дослідження знімання металу з внутрішніх поверхонь деталі

Для перевірки адекватності теоретичної моделі процесу знімання металу при ВіАТ проведено серію експериментальних досліджень з різною зернистістю робочого середовища. Оброблялися зразки, представлені в розділі 3 різного розміру поперечного перерізу. Довжина зразків $L = 20$ мм для виключення впливу довжини поверхні, що обробляється на циркуляцію робочого середовища.

Результати теоретичних розрахунків зведені у таблиці 4.3-4.6

Таблиця 4.3 Розрахункові значення знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $R = 0,0057$ м, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Сталь 30ХГСА		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
Бой абразивних кругів ~10, зернистість 16	0,0068	0,0122	0,0175
ПТ10, зернистість 12	0,0054	0,0097	0,0139
ПТ10, зернистість 8	0,0039	0,0070	0,0100

Таблиця 4.4 Розрахункові значення знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $R = 0,0057$ м, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Алюмінієвий сплав Д16Т		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
Бой абразивних кругів ~10, зернистість 16	0,0039	0,0070	0,0101
ПТ10, зернистість 12	0,0031	0,0056	0,0080
ПТ10, зернистість 8	0,0023	0,0041	0,0059

Таблиця 4.5 Розрахункові значення знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 35$ Гц, $R = 0,0057$ м, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Сталь 30ХГСА		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
Бой абразивних кругів ~10, зернистість 16	0,0118	0,0212	0,0305
ПТ10, зернистість 12	0,0094	0,0168	0,0242
ПТ10, зернистість 8	0,0068	0,0122	0,0175

Таблиця 4.6 Розрахункові значення знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 35$ Гц, $R = 0,0057$ м, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Алюминиевый сплав Д16Т		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
Бой абразивних кругів ~10, зернистість 16	0,0066	0,0117	0,0168
ПТ10, зернистість 12	0,0053	0,0094	0,0135
ПТ10, зернистість 8	0,0040	0,0071	0,0102

Усереднені експериментальні результати знімання металу з внутрішніх поверхонь від зернистості робочого середовища зведені в таблиці 4.7-4.10.

Таблиця 4.7 Експериментальні результати знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $R = 0,0057$ м, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Сталь 30ХГСА		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
Бой абразивних кругів ~10, зернистість 16	0,0070	0,0120	0,0170
ПТ10, зернистість 12	0,0056	0,0098	0,0136
ПТ10, зернистість 8	0,0038	0,0068	0,0098

Таблиця 4.8 Експериментальні результати знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $R = 0,0057$ м, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Алюминиевый сплав Д16Т		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
Бой абразивних кругів ~10, зернистість 16	0,0040	0,0068	0,0098
ПТ10, зернистість 12	0,0032	0,0054	0,0078
ПТ10, зернистість 8	0,0024	0,0044	0,0062

Таблиця 4.9 Експериментальні результати знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 35$ Гц, $R = 0,0057$ м, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Сталь 30ХГСА		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
Бой абразивних кругів ~10, зернистість 16	0,0120	0,0216	0,0310
ПТ10, зернистість 12	0,0096	0,0170	0,0246
ПТ10, зернистість 8	0,0066	0,0124	0,0174

Таблиця 4.10 Експериментальні результати знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 35$ Гц, $R = 0,0057$ м, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Алюминіевий сплав Д16Т		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
Бой абразивних кругів ~10, зернистість 16	0,0068	0,0120	0,0164
ПТ10, зернистість 12	0,0052	0,0090	0,0130
ПТ10, зернистість 8	0,0042	0,0068	0,0098

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень побудовано залежність питомого знімання металу від співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі для різної зернистості робочого середовища та частоти коливань робочого резервуара (Малюнок 4.1-4.4) Суцільною лінією показано результати теоретичних розрахунків довірна ймовірність 95%) показано результати експериментальних досліджень.

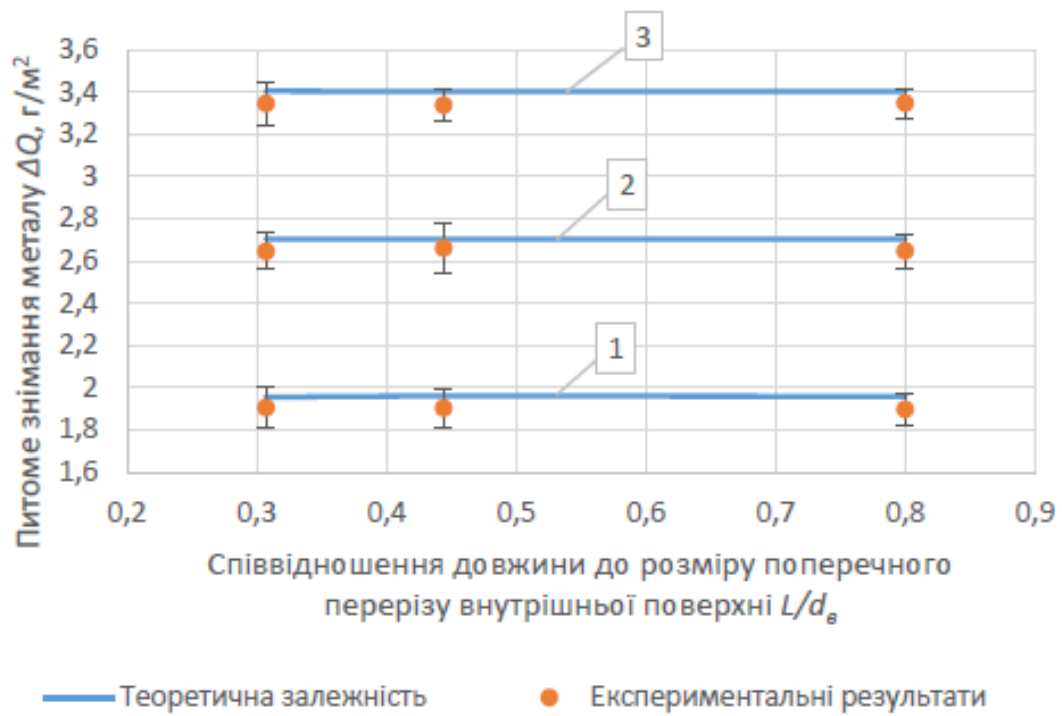


Рисунок 4.1 Залежність питомого знімання металу від співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі.

Частота 30 Гц. Грануляція 0,0057м. Матеріал Сталь 30ХГСА. 1 – зернистість 8, 2 – зернистість 12, 3 – зернистість 16.

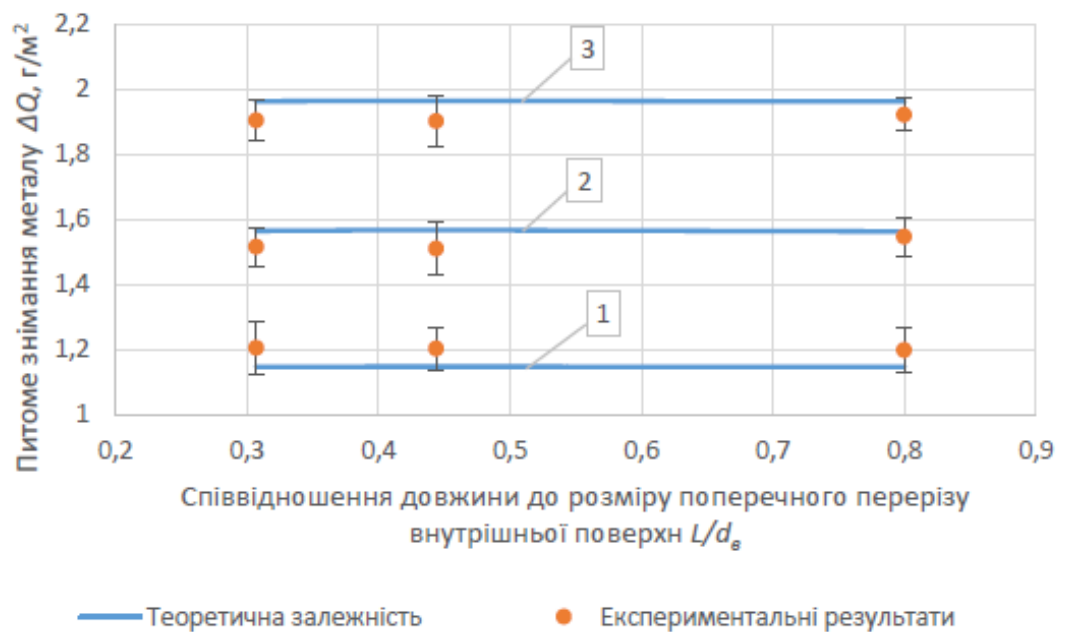


Рисунок 4.2 Залежність питомого знімання металу від співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі.
Амплітуда 2,5 мм. Частота 30 Гц. Грануляція 0,0057м. Матеріал: алюмінієвий сплав Д16Т. 1 – зернистість 8, 2 – зернистість 12, 3 – зернистість 16.

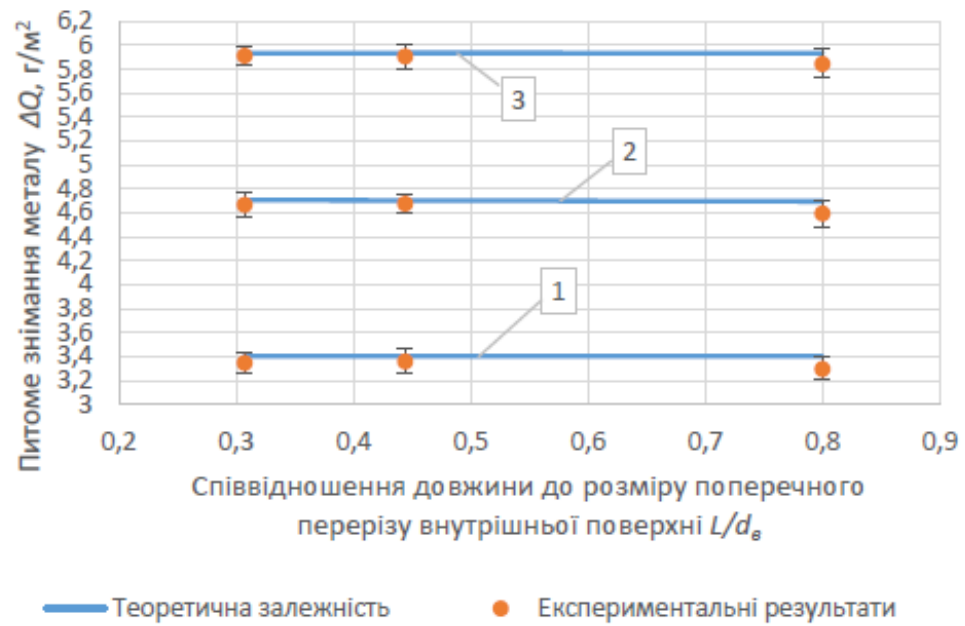


Рисунок 4.3 Залежність питомого знімання металу від співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі. Амплітуда 2,5 мм. Частота 35 Гц. Грануляція 0,0057м. Матеріал Сталь 30ХГСА. 1 – зернистість 8, 2 – зернистість 12, 3 – зернистість 16.

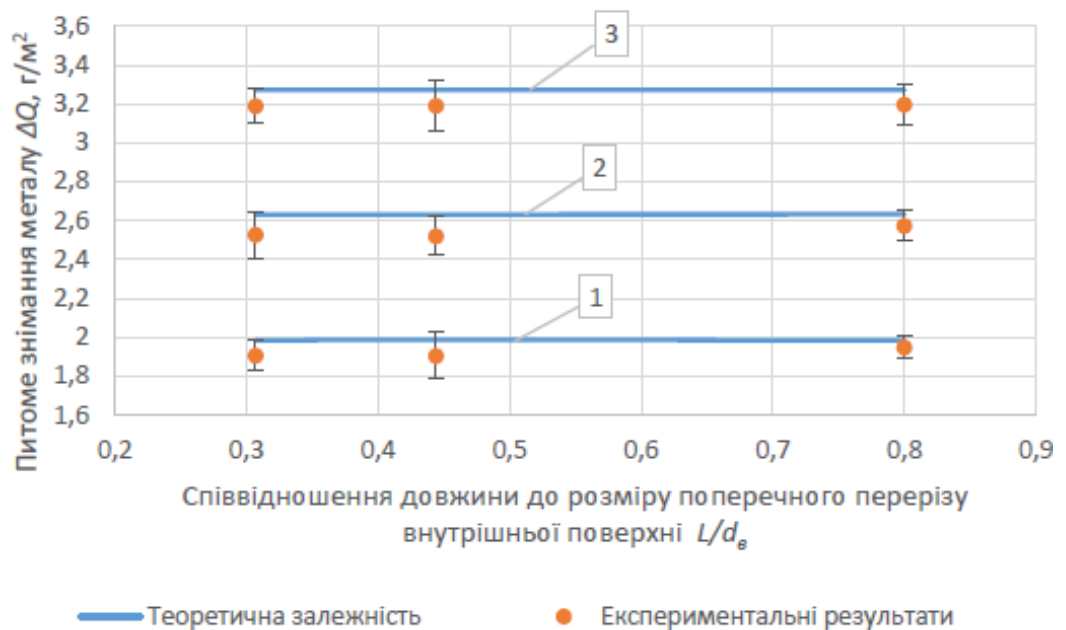


Рисунок 4.4 Залежність питомого знімання металу від співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі. Амплітуда 2,5 мм. Частота 35 Гц. Грануляція 0,0057 м. Матеріал: алюмінієвий сплав Д16Т. 1 – зернистість 8, 2 – зернистість 12, 3 – зернистість

У наступній серії експериментів перевірялася адекватність теоретичної моделі знімання металу за зміни грануляції робочого середовища.

Результати теоретичних розрахунків зведені до таблиць 4.11-4.12

Таблиця 4.11 Розрахункові значення знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $N_z = 8$, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Сталь 30ХГСА		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
ПТ10 ($R = 0,0057$ м)	0,0039	0,0070	0,0100
ПТ8 ($R = 0,0046$ м)	0,0037	0,0066	0,0094
ПТ6 ($R = 0,0035$ м)	0,0035	0,0062	0,0089

Таблиця 4.12 Розрахункові значення знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $N_z = 8$, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Алюминіевий сплав Д16Т		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
ПТ10 ($R = 0,0057$ м)	0,0023	0,0041	0,0059
ПТ8 ($R = 0,0046$ м)	0,0021	0,0038	0,0055
ПТ6 ($R = 0,0035$ м)	0,0019	0,0034	0,0050

Усереднені експериментальні результати знімання металу з внутрішніх поверхонь від грануляції робочого середовища зведені в таблиці 4.13-4.14

Таблиця 4.13 Експериментальні результати знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $N_z = 8$, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Сталь 30ХГСА		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
ПТ10 ($R = 0,0057$ м)	0,0038	0,0068	0,0098
ПТ8 ($R = 0,0046$ м)	0,0036	0,0064	0,0092
ПТ6 ($R = 0,0035$ м)	0,0034	0,0062	0,0088

Таблиця 4.14 Експериментальні результати знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $N_z = 8$, $L = 20$ мм)

Робоче середовище	Алюмінієвий сплав Д16Т		
	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
ПТ10 ($R = 0,0057$ м)	0,0024	0,0044	0,0062
ПТ8 ($R = 0,0046$ м)	0,0022	0,0040	0,0058
ПТ6 ($R = 0,0035$ м)	0,0020	0,0036	0,0052

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень побудовано залежність питомого знімання металу від співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі для різної грануляції робочого середовища (Малюнок 4.5-4.6). Суцільною лінією показано результати теоретичних розрахунків. Точками з довірчими інтервалами (довірча ймовірність 95%) показано результати експериментальних досліджень.

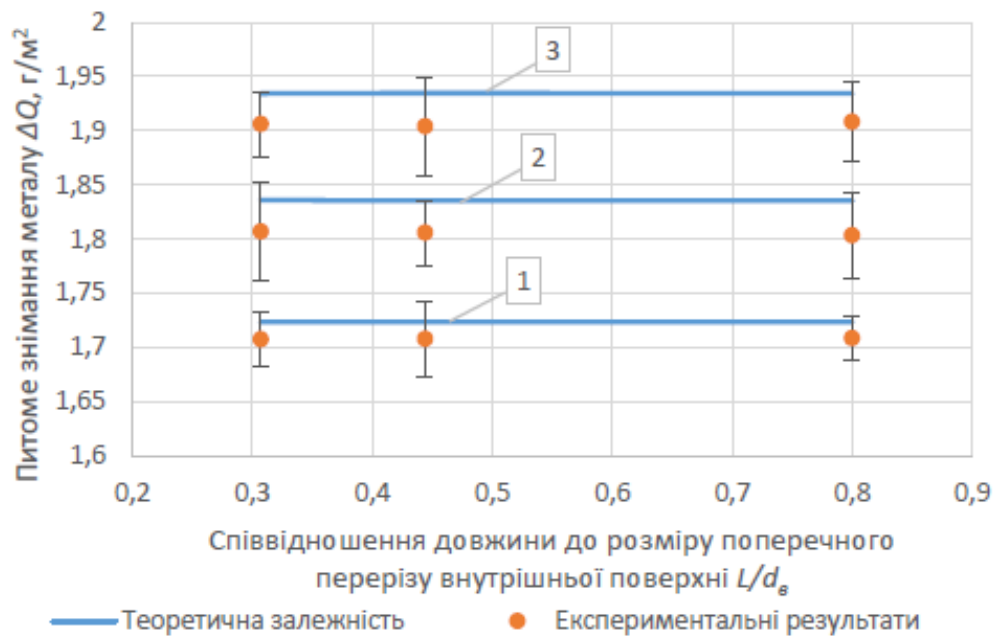


Рисунок 4.5 Залежність питомого знімання металу від співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі. Амплітуда 2,5 мм. Частота 30 Гц. Зернистість 8. Матеріал Сталь 30ХГСА. 1 – грануляція 0,0035 м, 2 – грануляція 0,0046 м, 3 – грануляція 0,0057 м.

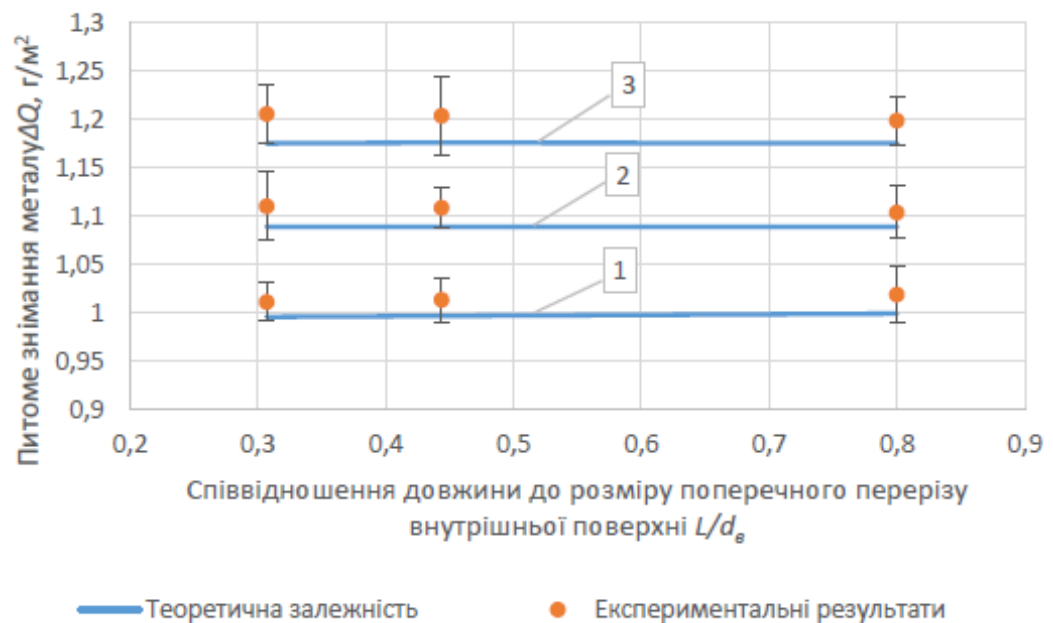


Рисунок 4.6 Залежність питомого знімання металу від співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу внутрішньої поверхні деталі. Амплітуда 2,5 мм. Частота 30 Гц. Зернистість 8. Матеріал: алюмінієвий сплав Д16Т. 1 – грануляція 0,0035 м, 2 – грануляція 0,0046 м, 3 – грануляція 0,0057 м.

За результатами експериментальних досліджень побудовано діаграми питомого знімання металу з усієї площі (суцільний колір), питомого знімання металу із зовнішніх поверхонь (решітка) та питомого знімання металу з внутрішніх поверхонь (точки) від зернистості робочого середовища та співвідношення довжини до розміру попереченого перерізу внутрішньої поверхні деталі (квадратні мітки зі стрілочкою) (Малюнок 4.7-4.8).

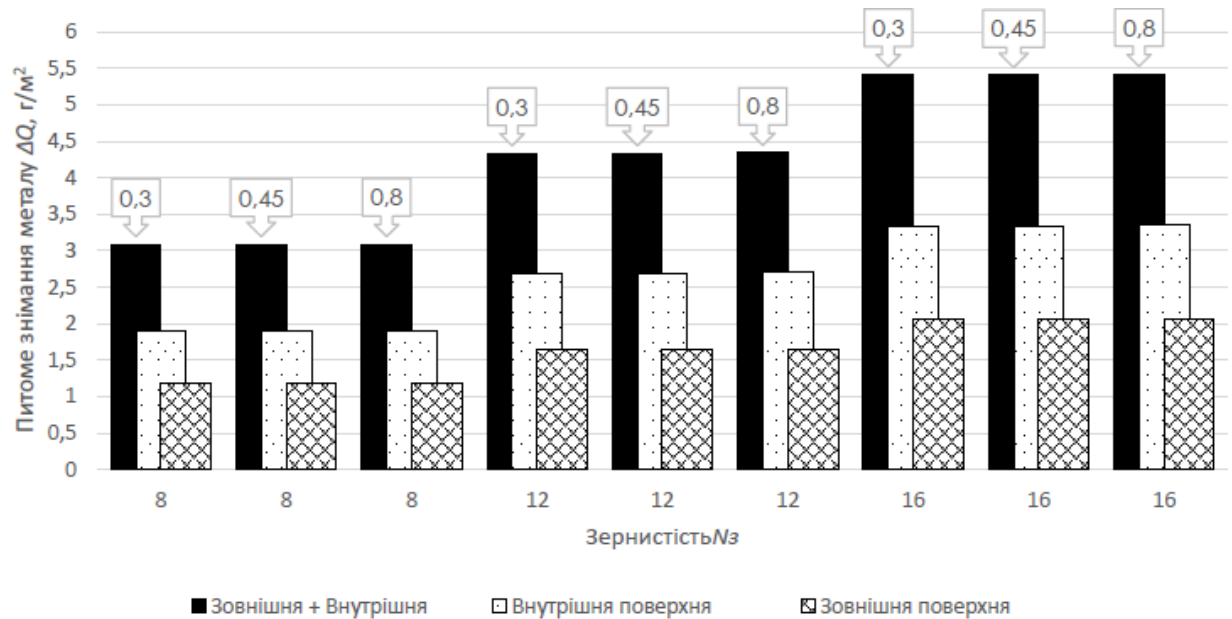
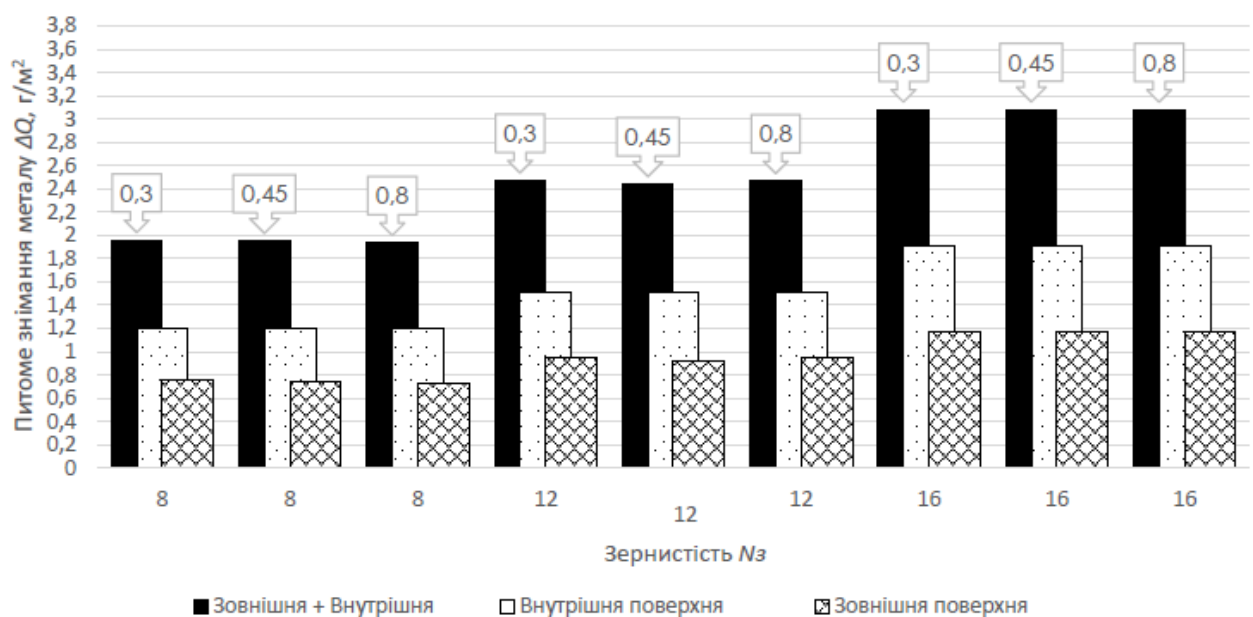


Рисунок 4.7 Діаграма питомого знімання металу від зернистості робочого середовища та співвідношення довжини до розміру попереченого перерізу. Амплітуда 2,5 мм. Частота 30 Гц. Матеріал Сталь 30ХГСА. Довжина зразків 20 мм.



Малюнок 4.8 Діаграма питомого знімання металу від зернистості робочого середовища та співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу 2,5 мм.

Усереднені експериментальні результати знімання металу з внутрішніх та зовнішніх поверхонь від грануляції робочого середовища зведені в таблиці 4.15-4.16

Таблиця 4.15 Експериментальні результати знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $N_z = 8$, $L = 20$ мм)

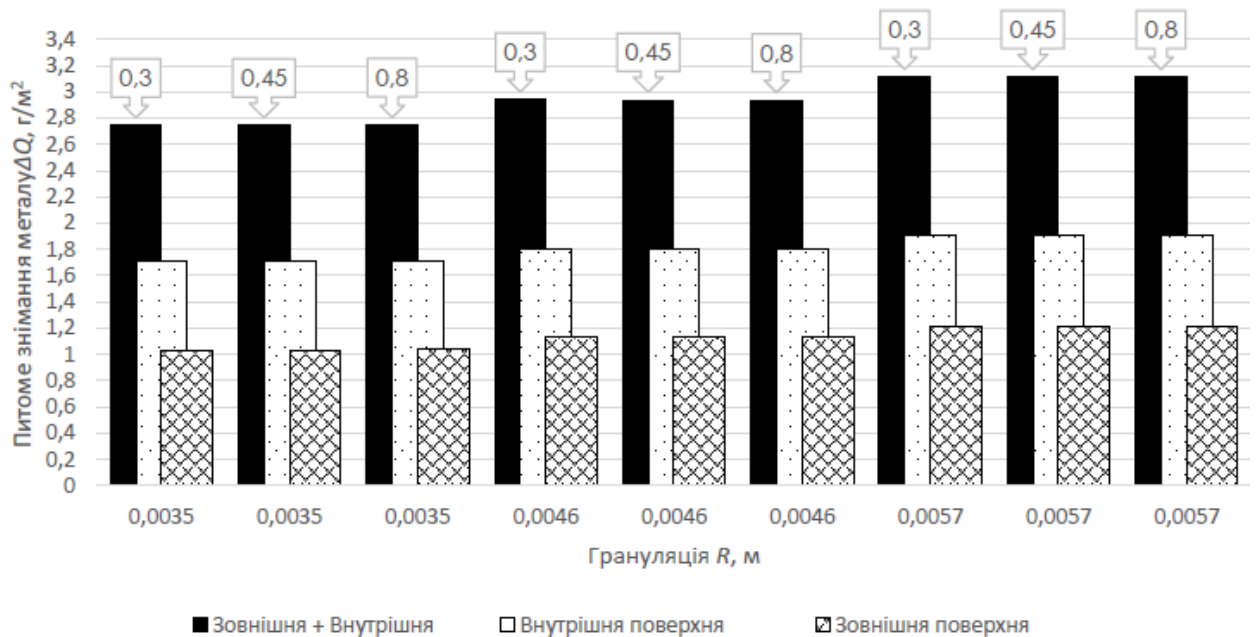
Робоче середовище	Сталь 30ХГСА					
	Зовнішня поверхня Розмір перерізу			Внутрішня поверхня Розмір перерізу		
	Ø30 мм	Ø50 мм	Ø70 мм	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
ПТ10 ($R = 0,0057$ м)	0,0026	0,0046	0,0064	0,0038	0,0068	0,0098
ПТ8 ($R = 0,0046$ м)	0,0024	0,0044	0,0062	0,0036	0,0064	0,0092
ПТ6 ($R = 0,0035$ м)	0,0022	0,0042	0,0058	0,0034	0,0062	0,0088

Таблиця 4.16 Експериментальні результати знімання металу внутрішньої поверхні зразка за 30 хв ($A = 2,5$ мм, $\omega = 30$ Гц, $N_z = 8$, $L = 20$ мм)

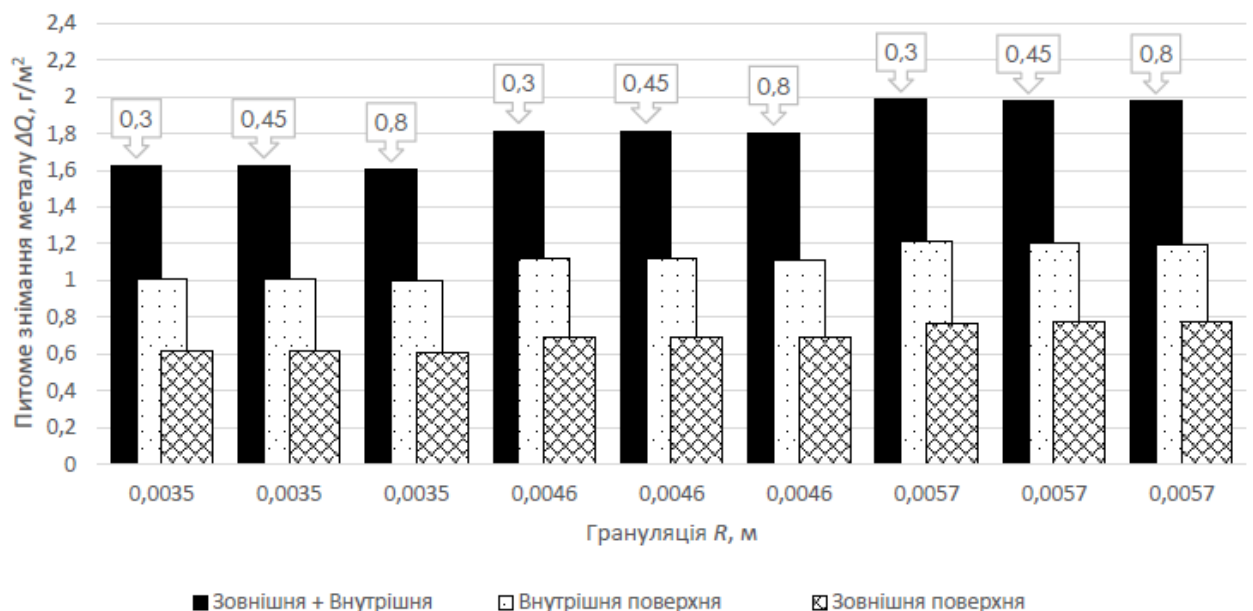
Робоче середовище	Алюмінієвий сплав Д16Т					
	Зовнішня поверхня Розмір перерізу			Внутрішня поверхня Розмір перерізу		
	Ø30 мм	Ø50 мм	Ø70 мм	Ø25 мм	Ø45 мм	Ø65 мм
ПТ10 ($R = 0,0057$ м)	0,0018	0,0030	0,0042	0,0024	0,0044	0,0062
ПТ8 ($R = 0,0046$ м)	0,0016	0,0026	0,0038	0,0022	0,0040	0,0058
ПТ6 ($R = 0,0035$ м)	0,0014	0,0024	0,0034	0,0020	0,0036	0,0052

За результатами експериментальних досліджень побудовані діаграми питомого знімання металу з усієї площі (суцільний колір), питомого знімання металу із зовнішніх поверхонь (решітка) та питомого знімання металу з

внутрішніх поверхонь (точки) від грануляції робочого середовища та співвідношення довжини до розміру попереченого перерізу внутрішньої поверхні деталі (квадратні мітки зі стрілочкою) (Малюнок 4.9-4.10).



Малюнок 4.9 Діаграма питомого знімання від грануляції робочого середовища і співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу 2,5 мм.



Малюнок 4.10 Діаграма питомого знімання металу від грануляції робочого середовища та співвідношення довжини до розміру поперечного перерізу. Амплітуда 2,5 мм. Частота 30 Гц. Зернистість 8. Матеріал: алюмінієвий сплав Д16Т. Довжина зразків 20 мм.

4.3 Дослідження товщини шару, що знімається з оброблюваної поверхні

Для забезпечення точності деталі, заданої конструктором, необхідно, щоб розмір, отриманий після ВіАТ, знаходився в полі допуску. У зв'язку з цим необхідно до здійснення вібраційної обробки серед вільного абразиву знати різницю між дійсним розміром і граничним розміром. Причому має значення наскільки дійсний розмір наближений до найбільшого граничного розміру (якщо поверхня деталі охоплює) або до найменшого (у випадку, якщо поверхня деталі охоплюється).

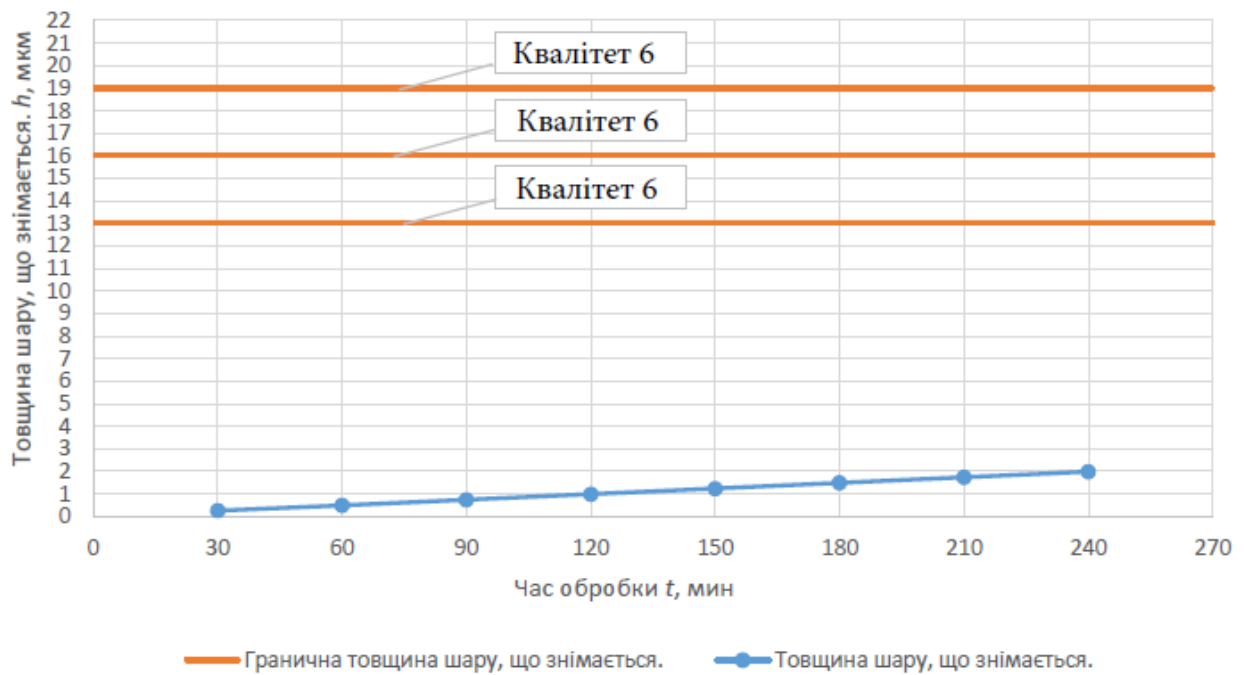
У зв'язку з цим необхідний вхідний контроль заготовок, які будуть піддаватися вібраційній обробці. .

Скориставшись таблицею допусків та посадок, складемо таблицю необхідної точності розмірів

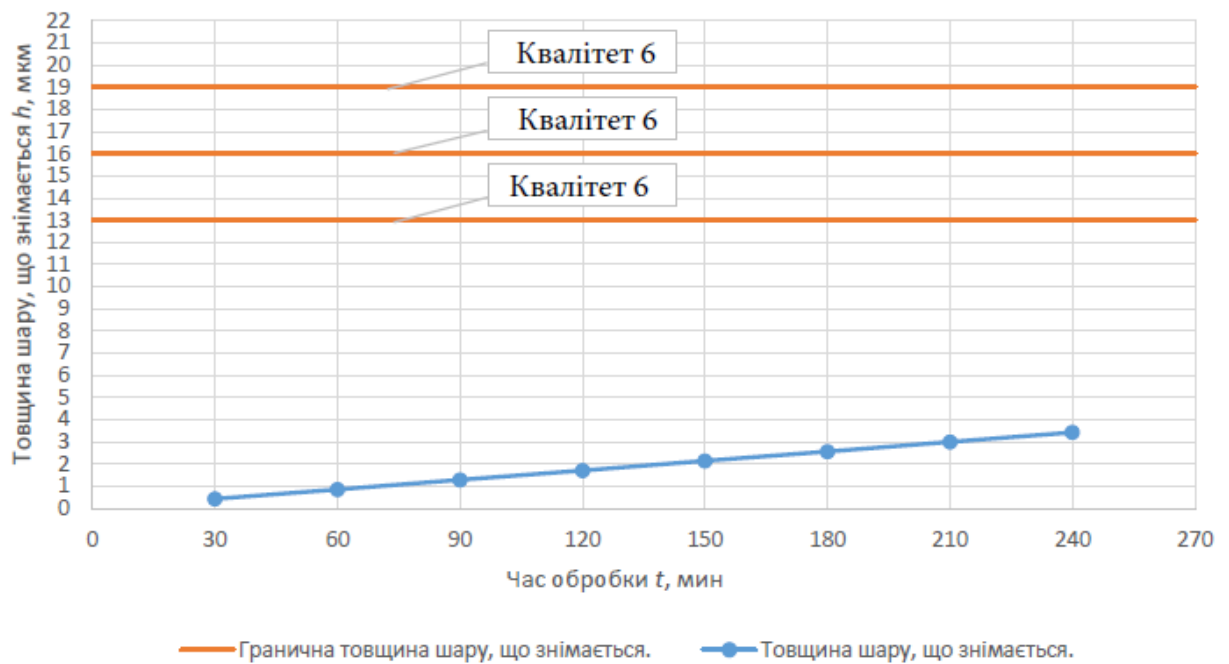
Таблиця 4.17 Необхідна точність розмірів, мм

Квалітет	Розмір поперечного перерізу		
	Ø25	Ø45	Ø65
6	+0.013	+0.016	+0.019
7	+0.021	+0.025	+0.030
8	+0.033	+0.039	+0.046
9	+0.052	+0.062	+0.074
10	+0.084	+0.100	+0.120
11	+0.130	+0.160	+0.190
12	+0.210	+0.250	+0.300

За результатами експериментальних досліджень побудована залежність товщини шару, що знімається від часу обробки (Малюнок 4.11-4.12).



Малюнок 4.11 Залежність товщини знімається від часу обробки.



Малюнок 4.12 Залежність товщини знімається від часу обробки.

Використовуючи отримані залежності для розрахунку знімання металу, технолог може розрахувати та призначити припуск на ВіАТ різних поверхонь деталі.

5 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІАТ ДЕТАЛЕЙ, ЩО МАЮТЬ РІЗНО РОЗМІЩЕНІ ПОВЕРХНІ

5.1 Рекомендації щодо проектування технологічного процесу ВіАТ

Перед проектуванням та оптимізацією технологічного процесу віброабразивної обробки різних поверхонь необхідно проаналізувати вплив технологічних факторів на вихідні показники.

Перший аналізований фактор - ефективна швидкість зіткнення абразивної гранули з оброблюваною поверхнею. Цей фактор має найбільший вплив на вихідні параметри. Збільшення ефективної швидкості зіткнення призводить до збільшення максимальної глибини впровадження абразивної гранули в оброблювану поверхню і збільшує обсяг металу, що видаляється за одиницю взаємодія. В результаті продуктивність обробки зростає, проте якість обробленої поверхні, яка виражена шорсткістю знижується. Звідси випливає, що ефективна швидкість одна із головних чинників, підлягають оптимізації. Для віброабразивної обробки ефективна швидкість визначається амплітудою та частотою коливання робочого резервуара.

Наступним фактором є параметри робочого середовища. Розглянемо детальніше вплив робочого середовища т.к. до збільшення продуктивності, водночас відбувається збільшення максимальної глибини впровадження абразивної гранули в оброблювану поверхню, тим самим збільшується шорсткість. якості поверхні. У більшості випадків розмір гранул визначається розміром оброблюваного. отвори для запобігання заклинювання За результатами дослідження було визначено, що розмір гранули не впливає на співвідношення знімання з внутрішньої і зовнішньої поверхонь, але впливає на вихідні параметри обробки. необхідності має сенс включити її вплив на алгоритм Оптимізації. Значення щільності може бути визначено за довідковою літературою або каталогом заводу-виробника в залежності від марки абразиву.] при віброабразивній обробці гранули мають властивість самозаточування, тому зниження інтенсивності зносу робочого середовища застосовують абразив високої твердості.

Не менш важливим фактором є фізико-механічні властивості металу, що обробляється. Отримані математичні моделі враховують межу плинності матеріалу та інші фізико-механічні властивості, виражені коефіцієнтом несучої здатності контактної поверхні. Розмір цього коефіцієнта може змінюватися від 1 до 6, а деяких випадках для зміцнених виробів може досягати 10.

Вибір робочого середовища ґрунтується на технологічному завданні. При виконанні грубих операцій, де необхідний великий знімання металу, слід застосовувати абразив високої зернистості та грануляції, наприклад, при видаленні грубих задирок або чорновому шліфуванні. Рекомендується застосовувати зернистість 25 і твердістю СТ-Т на керамічній зв'язці.

При очищенні заготовок від формувальної суміші широке застосування отримали металеві робочі середовища (литі зірочки, рубаний дріт і т.п.) з додаванням крупнозернистих абразивних гранул.

При видаленні облої застосовується бій абразивних кіл зернистістю 40 [4].

Для очищення заготовок і деталей від окалини застосовують абразиви різної зернистості, виходячи з металу, що обробляється.

При чистовому шліфуванні широко застосовують абразивні середовища зернистості менше 12. Вибір зернистості абразивного середовища залежить від багатьох факторів, наприклад, необхідна шорсткість, фізико-механічні властивості деталі. При виборі зернистості слід звернути увагу на першу чергу на якість поверхні, а потім на продуктивність процесу.

Під час обробки твердих металів швидше зношуються зерна абразиву. Так як гранули мають властивість самозагострення, то рекомендується застосовувати м'які абразиви. Під час обробки м'яких матеріалів рекомендується застосовувати тверді абразиви. Виняток становить мідь, алюміній, свинець, нержавіюча та жароміцна сталі, для яких слід застосовувати м'який абразив.

5.2 Оцінювання надійності проектованого технологічного процесу BiAT

Забезпечення надійності технологічних процесів у цифровому виробництві є найважливішим завданням. Індустрія 4.0 має на увазі під собою «безлюдне виробництво», при якому більшість дій з виготовлення продукції виконують роботи, а не люди. За такого виробництва людський чинник, який відіграє важливу роль, прагне нулю. Але на жаль, окрім людського фактора існують ще низка факторів, що впливає на надійність технологічного процесу. У цій роботі розглянуто вплив розкиду основних технологічних параметрів на надійність технологічного процесу, при якому спостерігався перехід від надійного до ненадійного технологічного процесу при розкиді технологічних параметрів 15%. Сучасне обладнання цифрового виробництва оснащене датчиками інтернету речей, яке спрямоване на збір інформації про поточні процеси в технологічній системі. Ці дані збираються у спеціальній базі даних званої «Big Data» та аналізуються. При виявлених відхиленнях у технологічних параметрах штучний інтелект дасть команду здійснення підналагодження технологічних режимів. Як приклад Mazak розробив систему на основі штучного інтелекту, яка надає можливість на верстатах, оснащених ЧПУ оцінити стан шпинделя. Оператори можуть у будь-який час провести тест та оцінити працездатність верстата та провести діагностику несправностей за допомогою ЧПУ. Така аналітика допомагає виявляти передаварійний стан до того, як відбудеться збій.

У свою чергу, необхідно визначити момент, коли розкид технологічних параметрів призведе до переходу від надійного технологічного процесу до ненадійного залежно від допуску на контрольований параметр.

Технолог відповідно до ГОСТ 27.202-83 здійснює контроль за кількісною ознакою. Визначає значення основних показників точності, представленої в розділі 1: коефіцієнт миттєвого розсіювання, коефіцієнт зміщення та коефіцієнт запасу точності. Якщо коефіцієнт запасу точності більший за нуль, то проектований технологічний процес є надійним.

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБКА МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК ДО ПРОВЕДЕННЯ СЕМІНАРУ НА ТЕМУ «ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ»

6.1. Постановка оперативних цілей семінару

Цілі семінару зазначені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Цілі семінару на тему: «Підвищення ефективності технологічних
процесів віброабразивної обробки деталей»

Дидактична мета семінару	Рівен ь цілі	Умови досягнення цілі	Результат у вигляді дій, які здобувачі освіти повинні продемонструвати в результаті виконання семінару, та їх характеристика	Розвиваюча мета проведення семінару
1	2	3	4	5
Сформува ти вміння у здобувачів освіти визначати та аналізувати особливості та закономірн остей процесу шаржуванн я при шліфуванні металів абразивним и	IV рівен ь	Сформовані знання про процесу шаржування при шліфуванні.	Сформоване вміння у здобувачів освіти визначати та аналізувати особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.	Розвивати алгоритмічну культуру здобувачів освіти як здатність діяти за заданим алгоритмом а також вміння самостійно конструювати нові алгоритми на основі аналізу й узагальнення послідовності виконуваних операцій і дій,

Продовження табл. 6.1

1	2	3	4	5
інструмент ами.				що ведуть до шуканого результату. Розвиток комунікативни х та творчих здібностей.

Визначивши загальну мету проведення семінарського заняття, переходимо до вибору типу та форми проведення семінару.

6.2. Вибір типу семінару і форми його проведення

Вибір типу семінару та форми його проведення наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Вибір типу семінару та форми його проведення

Тема семінару	Дисципліна, з якої проводиться семінар	Тип семінару та обґрунтування його обрання	Форма проведення семінару та обґрунтування її обрання
1	2	3	4
Підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей.	Технологія автоматизованого виробництва.	Тип: Реферативний семінар. Такі семінари проводяться для поширення і систематизації уявлень здобувачів освіти з окремих питань навчального курсу,	Форма проведення: групова.

		поповнення словарного запасу	
--	--	---------------------------------	--

Продовження табл. 6.2

1	2	3	4
		науковими термінами і закріплення їх, також розвиток комунікативних здібностей здобувачів освіти.	

6.3. Визначення переліку питань для обговорення та джерел інформації при підготовці до семінару

Визначивши мету та обравши тип семінарського заняття, переходимо до визначення питань для обговорення теми.

Перелік питань, які необхідно розглянути на семінарі наведено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

Питання для обговорення

Питання для обговорення	Джерела інформації
1. Зовнішнє, внутрішнє шліфування поверхонь.	1. Бобров В.Ф. Основи теорії різання металів.
2. Характеристика абразивного інструменту.	2. Васін С.А., Верещака О.С., Кушнер В.С. Різання металів:
3. Особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.	Термодинамічний підхід до системи взаємозв'язків при різанні. 3. Грановський Г.І., Грановський В.Г. Різання металів. 4. Крагельський І.В. Тертя та знос. 5. Кожевніков Д.В, Кірсанов С.В. Різання металів. 6. Лоладзе Т.М. Знос ріжучого інструменту 7. Лоладзе Т.М. Міцність та зносостійкість ріжучого інструменту

	8. Макаров А.Д. Оптимізація процесів різання.
--	---

6.4. Проектування мотиваційних технологій навчання здобувачів освіти на семінарі

Для проведення даного семінару визначаємо тип, вид та методи мотивації, які наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

Обрання методів мотивації навчальної діяльності

Вид і методи мотивації	Вступна мотивація	Підтримуюча (поточна) мотивація
1	2	3
Зовнішня мотивація	Ті хто будуть активно приймати участь в обговоренні доповідей отримають додаткові бали на занятті, та певний досвід в рамках даної теми. Тож розпочнімо!	Будь ласка, не відволікайтеся, бо можете пропустити важливі моменти нашого заняття та не отримаєте позитивних оцінок за результатами заняття, і, що найбільш важливо – не отримаєте необхідних для ефективної професійної діяльності вміння.
Внутрішня мотивація	Сьогодні ми з вами розглянемо дуже важливу тему та визначимо, які існують особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами. Процес різання досить складна та затребувана операція в машинобудуванні,	Отже, продовжуємо працювати та заслухаємо ще кілька доповідей. Не забувайте, що сьогодні за роботу на семінарі всі отримають бали, але їх кількість буде залежати від того, к ви працюєте.

	тому постійно потребує удосконалення.	Тож не відволікайтесь і продовжуємо!
--	---------------------------------------	--------------------------------------

6.5. Аналіз базових умов навчання

В таблиці 6.5 визначено опорний матеріал за темою.

Таблиця 6.5

Аналіз базового матеріалу і способи актуалізації базових знань

Перелік базових понять, законів, способів дій	Назва дисциплін і тем, в яких формуються опорні знання і дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації базових знань і способів дій
1	2	3	4
Підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей.	«Технологія автоматизованого виробництва»	Усне фронтальне опитування, за допомогою питань: 1. Шабрування це слюсарна операція А. Яка полягає в зіскоблюванні дуже тонких шарів металу з поверхні заготовки за допомогою ріжучого інструменту - притирання; Б. Яка полягає в зіскоблюванні дуже тонких шарів металу з поверхні заготовки за допомогою ріжучого інструменту - шабера; В. Яка полягає в зіскоблюванні дуже тонких шарів металу з поверхні заготовки за допомогою ріжучого інструменту – надфіля;	Стисле нагадування основних положень базового матеріалу

Продовження табл. 6.5

1	2	3	4
		Г. Яка полягає в зіскоблюванні дуже тонких шарів металу з поверхні заготовки за допомогою ріжучого інструменту - рашпіля. 2. Назвіть види конструкції шаберов за конструкцією. А. Клепані та зварні; Б. Штифтові та клинові; В. Суцільні та вставними пластинками; Г. Шпонкові та шплінтовані. 3. Який шар металу можна зняти за один прохід шабером А. 0.005-0.07 мм; Б. 0.5-.07 мм; В. 5-7 мм; Г. 0.1-0.2 мм. 4. З якої сталі виготовляють шабера А. У7,У8; Б. У10,У12А; В. Р6М5; Г. 9НС. 5. Кут загострення плоского шабера для сталі А. 90-100 Б. 75-90 В. 35-40 Г. 60-70	

6.6. Проектування основної частини реферативного семінару

В таблиці 6.6. наведено мету та тривалість кожної доповіді.

Таблиця 6.6

Характеристика доповідей на семінарі

№ доповіді	Тема доповіді	Мета доповіді	Тривалість доповіді	Тривалість обговорення доповіді
1	2	3	4	5
1	Зовнішнє, внутрішнє шліфування поверхонь.	Ознайомити слухачів з призначенням шліфування; визначенням процесу стружкоутворення при шліфуванні.	4-8хв.	3-5 хв.
2	Характеристика абразивного інструменту.	Розповісти про характеристику абразивного інструменту; зв'язку зерен; твердість абразивного інструменту; структуру абразивного інструменту; маркування абразивного інструменту; форму абразивного інструменту.	4-8хв.	3-5 хв.
3	Особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.	Визначити та охарактеризувати особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.	4-8хв.	3-5 хв.

Необхідно зазначити перелік джерел інформації для доповідей, який знаходиться в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7

Джерела інформації для підготовки доповідей

Теми доповідей	Джерела інформації
1	2
Зовнішнє, внутрішнє шліфування поверхонь.	1. Петраков Ю.В., Чамата С.М. Підвищення жорсткості технологічної обробляючої системи при шліфуванні оправок станів холодної прокатки труб // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – ЖДТУ, Вип12, 2012. – С.118-127. 2. Петраков Ю.В., Чамата С.М. Проектування управляючих програм для шліфування оправок станів холодної прокатки труб на верстаті з ЧПК // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2013, № 69. – С.51-56. 3. Петраков Ю.В., Субін А.А. Математична модель шліфування внутрішньої гвинтової канавки пари кочення // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 1999, № 37. – С.63-68. 4. Петраков Ю.В., Субін А.А. Управління циклом врізного шліфування // Вісник НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського": серія "Машинобудування". – 2001, № 40. – С.240-244.
Характеристика абразивного інструменту.	
Особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.	

Необхідно розробити змістовну характеристику кожної доповіді і методику її проведення, яка знаходиться в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8

Змістовна характеристика доповідей

Тема доповіді	Частини доповіді	Основні питання доповіді	Метод викладу змісту	Методи забезпечення наочності	Прийоми активізації слухачів
1	2	3	4	5	6
Доповідь №1.Тема «Зовнішнє, внутрішнє шліфування поверхонь».	Вступна частина.	1. Призначення шліфування.	Монологічний метод.	Демонстрація ілюстрацій.	Розповідь.
	Основна частина.	2. Визначення процесу стружкоутворення при шліфуванні.			
	Заключна частина.				
Доповідь №2.Тема: «Характеристика абразивного інструменту».	Вступна частина.	1. Характеристика абразивного інструменту. 2. Зв'язки зерен. 3. Твердість абразивного інструменту. 4. Структура абразивного інструменту. 5. Маркування абразивного інструменту. 6. Форма абразивного інструменту.	Монологічний метод.	Демонстрація ілюстрацій.	Розповідь.
	Основна частина.				
	Заключна частина.	Висновки щодо впливу на ефективність процесу різання ресурс інструменту.			

Продовження табл. 6.8

1	2	3	4	5	6
Доповідь №3. Тема: «Особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами».	Вступна частина.	Інформація про особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.	Монологічний метод.	Демонстрація ілюстрацій.	Розповідь.
	Основна частина.				
	Заключна частина.	Пропозиції щодо удосконалення закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.			

Кожен виступ та частку участі у семінарі здобувачам освіти необхідно оцінити. Це можливо зробити за допомогою критеріїв оцінювання здобувачів освіти, які наведені в таблиці 6.9.

Таблиця 6.9

Оцінка участі здобувачів освіти в семінарі та доповідей

Критерії оцінки участі в семінарі	Кількість балів	Критерії оцінки доповіді	Кількість балів
Виступ з докладом	4	Повнота висвітлення теми доповіді	2
Опанування	2	Логічність викладу	2
Виступ в обговоренні доповіді	2	Наочність викладу	4
Культура мови	2	Володіння аудиторією	2

Всього за семінарське заняття можна отримати максимум 20 балів.

Сценарій проведення реферативного семінару на тему: «Підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей» наведено в таблиці 6.10.

Сценарій проведення реферативного семінару

Етап проведення семінару	Дії викладача	Дії здобувачів освіти
1	2	3
Організація початку заняття	Доброго дня, передайте мені будь-ласка журнал, та розпочнемо заняття.	Здобувачі освіти готуються до заняття, слухають уважно викладача
Повідомлення теми, цілі увідна мотивація навчальної діяльності	Тема нашого сьогоднішнього заняття: «Підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей». Мета заняття: сформувані умінь у здобувачів освіти визначати та аналізувати особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами. Мотивує здобувачів освіти на активну роботу на занятті та зацікавленість у матеріалі, що обговорюється.	Здобувачі освіти записують тему заняття, сприймають мету заняття, усвідомлюють важливість і актуальність теми.
Аналіз сформованості та актуалізація опорних знань	Проведення усного фронтального опитування, за допомогою питань: 1. Шабрування це слюсарна операція А. Яка полягає в зіскоблюванні дуже тонких шарів металу з поверхні заготовки за допомогою ріжучого інструменту - притирання; Б. Яка полягає в зіскоблюванні дуже тонких шарів металу з поверхні заготовки за допомогою ріжучого інструменту - шабера; В. Яка полягає в зіскоблюванні дуже тонких шарів металу з поверхні заготовки за допомогою ріжучого інструменту – надфіля; Г. Яка полягає в зіскоблюванні дуже тонких шарів металу з поверхні заготовки за допомогою ріжучого інструменту - рашпіля.	Здобувачі освіти слухають викладача, відповідають на питання. Слухають коротке нагадування

1	2	3
	2. Назвіть види конструкції шаберов за конструкцією. А. Клепані та зварні; Б. Штифтові та клинові; В. Суцільні та вставними пластинками; Г. Шпонкові та шплінтовані. 3. Який шар металу можна зняти за один прохід шабером А. 0.005-0.07 мм; Б. 0.5-.07 мм; В. 5-7 мм; Г. 0.1-0.2 мм. 4. З якої сталі виготовляють шабера А. У7,У8; Б. У10,У12А; В. Р6М5; Г. 9НС. Коротке нагадування основних моментів базового матеріалу	
Повідомлення про тематику докладів і організацію опанування та обговорення.	На сьогоднішньому занятті, ми з вами заслухаємо доповіді стосовно особливостей та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами. Після кожного виступу буде можливість обговорити основні положення докладу та прийти до певних висновків. Прослухавши ваші доповіді, ми повинні визначити особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами. Ті, хто будуть активно приймати участь в обговоренні доповідей, отримають додаткові бали на занятті та певний досвід в рамках даної теми.	Здобувачі освіти слухають викладача. Здобувачі освіти з докладами готуються до виступу.

1	2	3
	Також під час виступу всі інші повинні конспектувати основні положення за темою.	
Заслуховування та обговорення доповідей.	Заслуховування доповідей здобувачів освіти на обрані теми. Після кожної доповіді у здобувачів освіти є 3-5 хв. для того, щоб обговорити виступ, задати питання, які виникали під час доповіді. Обговорення особливостей та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.	Слухають уважно доповідачів, конспектують основні положення. Обговорюють доповідь та задають питання. Висловлюють свої думки щодо особливостей та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами.
Оцінка доповідей та участі здобувачів освіти в їх обговоренні.	Ми прослухали всі доповіді, які були на сьогодні підготовлені. Всі дуже гарно підготувалися та виступили та отримають добрі оцінки, здобувачі освіти які приймали участь в обговоренні також отримають додаткові бали.	Слухають уважно викладача
Підведення підсумків семінару.	На сьогоднішньому занятті ми з вами добре попрацювали, дізнались про Особливості та закономірностей процесу шаржування при шліфуванні металів абразивними інструментами	Слухають викладача

Висновки до розділу 6

В четвертому розділі магістерської кваліфікаційної роботи було розроблено методичні вказівки до проведення семінару на тему «Підвищення ефективності технологічних процесів віброабразивної обробки деталей». Були

сформульовані оперативні цілі семінару, обраний тип та форма проведення семінару, визначений перелік питань для обговорення, сформульована мотивація для зацікавленості здобувачів освіти у вивченні теми, проаналізовані базові умови навчання з теми, обрані та проаналізовані джерела інформації для підготовки до семінару, описані критерії оцінювання доповідей здобувачів освіти на семінарі та розроблений сценарій проведення семінарського заняття з теми.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблено комплекс теоретичних моделей обробки деталей вільними абразивами, що дозволяє автоматизувати технологічну підготовку цифрового виробництва та забезпечити ефективність та надійність технологічних процесів.

Розроблено уточнену модель одиничної взаємодії гранули з різними поверхнями деталі.

Розроблено методику проектування та оцінювання надійності технологічного процесу обробки вільними абразивами різно розташованих поверхонь деталі.

Розроблено методику оптимізації технологічних процесів обробки деталей, що мають різно розташовані поверхні, вільними абразивами з урахуванням їхньої надійності для цифрового виробництва.