

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний

(повне найменування факультету)

Технологія машинобудування

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

другий (магістерський)

(ступінь вищої освіти)

на тему «Підвищення якості поверхонь деталей, отриманих 3D друком, за допомогою полірування щітковими полімерно-абразивними інструментами»

Виконав: студент(ка) II курсу, групи Мз-112м

Спеціальності 131 Прикладна механіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології машинобудування

СТЕПАНОВА А.І.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник

ГОНЧАР Н.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

ШИРОКОБОКОВ В.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Машинобудівний
 Кафедра «Технологія машинобудування»
 Ступінь вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Технології машинобудування
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри Сергій ДЯДЯ
 « » 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

СТЕПАНОВА Анастасія Іванівна

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Підвищення якості поверхонь деталей, отриманих 3D-друком, за допомогою полірування щітковими полімерно-абразивними інструментами»

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доц. ГОНЧАР Наталя Вікторівна

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» 11 2023 року №436

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 20.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) проєктне завдання, зразки, отримані 3D-друком

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Забезпечення якості поверхні деталей, отриманих 3D-друком. 2. Методика проведення експериментів. 3. Формування параметрів якості обробки полімерно-абразивними щітками. 4. Розрахунок на міцність 5. Оцінка економічної ефективності заходів. 6. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація докладу – 17 слайдів

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	ГОНЧАР Н.В., к.т.н., доц.		
5	ПУХАЛЬСЬКА Г.В., к.т.н., доц.		
6	ШМИРКО В.І., к.т.н., доц.		
нормоконтроль	ДЯДЯ С.І., к.т.н., доц.		

7. Дата видачі завдання 04 вересня 2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Забезпечення якості поверхні деталей, отриманих 3d-друком	18.09.2023	
2	Методика проведення експериментів	09.10.2023	
3	Формування параметрів якості обробки полімерно-абразивними щітками.	23.10.2023	
4	Розрахунок на міцність	06.11.2023	
5	Оцінка економічної ефективності заходів	15.11.2023	
6	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	27.11.2023	
7	Оформлення пояснювальної записки	06.11.2023	
8	Нормоконтроль	04.12.2023	
9	Рецензія	07.12.2023	
10	Захист дипломного проєкту	21.12.2023	

Студент(ка)

_____ Анастасія СТЕПАНОВА
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Наталя ГОНЧАР
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 91 с., 13 табл., 57 рис., 51 джерело.

АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО, ГАЗОТУРБІННИЙ ДВИГУН, ЗРАЗОК, ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНА ЩІТКА, ФІНІШНА ОБРОБКА, ЯКІСТЬ, 3D-ДРУК

Об'єктом дослідження є постдрукова фінішна обробка деталей, виготовлених з використанням адитивних технологій, щітковими полімерно-абразивними інструментами.

Предметом дослідження були технологічні параметри, показники якості фінішної обробки поверхонь деталей з різних матеріалів інструментом обертальної дії на основі полімерно-абразивних волокон.

Метою роботи є підвищення якості обробки поверхонь і крайок різних деталей авіаційно-ракетної техніки, виготовлених з використанням адитивних технологій, а також видалення задирок, притуплення гострих кромek і отримання радіусів округлення.

Методи дослідження включали: методи інженерної механіки, експериментальний, науко-дослідний.

У роботі представлено можливості адитивного виробництва і представлено напрям розширення сфери застосування адитивних технологій за рахунок постдрукової обробки. Досліджено процес фінішної обробки зразків (зняття гострих кромek та отримання радіусів заокруглення), виготовлених 3D-друком з жароміцних матеріалів, полімерно-абразивним щітковим інструментом. Отримано режими обробки та надані технологічні рекомендації.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ 3D-ДРУКОМ.....	10
1.1 Особливості застосування 3D-друкованих металевих деталей	10
1.2 Загальні відомості про адитивні технології	13
1.2.1 Процеси та області використання адитивних технологій.....	15
1.3 Аналіз найпоширеніших методів постдрукової обробки деталей ..	18
1.3.1 Дробоструменева обробка.....	18
1.3.2 Ультразвукова обробка.....	22
1.4 Видалення задирок та притуплення гострих кромок.....	25
1.4.1 Ручні слюсарні операції.....	27
1.4.1.1 Обробка шліфувальними шкірками.....	27
1.4.1.2 Обробка напилками.....	29
1.4.1.3 Обробка надфілями.....	30
1.4.1.4 Обробка шаберами.....	30
1.4.2 Механізовані слюсарні операції.....	33
1.4.2.1 Полімерно-абразивні щітки.....	38
1.4.2.2 Конструктивні особливості полімерно-абразивних щіток.....	39
1.4.2.3 Параметри і режими полімерно-абразивних щіток...	41
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....	43
2.1 Зразки для експериментальних досліджень.....	43
2.2 Методика дослідження шорсткості.....	44
2.3 Методика визначення якості скруглення гострих кромок після видалення задирок.....	45
2.4 Устаткування для обробки полімерно-абразивними щітками	47

3	ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНИМИ ЩІТКАМИ.....	49
3.1	Дослідження шорсткості оброблюваної поверхні залежно від режимів обробки.....	49
3.2	Оцінка якості видалення задирок і заокруглення гострих кромek...	53
4	РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ.....	59
4.1	Вихідні дані.....	59
4.2	Розрахунок на міцність.....	60
4.3	Результати розрахунків.....	61
5	ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ.....	69
6	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	75
6.1	Заходи по забезпеченню пожежної безпеки.....	75
6.2	Розрахунок загального рівномірного штучного освітлення в лабораторії.....	77
7	ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	83
	ВИСНОВКИ.....	84
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	85

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AB	Адитивне виробництво
АЦП	Аналогово-цифровий перетворювач
ВВК	Вогнегасник вуглекислотний
ВТК	Відділ технічного контролю
ГТД	Газотурбінний двигун
ЄСВ	Єдиний соціальний податок
ЗОТС	Змащуюче-охолоджуюче технологічне середовище
ІЧ	Індикатор часовий
МСЕ	Метод скінченних елементів
ПА	Полімерно-абразивний
ПАЩ	Полімерно-абразивні щітки
ПК	Персональний комп'ютер
УЗО	Ультразвукова обробка
ЧПУ	Числове програмне управління
AF	Additive fabrication
DMD	Direct metal deposition
SLS	Selective laser sintering
SLM	Selective laser melting

ВСТУП

Розвиток промислового комплексу України нерозривно пов'язаний з наукомісткими технологіями, спрямованими на підвищення якості виготовленої продукції. На сьогодні підприємства авіаційної галузі України виробляють літаки і гвинтокрили для застосування в різних сферах діяльності, у тому числі і для збройних сил України, Національної гвардії, спеціальних підрозділів міністерства внутрішніх справ тощо. Тому зниження собівартості виробництва двигунів, підвищення якості та можливість їх оперативного ремонту сприяють підвищенню обороноздатності країни та забезпечують її національну безпеку.

Одними з найбільш інноваційних та перспективних технологій на цей час у машинобудуванні є адитивні технології. Завдяки відомим особливостям виготовлення деталей з металевих порошків методами пошарового спікання чи оплавлення та методами прямого вирощування на сьогодні ці технології знаходять все ширше використання в різних галузях машинобудування. Зокрема, спеціалістами Siemens було проведено дослідження властивостей лопаток газових турбін, отриманих 3D-друком. Однак, незважаючи на велику увагу, яку дослідники та промисловці останнім часом приділяють адитивним технологіям, вони майже не використовуються для деталей машин, які працюють в умовах змінних навантажень.

Аналіз особливостей структури деталей, отриманих з порошкових матеріалів з використанням адитивних технологій у комплексі з добре відомими технологічними методами підвищення несучої здатності деталей машин методами оздоблювально-зміцнювальної обробки, свідчить про ефективність їх використання також для «надрукованих» металевих деталей. Але вкрай обмежені на сьогодні наукові наробки в цій галузі, особливо враховуючи різноманітність матеріалів, методів обробки та умов експлуатації деталей, значно ускладнюють вибір методів та призначення режимів обробки в умовах виробництва. На підставі цього можна зробити висновок, що

розробка та дослідження методів якості оброблення поверхонь деталей газотурбінних двигунів, виготовлених з використанням адитивних технологій, є актуальною задачею для розвитку промислового комплексу України.

Добре відомо, що підвищення якості оброблення поверхонь, в тому числі за рахунок поверхневого деформаційного зміцнення, що формує в поверхневому шарі стискувальні залишкові напруження та наклеп матеріалу, сприяє суттєвому підвищенню границі витривалості. Але на сьогодні така пост-печатна обробка для деталей, отриманих шляхом 3D-друку, майже не використовується. Це призводить до того, що деталі, надруковані зі сплавів титану, нікелю тощо, застосовуються переважно в статорній частині газотурбінних двигунів. Причиною цього є відносно недавній розвиток адитивних технологій у вітчизняній машинобудівній галузі і, відповідно, обмеженість оздоблювально-зміцнювальних методів для локальних частин деталей, а також відсутність технологічних рекомендацій щодо вибору режимів оброблення. Наприклад, експлуатація таких деталей газотурбінних двигунів, як робочі лопатки компресора, супроводжується дією як змінних напружень, так і підвищених температур. Отже, необхідно встановити раціональний ступінь наклепу поверхневого шару, оскільки добре відомо, що за умови дії підвищеної температури ефективність поверхневого зміцнення може значно знижуватись та навіть сприяти зниженню границі витривалості. Інші деталі ГТД та виробів авіаційно-ракетної техніки, отримання яких можливе за допомогою адитивних технологій, працюють в різних експлуатаційних умовах. Для формування необхідної якості і властивостей окремих частин деталей залежно від конфігурації деталі та умов експлуатації в роботі пропонується вдосконалити фінішні методи поверхневої обробки.

1 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ 3D-ДРУКОМ

1.1 Особливості застосування 3D-друкованих металевих деталей

Багато експертів сходяться на думці, що 3D-друковані металеві деталі можуть означати революцію в аерокосмічному виробництві [1].

Генеральний директор компанії «Laser Zentrum Nord GmbH» К. Еммельман відмітив переваги виготовлення деталей за допомогою адитивних технологій. Насамперед це стосується деталей, які мають складну конфігурацію. При виготовленні таких деталей в більшості випадків відсоток відходів після виготовлення традиційними способами може досягати 95%, а наприклад при лазерному спіканні тільки 5%. Але навіть ці відходи можуть бути повторно використані після проходження процесу [1].

В наш час виготовлення деталей методом адитивних технологій обмежено розмірами обладнання. Еммельман зазначає, що в даний момент застосування адитивних технологій має великий потенціал при виготовленні конструкційних компонентів з розмірами до одного метра, а також для компонентів двигуна.

В роботі відзначається важливість адитивних технологій в тому, що вони дозволяють створювати як пустотілі, так і біонічні структури, які неможливо виготовити при використанні звичайних технологій виробництва. Такі деталі можуть витримувати такі ж навантаження, що і деталі які виготовлені звичайними методами виробництва [1].

Адитивне виробництво (AB) має великий потенціал для підвищення ефективності використання матеріалів, зниження впливу на життєвий цикл та забезпечення більшої інженерної функціональності в порівнянні зі звичайним виробництвом, а виробники авіаційних компонентів все частіше використовують адитивне виробництво для легких та економічних конструкцій [2].

Адитивне виробництво трансформує всі сегменти аерокосмічної промисловості, включаючи комерційну та військову авіацію, космічні програми, а також ракетні системи. Така трансформація обумовлена унікальною здатністю адитивного виробництва виробляти деталі зі складною конструкцією, знижувати виробничі витрати (відходи матеріалів, збирання через консолідацію деталей та потребу в інструментах та пристосуваннях), а також виготовляти деталі з високоякісних матеріалів з невеликими виробничими циклами та короткими термінами виконання робіт (рис. 1.1). Адитивне виробництво дозволяє реалізовувати удосконалені конструкції деталей, які забезпечують додатковий простір, багатофункціональні деталі, деталі з кількох матеріалів, консолідацію деталей та деталі, які важко обробляти (рис. 1.2). Здатність адитивного виробництва виготовляти конструкції довільної форми робить його дуже придатним для аерокосмічної промисловості. На сьогоднішній день аерокосмічні компанії, такі як «Boeing», встановили десятки тисяч деталей з АВ (зокрема 200 унікальних неметалевих деталей) на 16 комерційних та військових літаків. Він також розпочав виробництво титанових деталей за допомогою адитивних технологій, які дозволять заощадити до трьох мільйонів доларів США на одному літаку. «GE Aviation» використовує металеве адитивне виробництво для тисяч паливних форсунок щорічно для свого нового двигуна LEAP. Так само «Airbus» використовує металеві кронштейни з АВ і труби [3].



Рисунок 1.1 – Авіаційні деталі, отримані за допомогою адитивних технологій



Рисунок 1.2 – Деталі з кількох матеріалів, отримані за допомогою адитивних технологій

Необхідність зниження ваги двигунів літаків та безпілотних літальних апаратів, зменшення кількості комплектуючих, з яких вони складаються, підвищення характеристик їх якості та міцності привела до значної зацікавленості авіаційної галузі в адитивних технологіях [4], [5], [6]. Також дані технології широко використовуються для ремонту аерокосмічних компонентів [7]. Вони дозволяють використовувати відомі матеріали типу Inconel на новому рівні, керувати їх характеристиками та параметрами деталей, які з них виготовляються [8].

З описаного вище витікає, що отримання деталей методом 3D-друку є актуальним питанням.

1.2 Загальні відомості про адитивні технології

Адитивне виробництво – це виготовлення деталей, яке бере за основу покрокове додавання складових на плоску або осьову основу. У найменуванні «адитивність» лежить основний принцип цього процесу. Цей варіант виготовлення ще називають «виросцуванням» через те, що виріб виробляється шарами поступово.

Адитивні технології є одними з найбільш сучасних і швидко розвиваються в промисловій сфері. Ринок адитивних технологій зростає на 30% щороку і, за свідченнями фахівців, розвиватиметься ще щонайменше п'ять років. Звичайно, на ринку праці користуються великим попитом майстри, які розуміють, на що здатні і які мають обмеження адитивні технології [9].

Використання 3D-принтерів разом з комп'ютерним інжинірингом дає можливість зменшити вагу виробів, з'єднати кілька елементів в один, створити перший «пілотний» макет, функціональний прототип або обладнання для швидкого складання, а не очікувати довгих результатів. Розуміння адитивних технологій та можливість їх правильно використовувати дає велику перевагу у роботі інженерів.

Так, мета адитивного виготовлення – додавання, а не знімання зайвих шарів стружки. Якщо при звичайному виготовленні спершу є заготовка, від якої далі забирається все зайве, то при адитивних технологіях об'єкт поступово виростає з розхідників. Наприклад, в домашніх 3D-принтерах – це певний дріт із пластику. Однак, із пластикових матеріалів можна зробити лише не дуже міцні об'єкти (рис. 1.3). Порівняно недавно в 3D-друковій індустрії стартувала нова тема – друк з металу (рис. 1.1, 1.2). Ця техніка адитивного виготовлення вважається основою революції, що відбулася в промисловості [9].



Рисунок 1.3 – Приклад долоні з пластикового дроту, отриманої за допомогою 3D-друку

До переваг адитивних технологій можна віднести [10]:

- скорочення технологічного ланцюжка і різке зменшення відходів від виробництва;
- сильна індивідуалізація продукту, що виробляється; – прискорення впровадження нових ідей;
- можливість виготовлення деталей високої складності;
- відносна легкість навчання персоналу;
- зниження на порядок часу виробничого циклу для штучного і дрібносерійного виробництва;
- впровадження принципово нових підходів до проектування виробів, що дозволяють створювати складні просторові нерозбірні деталі, ґратчасті полегшені конструкції з металів і полімерних матеріалів, виробництво яких із використанням звичайних технологічних методів неможливо.

До недоліків адитивних технологій можна віднести:

- якість застосовуваних у виробництві порошкових сумішей, полімерних та інших матеріалів не зовсім досконала, що не дозволяє

застосовувати пошаровий синтез для виготовлення виробів з високими вимогами до відсотку браку;

- полімерні матеріали токсичні і не всі можуть бути перероблені і використані повторно;

- висока вартість обладнання та розхідних матеріалів;

- обмеженість сучасних програм для CAD-моделювання щодо повноти реалізації можливостей адитивних технологій;

- не розроблене питання захисту інтелектуальної власності від можливості неліцензованого копіювання оригінальних виробів чи забороненої до масового використання продукції (зброї);

- відсутність єдиних для всіх міжнародних і регіональних стандартів якості і надійності надрукованих виробів, вимог до технологічних процесів та обладнання, безпеки розхідних матеріалів.

1.2.1 Процеси та області використання адитивних технологій

Адитивне виробництво налічує кілька процесів. Пошарове виробництво може відбуватися за допомогою:

- екструзії;
- розбризкування;
- ультрафіолетового затвердіння;
- ламінування;
- сплавлення матеріалів.

Адитивні технології застосовуються для створення фізичних об'єктів, прототипів, копій, інструментарію. Щоб розробити деталі із біоматеріалів застосовується пластикова маса, метали, кераміка, скло та композити.

Така робота організована на розробці невеликих горизонтальних шарів з 3D-копій, які виробляються системами автоматичного проектування та тривимірних сканерів [9].

Компанії, що створюють проекти та займаються виробництвом, використовують такі технології для створення предметів у різних сферах діяльності. Адитивні технології полегшують та роблять швидше процес створення продукту. Підприємства використовують адитивні технології, бажаючи мінімізувати час виготовлення, збільшити якість товарів та зменшити витрати. Також 3D-друк дає можливість компаніям швидше виявити ймовірність виробництва товарів з дефектами або неякісної продукції. Крім цього, створюються методики, процеси та системи для створення оснащення.

Тривимірний друк широко застосовується для покращення якості оснастки, моделей для лиття під тиском. У окремих сферах адитивне виробництво використовують із отримання результатів, які можна отримати при застосуванні інших верстатів. В інших сферах адитивні технології застосовуються для створення різного інструментарію для виробництва та складання, наприклад затискачів, кріплень, шаблонів та напрямних для свердління та різання.

Компанії – великі і маленькі – з великим успіхом використовують технології виготовлення одразу готових деталей. Як кажуть фахівці, пряме виробництво буде найбільшою сферою використання адитивних технологій. Ця технологія вплине на виготовлення набагато більше, ніж інші, звичні для всіх методи [9].

Сфера з неймовірною швидкістю розвивається, з'являються інноваційні методи, технології, матеріали, прикладні завдання та моделі бізнесу. Стає ширше географія та галузь промислового використання адитивних технологій. Це виробництво вже встигло проявити себе і показало великий вплив на розвиток областей проектування та виробництва, надалі роль адитивних технологій зростатиме далі.

Тривимірний друк деталей безпосередньо з металів є вкрай важливим і перспективним напрямом розвитку технологій машинобудування в цілому.

Саме металева деталь – це «справжній» товар, а не просто модель, не макет, не «прототип». Це кінцевий виріб з максимальною доданою вартістю.

Існують два основних методи отримання деталей друком безпосередньо з металу – пошаровий синтез (additive fabrication – AF) і пряме осаджування металу (direct metal deposition – DMD) [11].

Перший метод полягає в наступному. Спочатку формують шар, наприклад, насипають на робочу платформу дозу порошкового матеріалу і розрівнюють порошок за допомогою ролика або «ножа», створюючи таким чином рівний шар матеріалу певної товщини; потім вибірково (селективно) обробляють порошок у сформованому шарі лазером або іншим способом, скріплюючи частинки порошку. Цій технології досить точно відповідає термін «селективний синтез» або «селективне лазерне спікання» (англійською SLS – selective laser sintering).

При використанні другого методу, на відміну від першого, не формується шар матеріалу, а матеріал подається в конкретне місце, куди в даний момент часу підводиться енергія і де йде процес формування деталі. Даний метод подібний до того, де зварювальник вводить матеріал з електрода в те місце, де за рахунок електричної дуги формується зона розплаву. Метод може бути реалізований як селективне лазерне плавлення (selective laser melting – SLM) [11].

Найбільш затребувані на індустріальному ринку металопорошкові композиції: інструментальні сталі, мартенсітностаріючі сталі, алюмінієві сплави, чистий титан і його сплави, сплави кобальту та хрому, жароміцні сталі.

1.3 Аналіз найпоширеніших методів постдрукової обробки деталей

Встановлено, що для широкого застосування адитивних технологій необхідне усунення цілої низки обмежень. Насамперед це пористість, неоднакова рівномірність, знижені фізико-механічні властивості матеріалів порівняно з традиційними методами їх отримання (лиття, штампування) [12]. Актуальним напрямом розширення сфери застосування адитивних технологій є застосування пост-печатної обробки, фінішинг та зміцнення деталей або їх елементів, окремих відповідальних поверхонь деталей, виготовлених за даними технологіями. Вибір методу пост-печатної обробки виконується на основі необхідності покращення конкретних цільових властивостей, виходячи з характеру обробки поверхні, її ефективності та наявних обмежень [13]. Так, у роботах [14], [15] досліджено поверхневий шар зразків зі сплаву Inconel 718, отриманих селективним лазерним спіканням. Встановлено, що він має низькі якісні характеристики, проте фінішне зміцнення дозволяє значно покращити ці характеристики. Серед методів пост-обробки без видалення матеріалу найбільшого поширення дістала пневмодробоструминна та ультразвукова обробки.

1.3.1 Дробоструминна обробка

Дробоструменевий апарат або дробоструминна установка (рис. 1.4) призначається для очищення металевих виробів і металоконструкцій, в тому числі великих, від забруднень і корозії ділянок методом метання дроби і обробки поверхні виробів. Можлива обробка деталей складного профілю, які мають важкодоступні для обробки місця [16].

Дробоструменевий апарат забезпечує очистку або обробку поверхні металу за допомогою дрібних частинок, подібних дробинкам (рис. 1.5). Вони найчастіше мають сферичну форму.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд дробоструменневої установки



Рисунок 1.5 – Приклад дробу, який використовується на дробоструменневих установках

Абразивні елементи розрізняються за матеріалом, з якого вони виготовлені і за призначенням (таблиця 1.1).

Основні функції дробоструменевих машин [16]:

- зняття окалини після гарячої обробки металевих виробів, в тому числі фасонних;

- механічне очищення від іржі за рахунок зняття корозійного шару матеріалу як по всій поверхні виробу, так і окремих ділянок, особливо уражених корозією;
- матування поверхні, якщо необхідно гладкий верхній шар зробити матовим. Може досягатися різна ступінь матовості: груба сатинована або м'яка оксамитова;
- надання поверхні необхідного рівня шорсткості. Можна домагатися різного ступеня шорсткості, це залежить від матеріалу виготовлення дробу і від характеру повітряного потоку.

Таблиця 1.1 – Види дробу

Вид дробу	Цільове призначення
Чавунна колота. В основі – білий чавун, цементит.	Обробка поверхонь під покриття фарбою або анодування. Створення якісного типу матової поверхні, очищення від окалини і корозії.
Сталева	Зачистка поверхонь. Наклеп – метод поверхневої обробки, що збільшує властивості міцності і твердості матеріалу.
Алюмінієва	Обробка алюмінієвих деталей і конструкцій, в тому числі з м'яких алюмінієвих сплавів. Можна отримувати потрібну шорсткість.
Керамічна	Фінішна обробка виробів для отримання чистої гладкої поверхні.
Скляна	Високоміцний метод обробки.
Пластикова, поліамідна і полікарбонатна	Обробка глянцевої особливо гладких поверхонь.
Електрокорунд	Обробка особливо забруднених і сильно пошкоджених корозією шарів та поверхонь

Основний принцип роботи установок: подача «дробу», абразивних елементів з сильним потоком повітря або рідини через сопла, дробоструминні металіники.

Вдаряючись об поверхню металевого виробу дробинки впливають на кристалічну решітку металу, зміцнюючи її, при цьому пошкоджені області руйнуються, і залишається міцний, твердий шар поверхневого матеріалу. Завдяки цьому принципу за допомогою обробки вдається знімати напруження металу: деталі і конструкції отримують «друге» життя, а у нових продовжується термін експлуатації.

Устаткування може налаштовуватися на різні режими обробки, а також підбирається абразивний матеріал різних типів для досягнення потрібного результату.

Дробоочищення проводиться або ручними установками відкритого типу, або в дробоструменевих камерах закритого типу як ручним, так і автоматичним способом [16].

Різновиди закритих установок за принципом дії:

- прохідна установка з транспортером для подачі конструкцій в камеру;
- підвісна дробеструменева установка з кінцевою камерою з дробоструминними металіниками;
- установки з подачею дробу спеціальними лопатями;
- барабанна установка з горизонтально розташованим контейнером барабанного типу. Обертання ємності забезпечує потрапляння абразивних елементів на деталь або виріб;
- установка для очищення труб зі складною конструкцією.

Великі дробоструминні камери – це автоматизовані пристрої високої продуктивності для роботи потоковим способом, за допомогою якого обробляється безліч однотипних предметів і деталей.

Пневмодробоструменева обробка зразків з Inconel 718 приводить до значного підвищення характеристик опору втомі порівняно зі зразками без

зміцнення [17]. В роботі [18] досліджено вплив режимних параметрів пневмодробоструменевого зміцнення на параметри поверхневого шару зразків, виготовлених з матеріалу Inconel 718 та встановлено їх раціональне поєднання. Вони стверджують, що після такого виду обробки зменшується шорсткість поверхні приблизно на 30%.

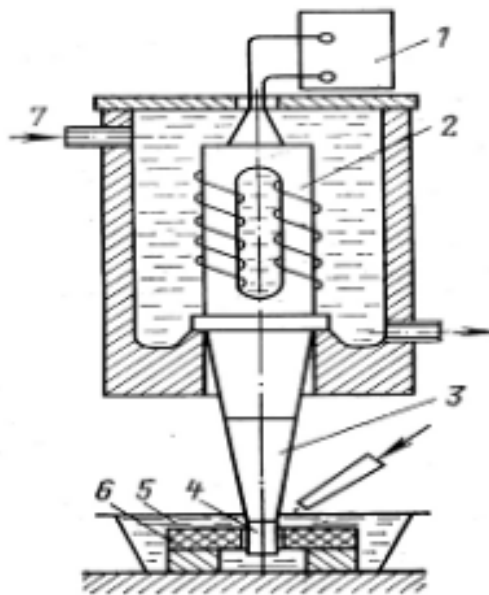
В роботі [19] автори пропонують в якості механічної обробки поверхні використати градієнтну важку дробеструменеву обробку. Вони стверджують, що після такого виду обробки зменшується шорсткість поверхні приблизно на 40% та збільшується втомна довготривалість від 25 до 50 разів в залежності від режимів обробки для матеріалу AlSi10Mg.

1.3.2 Ультразвукова обробка

Ультразвукова обробка (УЗО) абразивом ґрунтується на використанні енергії ультразвукових коливань частотою 16-44 кГц, інтенсивністю більше 10 Вт/см^2 . Джерелом ультразвукових коливань слугують п'єзокерамічні перетворювачі, амплітуда коливання яких складає 2...10 мкм.

Для збудження коливань сердечника магнітострикційного перетворювача 2 (рис.1.6), використовують електромагнітні коливання, які викликає струм ультразвукового генератора 1. Магнітострикційний перетворювач змонтовано в кожусі 7, крізь який прокачують воду для охолодження сердечника. Пружні коливання від магнітострикційного перетворювача підсилюють концентратором 3 до 30–100 мкм. На перетворювачі закріплений інструмент 4. Форми й розміри інструмента визначаються формами й розмірами одержуваних отворів. Заготовка 6 перебуває у ванні 5 з абразивною суспензією, що складається з води й абразивного матеріалу. З абразивних матеріалів використовують карбід бору, карбід кремнію та електрокорунд. Матеріал абразивного наповнювача, його

зернистість вибирають залежно від властивостей оброблюваного матеріалу, необхідної точності і шорсткості оброблюваної поверхні. Процес обробки полягає в тому, що торець інструмента, що коливається з ультразвуковою частотою, ударає по зернах абразиву, що лежать на необроблюваній поверхні, які сколюють частки матеріалу заготовки. Абразивні зерна під дією ударів також розколюються. Тому в зону обробки, під тиском, безупинно подається абразивна суспензія, що несе зерна свіжого абразиву і одночасно видаляє частки знятого матеріалу й роздрібнений абразив. Для нормальної роботи зазор між торцем інструмента і оброблюваною поверхнею повинен бути постійним, що забезпечується автоматичним регулюванням подачі інструмента [20].



1-ультразвуковий генератор; 2 - сердечник магнітострикційного перетворювача; 3 – концентратор; 4 – інструмент; 5 – ванна; 6 – заготовка;
7 - кожух охолоджувача

Рисунок 1.6 – Схема установки для ультразвукової обробки:

Ультразвуковим способом ефективно обробляються такі тендітні матеріали, як агат, алебастр, алмаз, гіпс, германій, граніт, графіт, карбід бору,

кварц, кераміка, корунд, кремній, мармур, нефрит, перламутр, рубін, сапфір, скло, тверді сплави, термокорунд, порцеляна, фаянс, феррити, кристаль, яшма та багато інших.

Продуктивність ультразвукової обробки в значній мірі залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів, частоти й амплітуди коливань робочого інструмента, зернистості абразиву та навантаження на інструмент.

Перспективним є суміщення електрохімічного і ультразвукового способів обробки, що дозволяє значно підняти продуктивність процесу і якість поверхневого шару. При цьому значно зменшується зношування інструменту (в 5-6 разів) і енергоємність процесу (в 3-5 разів) [20].

Використання технології УЗО дає цілий ряд переваг, що проявляються в різній мірі залежно від конкретного способу її реалізації [21]:

- Продуктивність процесу обробки зростає в кілька разів.
- Зношення інструменту для ультразвукового методу обробки скорочується в 8-10 разів у порівнянні зі звичайними способами механічної обробки.
- При свердлінні збільшуються параметри обробки по глибині і діаметру.
- Підвищується точність механічного впливу.

Також було встановлено, що ультразвукова обробка позитивно впливає на поверхневий шар зразків, виготовлених зі сплаву Inconel 718. Автори роботи [22] стверджують, що після такого виду обробки поверхнева мікротвердість в при поверхневому шарі збільшується приблизно на 20%.

Але широкому застосуванню даного методу поки перешкоджає ряд недоліків. В основному, вони пов'язані з технологічною складністю організації процесу. Крім того, ультразвукова обробка деталей вимагає забезпечення додаткових дій і прийомів, серед яких доставка абразивного матеріалу до робочої зони та підключення обладнання для водяного охолодження. Ці фактори можуть підвищувати і вартість робіт. При обслуговуванні промислових процесів зростають енергетичні витрати.

Додаткові ресурси потрібні не тільки на забезпечення функції основних агрегатів, а також на функціонування систем запобігання і струмознімачів, передають електричні сигнали [21].

Якщо додається електрохімічна складова до УЗАО, то її не можна використовувати до пористих матеріалів, рідина попадає в пори, відкіля її неможливо потім видалити, і корозійний процес буде повільно продовжуватись, руйнуючи деталь із середини, негативно впливаючи на експлуатаційні показники.

При обробці в абразивній суспензії зерна абразиву можуть впроваджуватися в поверхню деталей, тобто відбувається шаржування поверхонь, що також має негативний вплив. Тому після видалення задирок необхідно проводити очищення деталей від абразивних зерен у воді або слабкому лужному розчині.

1.4 Видалення задирок та притуплення гострих кромek

При друці деталі на усіх крайках по периметру поверхонь залишається задирка – це постійна проблема 3D-друку. Також при обробці деталей (рис. 1.7а,б) в місці виходу різального інструменту 1 з оброблюваної поверхні 3, на ній утворюються задирки 2 різної форми і розміру. Розмір і форма задирки залежить як від в'язкості матеріалу, так і від геометрії та гостроти різальних кромek інструменту [23].

Задирки представляють досить серйозну проблему з кількох причин.

З точки зору охорони праці задирки є потенційними джерелами травм. При контакті із задирками може порізати руки той, кому доведеться тримати деталь в руках. Це не лише оператори верстатів, але і контролери, майстри, транспортні робітники, і навіть технологи, які спроектували технологічний процес, не передбачивши вирішення проблеми видалення задирок.

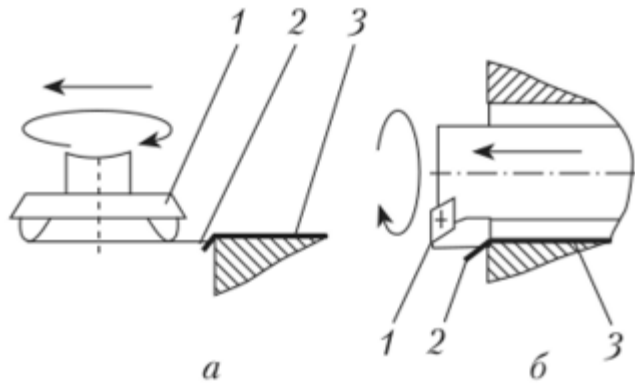


Рисунок 1.7 – Утворення задирки (а – фрезерування, б – розточування)

Задирки можуть порушити правильність і щільність установки заготовки на подальших операціях, якщо задирки потрапили в простір між заготовкою і опорними поверхнями пристосування.

Недопустимі задирки в місцях перетинів отворів та в інших місцях в деталях, що є трубопроводами гідравлічних систем. Задирка, що відокремилася, може стати причиною виходу з ладу усієї системи з найсерйознішими наслідками.

Раціональним є поєднання видалення задирок притуплюванням гострих кромek шляхом зняття невеликих фасок. Якщо по службовому призначенню потрібно збереження гострої кромки, то про це буде окрема вказівка в кресленні деталі. В усіх інших випадках потрібне притуплювання. Воно узабезпечить деталь від утворення забоїн, які є справжньою проблемою машинобудівного виробництва. Забоїни найчастіше виникають на гострих кромках при контактах з іншими деталями в ході транспортування, складування, установки в пристосування.

Способи зняття задирок:

- слюсарні ручні;
- слюсарні механізовані;
- у окремих спеціалізованих пристроях;
- автоматизовані у складі операції на верстатах з ЧПУ.

1.4.1 Ручні слюсарні операції

Традиційно тривалий час із задирками боролися ручними слюсарними способами. Повністю відкидати ці способи не слід. Якщо в технологічному процесі на завершальному етапі операції передбачений технологічний перехід «Видалення задирок» або «Притуплювання гострих кромek», то при такому записі ці роботи зобов'язаний виконати оператор в тому місці технологічного процесу, як це передбачено документацією [23].

В якості різальних інструментів для ручного зняття задирок можливі наступні варіанти:

- шліфувальна шкірка;
- напилки;
- надфілі;
- шабери.

1.4.1.1 Обробка шліфувальними шкірками

Шліфувальна (наждачна) шкірка (рис. 1.8) – гнучкий абразивний інструмент, що складається з тканинної або паперової основи з нанесеним на неї шаром абразивного порошку. В якості шліфувальних матеріалів використовують електрокорунд (оксид алюмінію) або карбід кремнію (карборунд), рідше застосовуються інші абразиви, зокрема ельбор [23].

Папір для основи має підвищену міцність, щоб витримувати механічні дії. Вона може бути звичайною або водостійкою, але порівняно з тканинною основою має невисоку міцність і знижену зносостійкість.

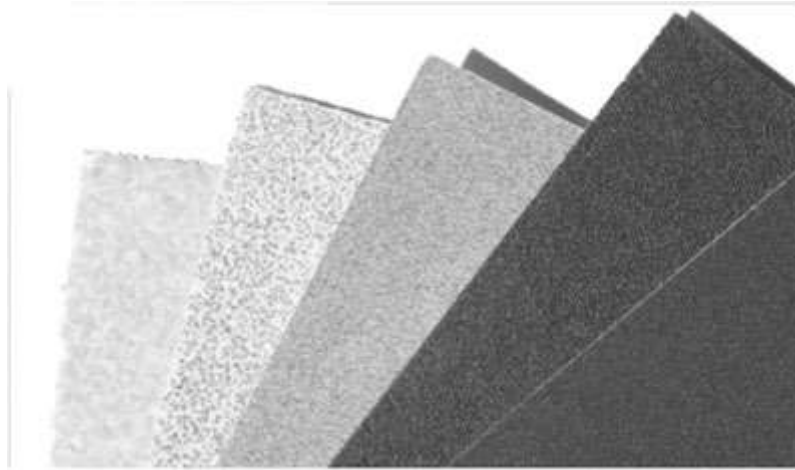


Рисунок 1.8 – Шліфувальна шкірка

Переваги паперової основи:

- низька вартість;
- відсутність подовження при роботі;
- поверхня дозволяє наносити найдрібніші фракції абразивного матеріалу.

Найчастіше в якості тканинної основи використовують бавовну і поліестер. Тканини просочуються поліефірною смолою для надання їм більшої міцності та водостійкості.

Переваги тканинної основи :

- висока міцність і зносостійкість;
- водостійкість.

Недоліки:

- відносно висока вартість;
- короткий термін служби;
- можливе подовження і звужування при натягуванні під час роботи (залежить від типу тканини і характеру обробки);
- необхідність витяжної вентиляції через абразивний пил.

Змочування поверхні при використанні шкірки підвищує її стійкість і позбавляє від абразивного пилу. При знятті задирок і притуплюванні кромek шкірку прикріплюють до дерев'яного бруска через гумове прокладення,

забезпечуючи еластичність інструменту [23]. В цьому випадку інструмент називають – полірувальником.

1.4.1.2 Обробка напилками

Напилки – ручні інструменти для пошарового зняття матеріалу з поверхні заготовки (рис. 1.9).

Необхідність застосування різних профілів напилків викликана великою різноманітністю форм поверхонь оброблюваних деталей. Технічні умови на напилки відображені в ГОСТ 1643-80. Плоскі напилки використовують для обробки плоских зовнішніх і внутрішніх, а також зовнішніх опуклих поверхонь. Квадратними напилками обпилюють площини квадратних і прямокутних отворів і різних пазів. Тригранні і ромбічні напилки служать головним чином для обпилювання внутрішніх кутів. Круглі напилки застосовують для обпилювання закруглених поглиблень і отворів у виробах. Напівкруглими напилками обпилюють увігнуті поверхні.



Рисунок 1.9 – Види напилків

Залежно від величини зуба, насічки і числа зубів, що доводяться на 1 см довжини напилка, насічкам присвоєні відповідні номери:

№ 1 – драчеві напилки з великою насічкою, у яких на 1 см довжини доводиться 5...13 зубів;

№ 2 – особисті напилки з середньою насічкою, на 1 см – 14...25 зубів;

№ 3...6 – оксамитові напилки з дрібною насічкою, на 1 см – 26...80 зубів.

Напилки можуть мати одинарну або подвійну перехресну насічку. Основна насічка розташовується під кутом 65° до вісі інструменту, а допоміжна – під кутом 45° [23].

1.4.1.3 Обробка надфілями

Надфілі за ГОСТ 1513-77 є мініатюрними напилками завдовжки від 100 до 160 мм з дрібною насічкою, застосовуються для тоншого обпилювання, у тому числі для видалення задирок і забоїн.

Аналогічно напилкам, надфілі бувають плоскі, квадратні, тригранні, круглі, напівкруглі, ромбічні, овальні і пазові.

Такі ж види, профілі і розміри мають алмазні надфілі за ГОСТ 23461-84, використовувані для обробки твердих сплавів, загартованих сталей, кераміки. Алмазний надфіль складається із сталевого корпусу, алмазоносного шару з алмазних порошків зернистості від 160/125 до 40/28 і металевої зв'язки. Для закріплення алмазоносного шару до корпусу використаний метод гальваностегії [23].

1.4.1.4 Обробка шаберами

Для зняття задирок ручним способом частенько застосовують шабрування. Цей спосіб слюсарної обробки полягає в зішкрібанні тонких

шарів металу. З багатьох видів шаберів найчастіше для видалення задирок і притуплювання гострих кромek використовують тригранний шабер, показаний на рис. 1.10.

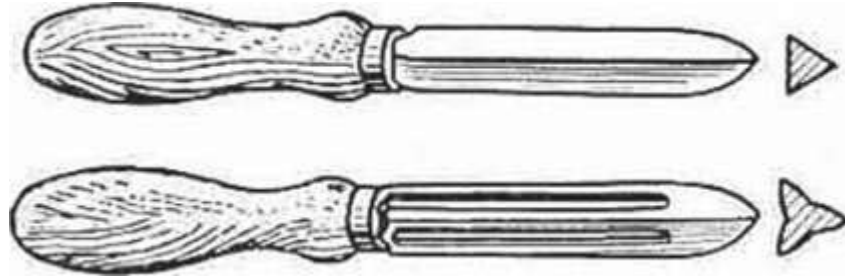


Рисунок 1.10 – Тригранні шабери

Нині з'явився абсолютно оригінальний по конструкції шабер (рис. 1.11), що самовстановлюється, створений фірмою «Shaviv» спеціально для притуплювання гострих кромek і зняття задирок. Він складається з корпусу 2, ручки 3 і швидкозмінного робочого елемента 1 (адаптера).

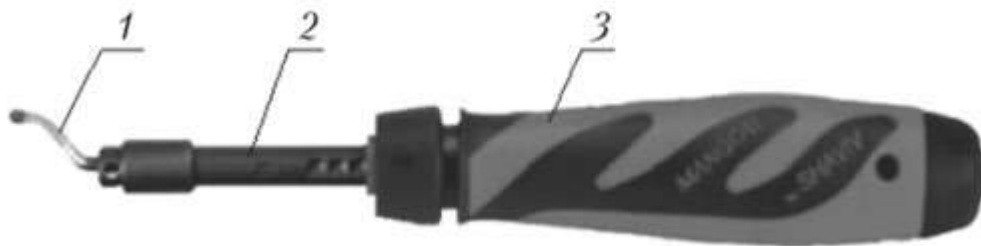


Рисунок 1.11 – Шабер, що самовстановлюється

На рисунку 1.12 показано приклад притуплювання гострих кромek шабером, що самовстановлюється.

Інструмент має ряд позитивних сторін [23]:

1. Висока стійкість в порівнянні з стійкістю напилка або звичайного шабера. Леза інструментів Shaviv виготовляють з якісної швидкорізальної сталі або твердого сплаву.

2. Для його використання не потрібно високу кваліфікацію. Поворотні швидкозмінні леза самі встановлюються по оброблюваній поверхні.

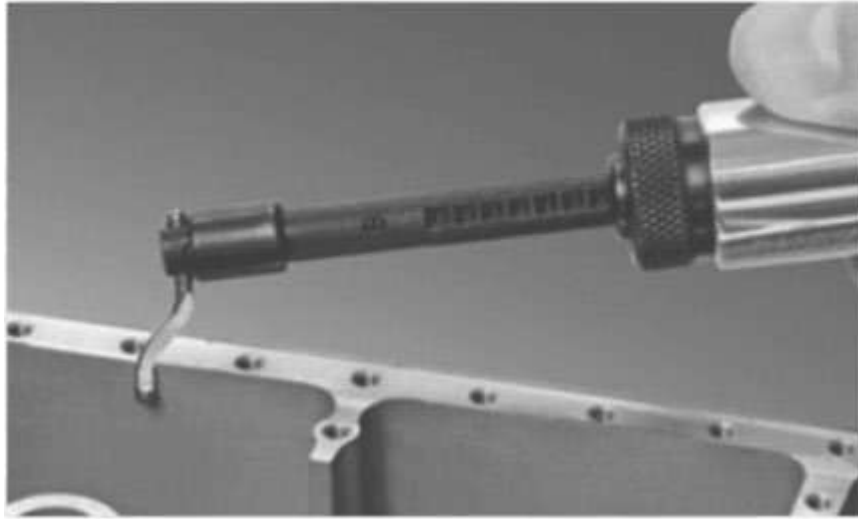


Рисунок 1.12 – Притуплювання кромки шабером

3. Інструменти мають велику універсальність. Їх використовують для обробки прямокутних і криволінійних кромки різних елементів деталей: пазів, уступів, площин, зовнішніх і внутрішніх поверхонь. Застосовують для обробки деталей з різних матеріалів (сталі, нержавіючою сталі, загартованій сталі, кольорових сплавів, пластмас, твердих сплавів, скла і інших матеріалів).

4. Адаптери дозволяють встановлювати необхідний виліт робочих лез для обробки елементів в глибині деталей.

5. Інструмент безпечний у використанні. Унеможливлено отримання травм і порізів.

6. Використання інструментів «Shaviv» виключає ушкодження деталей.

Недоліки використання шаберів:

- шабер недостатньо стійкий при робочому ході, внаслідок чого стружка неоднакова в перерізі, поверхня виходить нерівною й рваною;
- у кінці кожного руху шабер залишає задирки, які доводиться знімати додатково;
- невисока трудомісткість процесу.

1.4.2 Механізовані слюсарні операції

Різальні інструменти для зняття задирок і притуплювання кромки можуть мати механізований привід швидкого обертання від пневматичних або електричних машинок [23].

По аналогії з напилками є металеві інструменти – борфрези (рис. 1.13), робочим поверхням яких надають різні форми:

- сфероконічну;
- сферичну;
- гіперболічну;
- конічну;
- сфероциліндричну;
- циліндричну.

Металеві борфрези виготовляють твердосплавними і сталевими з алмазним напильником. На рисунку 1.14 показано притуплювання борфрезою гострої кромки деталі.



а



б

Рисунок 1.13 – Борфрези: а – твердосплавні; б – з алмазним напильником

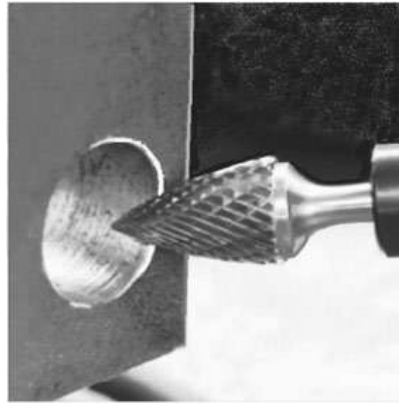


Рисунок 1.14 – Зняття фасок борфрезою

Успішно можна видаляти задирки металевими щітками (рис. 1.15). Але як відомо при взаємодії сталевих щіток з оброблюваною поверхнею залишається мікрошар вуглецевого металу ворсу, здатного окислюватися і утворювати на поверхні неметалічних виробів іржу, наприклад, на полірованому граніті.

Спостерігались випадки, коли після фінішної обробки металевими щітками і збереження на складі титанових авіаційних лопаток, їх робочі поверхні «ржавіли». Оскільки сторонні оксиди на особлизовідповідальних деталях з жароміцних сталей і сплавів не допускаються, і до того ж після термообробки за ремонтною технологією на ЛЮМА-контролі спостерігалось світіння, щітки з металевим ворсом на цих операціях застосовують неохоче, незважаючи на їх переваги для обробки складнопрофільних деталей, до яких і відносяться лопатки. Це явище можна пояснити тим, що при обробці металевими щітками спостерігаються високі миттєві температури в зоні контакту (300...1200 °C залежно від оброблюваного матеріалу) [24]; вони «сприяють пластичній течії металу і формуванню структури поверхневого шару» [25]; на оброблюваній поверхні мають місце складні фізико-механічні і хімічні процеси, ковзання ворсу, мікроудари окремих ворсинок, мікрорізання і мікросхоплювання металу ворсу на поверхні [26]. Через це залізо дифундує в поверхню доволі інертного металу.



Рисунок 1.15 – Металеві щітки з дротом різних металів

На рис. 1.16 показано видалення задирок і притуплювання кромки на перетині двох отворів. Інструмент кулястої форми виконаний з пластика з абразивним наповнювачем.



Рисунок 1.16 – Робота абразивною борфрезою

Сталеві і абразивні борфрези (рис. 1.17), металеві і абразивні щітки (рис. 1.18) можна застосовувати на верстатах з ЧПУ на завершальній стадії виконання операції механічної обробки. Для цього різальний інструмент за

програмою, що управляє, повинен на швидкому ходу обійти усі кромки деталі [23].



Рисунок 1.17 – Види абразивних борфрез

Це не просто здійснити в складних по конфігурації деталях, оскільки знадобиться точне переміщення різальних інструментів відносно кромки перетину поверхонь.



Рисунок 1.18 – Абразивні щітки

Найбільш вдале рішення знаходить ідея комплексної обробки деталей на верстатах з ЧПУ, що включає зняття задирок у вигляді завершального технологічного переходу при використанні еластичного інструменту. Порівняно недавно з'явилися еластичні абразивні щіточки (рис. 1.19), зібрані з пелюсток в змінні касети.

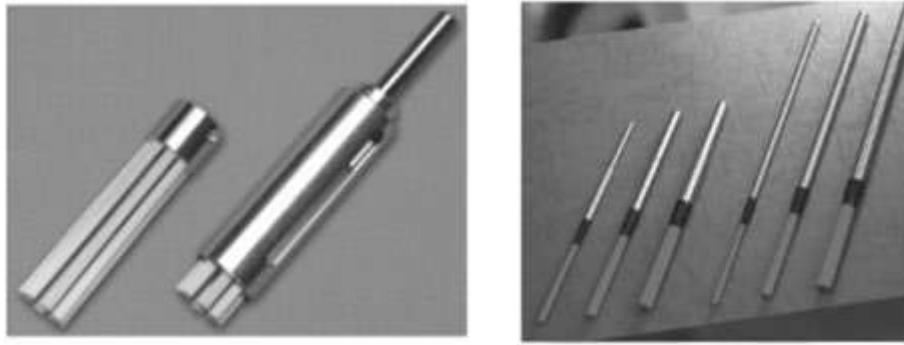


Рисунок 1.19 – Абразивні щіточки для зняття задирок

Еластичність щіточок значно спрощує завдання програмування і налаштування положення різального інструменту. Подача може дорівнювати величині швидкого переміщення робочих органів. У більшості сучасних верстатів з ЧПУ швидкі подачі можуть відбуватися тільки в режимі холостих переміщень. Робочі переміщення в режимі більш складної інтерполяції можна здійснити тільки на нижчих швидкостях. Без сумніву, з появою необхідності виконувати обробку на великих подачах і швидкостях, прикладом якої є зняття задирок абразивними щіточками, виробники верстатів почнуть збільшувати робочі швидкості переміщення в усіх режимах.

Технолог, що проектує обробку на верстаті з ЧПУ, повинен мати уявлення про можливість поліпшити шорсткість поверхні за допомогою багатопрохідної обробки надзвичайно гнучкими абразивними щітками (рис. 1.20). Абразивні елементи у вигляді сферичних кульок, скріплених з центральним валиком гнучкими стержнями, притискаються до оброблюваної поверхні дією відцентрових сил при швидкому обертанні інструменту.

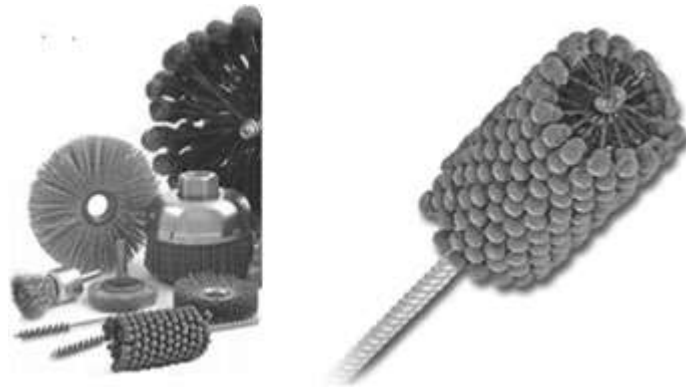


Рисунок 1.20 – Гнучкі абразивні щітки

В умовах багатосерійного і масового виробництва зняття задирок і притуплювання різальних кромek економічно вигідно виконувати в окремій операції з використанням термічних, ультразвукових, електрофізичних і електрохімічних дій. Це доцільно, оскільки вказаними методами обробляють одночасно велике число деталей, і можна досягти реального зниження собівартості [23]. Але деталі, які отримані методом 3D-друку мають свої особливості, і для них не всі методи можливо використувати.

1.4.2.1 Полімерно-абразивні щітки

Як правило всі надруковані деталі мають пористу структуру. При обробці таких деталей необхідно звертати особливу увагу на викришування матеріалу та навіть на відрив окремих часток. Тому деталі, виготовлені методом 3D-друку при обробці потребують особливої уваги та застосування так званих м'яких способів обробки і в той же час вони повинні мати високу якість обробленої поверхні. З попередніми дослідженнями можна зробити висновок, що цим вимогам задовольняє застосування полімерно-абразивні щітки.

Полімерно-абразивні щітки (ПАЩ) мають істотну перевагу гнучких інструментів – зниження вимог до точності взаємного розташування деталі і

інструменту. У зв'язку з цим зменшується складність руху інструменту, що робить автоматизацію і механізацію таких операцій по обробленню поверхонь, а особливо, крайок авіаційних складнопрофільних і тонкостінних деталей, технічно і економічно прийнятною, оскільки знижується вартість автоматичних пристроїв і їх програмування, а також вартість технічного обслуговування.

Завдяки цій перевазі при обробці поверхонь і кромek складного профілю щітковими полімерно-абразивними інструментами є реальна можливість механізації і автоматизації фінішних операцій без необхідності застосування спеціального і дорогого устаткування, що дозволяє істотно підвищити продуктивність обробки і виключити ручну працю або значно понизити її долю [27]. Полімерно-абразивний інструмент добре зарекомендував себе при обробці гострих кромek та формування радіусу заокруглення [28], [29].

1.4.2.2 Конструктивні особливості полімерно-абразивних щіток

Конструктивно полімерно-абразивні щітки мають різну форму та виконання (рис. 1.21). По конструкції і методам закріплення волокон в маточині є схожість з металічними щітками (рис. 1.15), які вже довгий час використовуються в промисловості. Але окрім недоліків, показаних вище, металеві щітки мають термін служби в 20...200 разів менше, ніж полімерно-абразивні щітки обертальної дії. Також через низьку динамічну пластичність металевого ворсу, він часто під час роботи відламується в місці закріплення біля маточини; враховуючи, що це – металевий дріт на високій швидкості (20...35 м/с), то процес є небезпечним для слюсаря. І також ці обриви через якийсь час пришвидшуються і визивають інтенсивну масову втрату робочого дротяного ворсу. На відмінність металевим щіткам, полімерно-абразивні

(ПА) щіткові інструменти зношуються поступово, не втрачаючи цілі волокна.

Вибір варіанту конструкції ПАЩ залежить від конструктивних особливостей оброблюваної деталі і кривизни поверхні, що оброблюється. Щітка складається з маточини (металева або пластикова) та волокон (поліамід з абразивними зернами). Волокна можуть бути прямими або гофрованими (рис. 1.22) [27].



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 1.21 – Види варіантів конструкцій полімерно-абразивних щіток: а – дискові; б – чашкові; в – роликові; г – торцева; д – кінцева

Оптимальний об'єм абразивного наповнювача матеріалу волокна, складає близько 25-35 %. Якщо відсоток абразивних зерен буде більший або менший то погіршуються, відповідно, втомно-міцнісні характеристики

волокна або його різальна здатність [28].

Вибір матеріалу абразивного наповнювача залежить від матеріалу оброблюваної деталі.



Рисунок 1.22 – Волокна полімерно-абразивних щіток ($\times 10$): а – ПА волокно (0,6 мм); б – гофроване ПА волокно (1,2 мм) [27].

При використанні ПАЩ на фінішних операціях можливе забезпечення високої продуктивності і якості оброблюваної поверхні завдяки тому, що ПАЩ має багато варіантів налаштування шляхом поєднання певних параметрів і режимів обробки. До того ж ці інструменти мають дуже низький силовий вплив на обробляєму поверхню, тож можна їх використовувати для тонкостінних деталей типу авіаційних лопаток з тонкими вхідними і вихідними крайками, які вже пробують виготовляти за допомогою металевого 3D-принтіngu.

1.4.2.3 Параметри і режими полімерно-абразивних щіток

Проаналізувавши конструкцію полімерно-абразивної щітки можна виділити її наступні основні параметри:

1. Геометричні: діаметр інструменту D , ширина інструменту B , довжина волокна L .

2. Технологічні: діаметр волокна d_v , матеріал абразивних зерен, зернистість абразиву F .

До режимів обробки можна віднести наступні режими:

- швидкість різання V , м/с;
- подача інструменту (подовжня подача S_{np} , м/хв, поперечна подача на хід або подвійний хід S_{nn} , мм/подв.х.);
- кількість подвійних ходів N , подв.х.;
- натяг i , мм.

Вибір режимів різання залежить від умов обробки, оброблюваного матеріалу та параметрів ПАЩ.

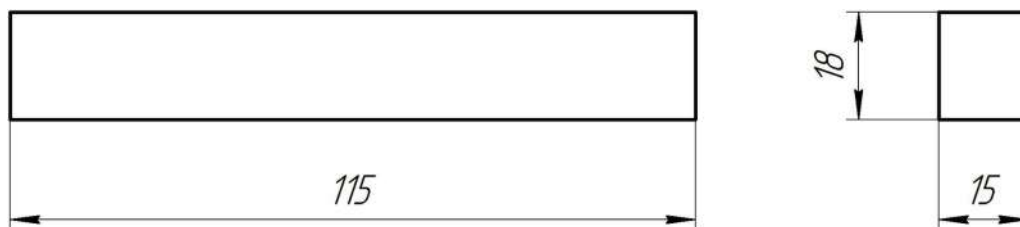
Аналіз літературних джерел [30], [31], [32], [33], [34] показує, що ПАЩ є перспективним інструментом для застосування в різних галузях промисловості. Основними з них є: автомобільна промисловість, машинобудування, електроніка, авіадвигунобудування, виробництво інструментів, деревообробка, обробка заготівель, хімпром, нафтогазова промисловість, гірничодобувна промисловість [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41]. Але про використання ПАЩ для постпринтіngu інформації немає.

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна передбачити, що даний інструмент підійде і для обробки деталей, отриманих 3D-друком. Що дасть можливість розширити області використання таких деталей, тому ці дослідження є актуальними.

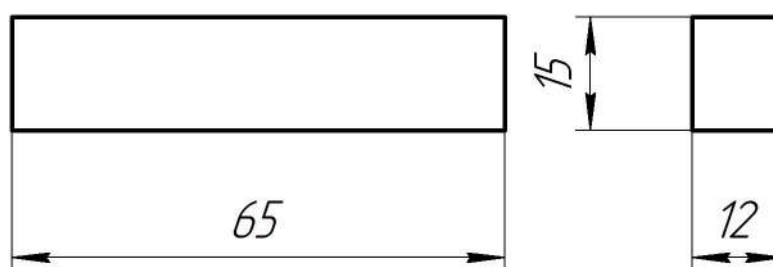
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1 Зразки для експериментальних досліджень

Для дослідження впливу різних технологічних факторів на якість обробленої поверхні застосовували зразки, виготовлені з матеріалів 2М2А (рис. 2.1, а) та ЕП718 (рис. 2.1, б), отримані спіканням та 3D-друком. Хімічний склад оброблюваних матеріалів приведено в таблицях 2.1 та 2.2, масова доля елементів вказана у відсотках (%).



а)



б)

Рисунок 2.1 – Ескізи і зовнішній вигляд зразків для проведення основних досліджень.

Таблиця 2.1 – Жароміцний сплав на основі титану 2М2А, хімічний склад, %

Ti	Al	Sn	Zr	Mo	Si
основа	6	0,2	0,5	3,8	0,4

Таблиця 2.2 – Жароміцний корозійностійкий сплав на нікелевій основі ЭП718 (ХН45МВТЮБР), хімічний склад, %

C	Si	P	S	Cr	Al	Fe	Co	W	La	Ni
0,01-0,10	< 0,8	< 0,013	< 0,013	20,0-23,0	0,3-0,7	<3,0	26,0-30,0	13,0-16,0	<0,1	решта

2.2 Методика дослідження шорсткості

В якості контрольного параметру було прийнято параметр шорсткості поверхні Ra , вимірюваний на профілографі моделі 171621 (рис. 2.2). Шорсткість вимірювали на базі 5,6 мм в напрямі, перпендикулярному основним рискам, до і після обробки ПАЩ. Середнє значення шорсткості знаходили за 5 результатами вимірів.



Рисунок 2.2 – Профілограф моделі 171621

При налипанні полімерного матеріалу волокон на оброблювану

поверхню шорсткість не вимірювали. А режими вважали нераціональними.

2.3 Методика визначення якості скруглення гострих кромek після видалення задирок

Радіуси заокруглення вимірювали на вертикально-фрезерному верстаті ГФ2171Ф3 з ЧПК WL4М (рис. 2.3) за допомогою наступної оснастки: індикаторний годинник часового типу моделі ІЧ-2 (рис. 2.4), до якого під'єднали датчик, підключений до персонального комп'ютера (ПК) через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) моделі Е-140 фірми «L-Card».



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд вертикально-фрезерного верстату ГФ2171Ф3 з ЧПК WL4М

В цілому система працює як контуромір. Контур радіусу (рис. 2.5)

записували на ПК.

Зразок закріплювали в лещатах верстату під кутом 45° до площини плити. В цьому випадку прилад вимірював контур радіусу скруглення в нормальному перерізі у встановленому масштабі.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд робочого місця, обладнання та оснастки для вимірювання радіусів заокруглення

Зразок закріплювали в лещатах верстату під кутом 45° до площини плити. В цьому випадку прилад вимірював контур радіусу скруглення в нормальному перерізі у встановленому масштабі.

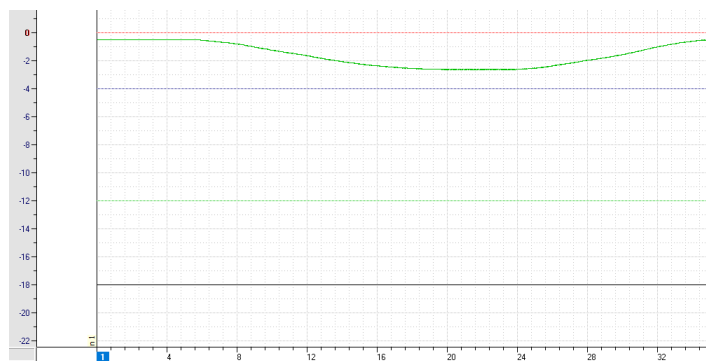


Рисунок 2.5 – Приклад контуру радіуса заокруглення, записаного на ПК

2.4 Устаткування для обробки полімерно-абразивними щітками

Зразки обробляли на площинно-шліфувальному верстаті моделі 3Г71 (рис. 2.6).

Для обробки зразків використовували полімерно-абразивну щітку діаметром 150 мм, зернистістю F80 та діаметром волокна 1,2 мм, матеріал абразивного наповнювача – карбід кремнію 63С. Також змінювали виліт волокон L (рис. 2.7) за допомогою спеціально виготовлених накладок. У експериментах величину виліту змінювали від 8 до 32 мм. Зміною величини вильоту полімерних волокон L можна принциповим чином змінювати жорсткість волокон ПАЩ від дуже податливих умов деформації до дуже жорстких, в яких абразивне зерно поводить себе як жорстко закріплене в звичайному шліфувальному крузі, що впливає на продуктивність фінішної обробки, а також умови формування якості обробленої поверхні, силове і теплове навантаження.



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд площинно-шліфувального верстата моделі 3Г71

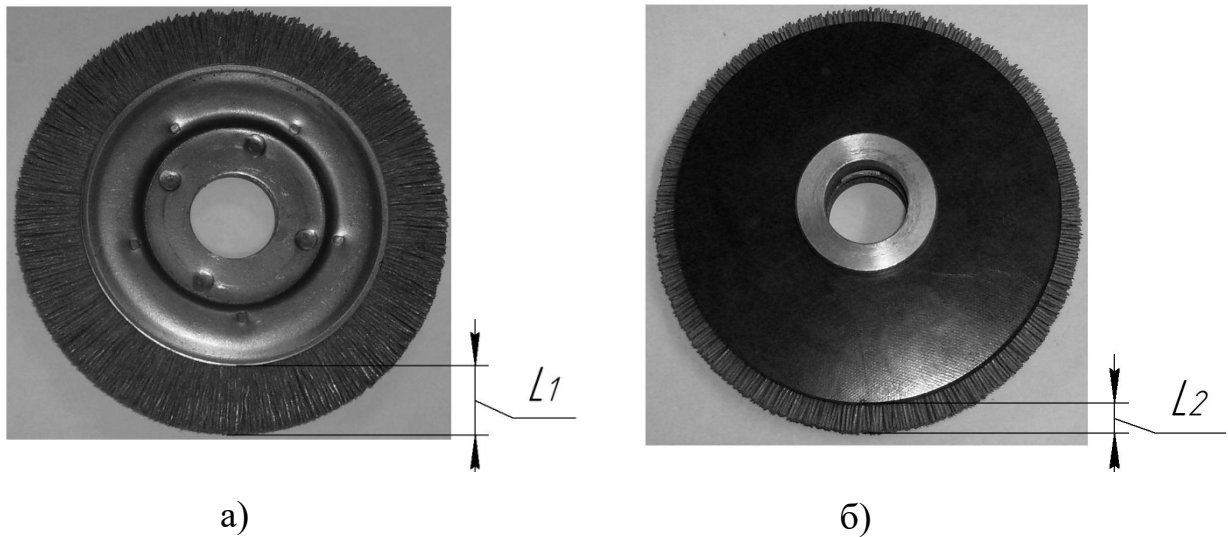


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд дискових ПАЩ: без накладок (а), з накладками (б).

Зразки обробляли при різних режимах обробки. Змінювали подачу S , натяг i та кількість подвійних ходів інструменту N .

З попередньо проведених експериментів було встановлено, що подачу необхідно брати $S=1,0$ м/хв для забезпечення найбільш правильної форми отриманого радіуса заокруглення. Натяг змінювали в наступним чином: $i=1,5; 2,0; 3,0$ мм. Кількість подвійних ходів була $N=1,0; 3,0; 5,0; 10$ подв.х.

3 ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНО-АБРАЗИВНИМИ ЩІТКАМИ

3.1 Дослідження шорсткості оброблюваної поверхні залежно від режимів обробки

Дослідження параметрів шорсткості виконували з ціллю встановити раціональні режими обробки, а також оцінити якість обробленої ПАЩ поверхні.

При отриманні зразків пошарово результат заміру шорсткості відрізняється в залежності від місця заміру. Шорсткість незначно відрізнялась, и попадала в один клас чистоти. Результати замірів вихідної шорсткості для зразків з 2М2А та ЕП718 (Inconel 718) представлені в таблицях 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 – Результати замірів шорсткості поверхні зразків з матеріалу 2М2А до обробки

Середня шорсткість по стороні зразка Ra , мкм	
1 точка	7,65
2 точка	6,72
Середня по стороні	7,18
Середня шорсткість по іншому боку зразка Ra , мкм	
1 точка	5,13
2 точка	5,88
Середня по стороні	5,50
Середня шорсткість по зразку	6,34

Обробляли зразки без поперечної подачі для чистоти експерименту.

Щоб всі подвійні ходи обробляли визначене місце зразка.

Таблиця 3.2 – Результати замірів шорсткості поверхні зразків з матеріалу ЕП718 до обробки

Середня шорсткість по стороні зразка Ra , мкм	
1 точка	4,37
2 точка	5,15
Середня по стороні	4,76
Середня шорсткість по іншому боці зразка Ra , мкм	
1 точка	5,15
Середня шорсткість по зразку	4,95

Вплив натягу і ЗОТС на шорсткість.

Було встановлено, що при збільшенні натягу шорсткість обробленої поверхні покращується. Це відбувається за рахунок деякого підвищення силової складової.

При використанні ЗОТС відбувається покращення шорсткості (Ra менше на 6...10%) ніж без ЗОТС. Але це відбувається тільки при натязі до 2 мм. При збільшенні натягу (більше 2 мм) шорсткість оброблюваної поверхні погіршується. Це пояснюється тим, що під час роботи волокна ПАЩ розпушуються і бокові волокна зменшують складову силової дії на поверхню, відповідно при цьому поступово падає інтенсивність обробки.

Також було встановлено, що використання ЗОТС при натягах більше 2 мм призводить також до зменшення інтенсивності обробки. Це пояснюється тим, що волокна ПАЩ починають прослизати по поверхні зразка. За результатами проведених експериментів встановлено, що раціональна величина натягу становить 2,0 мм (табл. 3.3, рис. 3.1, рис. 3.2).

Таблиця 3.3 – Результати замірів шорсткості поверхні зразків з матеріалу 2М2А в залежності від натягу

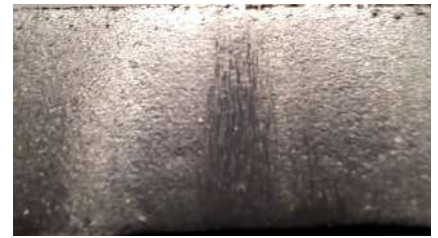
Натяг i , мм	1,5	2	3
Шорсткість Ra , мкм	2,45	1,35	1,95
Середня по стороні Ra , мкм	1,92		



а)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Поверхня зразка після обробки ПАЩ в залежності від натягу: а) $i = 1,5$ мм, б) $i = 2,0$ мм, в) $i = 3,0$ мм

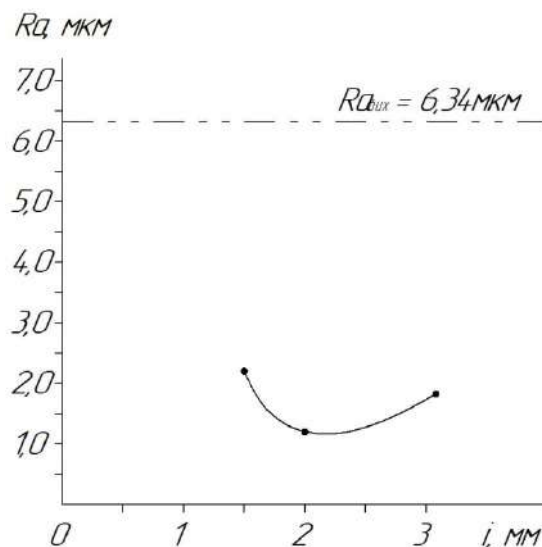


Рисунок 3.2 – Графік залежності шорсткості поверхні від натягу для зразків виготовлених з матеріалу 2М2А

Вплив числа подвійних ходів на шорсткість отриманої поверхні.

Результати замірів шорсткості поверхні зразків з матеріалу 2М2А та ЕП718 в залежності від кількості подвійних ходів наведені в таблицях 3.4 та 3.5, а також на рис. 3.3 та 3.4 показані поверхні зразків після обробки ПАЩ в залежності від кількості подвійних ходів. За результатами проведених

експериментів можна зробити висновок, що при обробці матеріалу ЕП718 найбільша продуктивність обробки досягається при $N=3$ подв.х. при цьому ми можемо спостерігати найкращу шорсткість поверхні (рис. 3.5). Після 5...7-го подв. ходу інструмент починає наводити свою шорсткість, і її значення далі погіршується або не змінюється. Встановлювати N більше 10 подв. ходів – нераціонально.

Таблиця 3.4 – Результати замірів шорсткості поверхні зразків з матеріалу 2М2А в залежності від кількості подвійних ходів

Кількість подвійних ходів N , под.х.	1	3	5	10
Шорсткість Ra , мкм	3,24	2,56	2,47	2,16
Середня по зразку Ra , мкм	2,6			

Таблиця 3.5 – Результати замірів шорсткості поверхні зразків з матеріалу ЕП718 в залежності від кількості подвійних ходів

Кількість подвійних ходів N , под.х.	1	3	5	10
Шорсткість Ra , мкм	3,1	2,65	2,86	2,73
Середня по зразку Ra , мкм	2,84			



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд зразка, виготовленого з матеріалу 2М2А після обробки ПАЩ



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд зразка, виготовленого з матеріалу ЕП718 після обробки ПАЩ

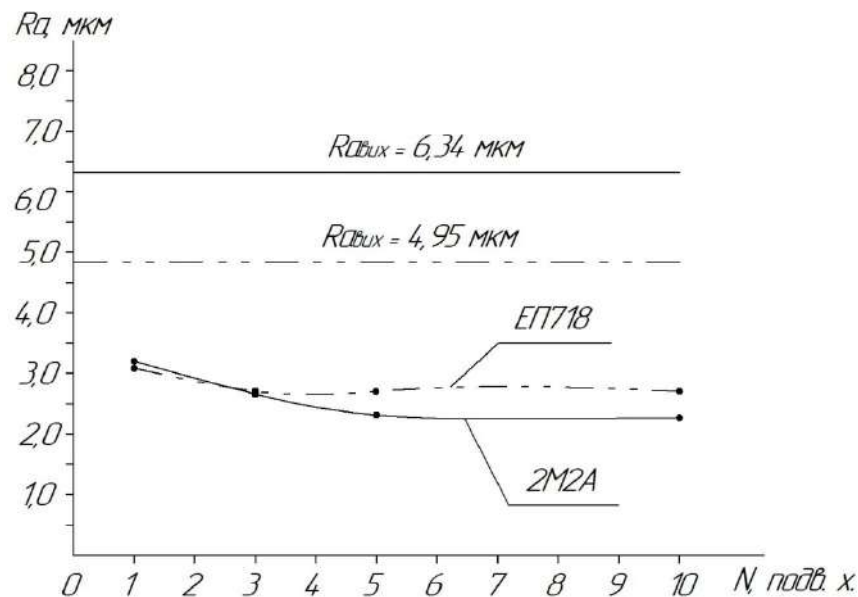


Рисунок 3.5 – Графік залежності шорсткості поверхні від кількості подвійних ходів інструменту

При обробці зразків, виготовлених з матеріалу 2М2А спостерігається значне покращення шорсткості поверхні при $N=3$ подв.х. (рис. 3.5). При збільшенні кількості подвійних ходів ми можемо спостерігати покращення шорсткості, але воно не значне. Видно, що на значення параметру шорсткості має значний вплив остаточна пористість зразків, хоча частково дрібні пори закриваються поверхнево-пластичним деформуванням під ударною дією ПА волокон.

3.2 Оцінка якості видалення задирок і заокруглення гострих кромок

Одним із складних технологічних завдань фінішної обробки є її слюсарна складова – видалення задирок і заокруглення гострих кромок, особливо, якщо кромки мають складну геометричну форму. Особливо у деталей, отриманих 3D-принтингом, які мають задирки по всіх кромках виготовленої деталі.

Розроблено багато методів [42], які з різною мірою точності і якості

справляються з поставленим завданням. Проте, все ще є високий відсоток ручної праці, задіяної при виконанні цієї роботи, яка часто вимагає ювелірної точності, неослабної уваги, є монотонною і викликає швидке стомлення робітника. Тому актуальним залишається питання вивчення інструментів, таких як ПАЩ, здатних полегшити виконання таких слюсарних операцій, зменшити частку ручної праці або повністю її виключити [43].

Експерименти проводили однофакторні. При цьому змінювали натяг $i=1,5\dots3$ мм та кількість подвійних ходів $N=1\dots10$ подв.х.

Результати замірів радіусів заокруглення на зразках з матеріалу 2М2А та ЕП718 в залежності від натягу і кількості подвійних ходів наведені в таблицях 3.6-3.8, а також на рис. 3.6-3.8 показані радіуси заокруглення, отримані на зразках після обробки ПАЩ в залежності від натягу та кількості подвійних ходів.

Із результатів проведених експериментів видно, що задирка видаляється і гостра кромка знімається вже при першому проході $N=1$ подв.х. та натязі $i=1,5$ мм як при обробці зразків, виготовлених з матеріалу 2М2А, так і зразків, виготовлених з матеріалу ЕП718.

Таблиця 3.6 – Залежність радіусів заокруглення r від натягу i для зразків, виготовлених з матеріалу 2М2А

Натяг i , мм	Радіус заокруглення r , мм
1,5	1,02
2	1,06
3	2,65

Також було встановлено, що чим більший натяг i тим більший буде радіус заокруглення (рис. 3.9), але до певного значення. Визначили, що при натязі більше 3 мм буде відбуватися зменшення радіусу заокруглення і він буде не рівномірним. Це пояснюється тим, що при великих натягах волокна ПАЩ розходяться в сторони. При цьому вони починають працювати своїми

бічними сторонами (а деякі з них просто просковзують) і ефективність обробки падає.



а) $i=1,5$ мм



б) $i=2$ мм



в) $i=3$ мм

Рисунок 3.6 – Загальний вигляд радіусів заокруглення після обробки ПАЩ зразка, виготовленого з матеріалу 2М2А при зміні натягу ($\times 3$)

У випадку мети досягнення найбільшого радіусу заокруглення, раціональним натягом при обробці ПАЩ даних зразків є натяг 3 мм. Він дозволяє ефективно обробити гостру кромку та зняти радіус заокруглення правильної форми.

Проаналізувавши вплив кількості подвійних ходів на радіус заокруглення можна зробити наступний висновок: при збільшенні кількості подвійних ходів від $N=1$ подв.х. до $N=10$ подв.х. для зразка, виготовленого із матеріалу 2М2А, радіус заокруглення збільшується від 1,22 мм до 2,69 мм (рис. 3.10). Тому для даного матеріалу можна рекомендувати обробку ПАЩ з $N=10$ подв.х. При обробці зразків, виготовлених з матеріалу ЕП718, видно,

що при збільшенні кількості подвійних ходів радіус заокруглення практично не змінюється і встановлювати кількість подвійних ходів N більше 3 не є доцільним (рис. 3.10).

Таблиця 3.7 – Залежність радіусів заокруглення r від кількості подвійних ходів N для зразків, виготовлених з матеріалу 2М2А

Кількість подвійних ходів N , подв.х.	Радіус заокруглення r , мм
1	1,22
3	1,29
5	1,4
10	2,69



а) $N=1$ подв.х.



б) $N=3$ подв.х.



в) $N=5$ подв.х.



г) $N=10$ подв.х.

Рисунок 3.7 – Загальний вигляд радіусів заокруглення після обробки ПАЩ зразка виготовленого з матеріалу 2М2А при зміні кількості подвійних ходів

Щільність і пористість матеріалу зразків (рис. 3.7 і 3.8) впливає на

рівномірність мікропрофілю поверхні радіусу заокруглення. Матеріал ЕП718 більш щільний з меншою кількістю пор, тому поверхня скруглення рівна і гладка(рис. 3.8), на відміну від зразків з 2М2А (рис. 3.7).

Таблиця 3.8 – Залежність радіусів заокруглення r від кількості подвійних ходів N для зразків, виготовлених з матеріалу ЕП718

Кількість подвійних ходів N , подв.х.	Радіус заокруглення r , мм
1	0,87
3	1,12
5	1,2
10	1,34



а) $N=1$ подв.х.



б) $N=3$ подв.х.



в) $N=5$ подв.х.



г) $N=10$ подв.х.

Рисунок 3.8 – Загальний вигляд радіусів заокруглення після обробки ПАЩ зразка виготовленого з матеріалу ЕП718 при зміні кількості подвійних ходів

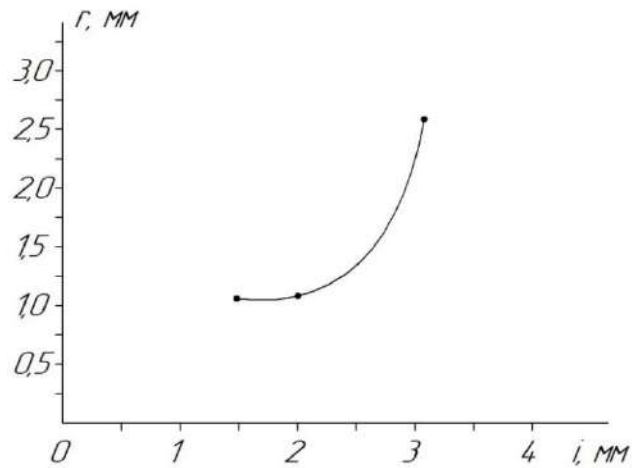


Рисунок 3.9 – Графік залежності радіусів заокруглення r від натягу i для зразків, виготовлених з матеріалу 2M2A

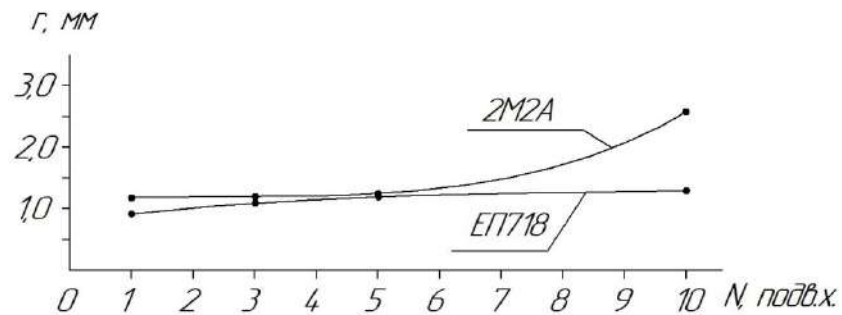


Рисунок 3.10 – Залежність радіусів заокруглення r від кількості подвійних ходів N

Таким чином для отримання максимального радіусу заокруглення на деталях виготовлених 3D-друком або методом спікання з матеріалів 2M2A і ЕП718 необхідно використовувати наступні режими різання:

- матеріал зразка 2M2A: натяг $i=3$ мм, кількість подвійних ходів $N=10$ подв.х., повздовжня подача $S=1$ м/хв.;
- матеріал зразка ЕП718: натяг $i=3$ мм, кількість подвійних ходів $N=5$ подв.х., повздовжня подача $S=1$ м/хв.

Якщо необхідно просто видалити задирки і одночасно скруглити гостру крайку мінімальним радіусом 0,5 мм, достатньо встановити режими, мінімальні з досліджуваних діапазонів натяг $i=1,5$ мм, кількість подвійних ходів $N=1$ подв.х., повздовжня подача $S=1$ м/хв.

4 РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ

4.1 Вихідні дані

Для розрахунку на міцність використовували програмний міцностний пакет ANSYS, заснований на методі скінченних елементів (МСЕ). Метод скінченних елементів – це потужний метод, розроблений для чисельного розв'язування складних проблем у механіці конструкцій та інших математичних задач, і наразі широко застосовується для розв'язування різноманітних складних систем. У МСЕ, структурна модель записується набором скінченних елементів, взаємопов'язаних у дискретних точках, вузлах, параметри, властивості яких записуються системою відповідних рівнянь. Елементи можуть мати фізичні властивості, такі як товщина, коефіцієнт теплового розширення, щільність, модуль Юнга, модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона.

З метою оцінки впливу на напружено-деформований стан (НДС) наявності і величини радіусів заокруглень, було взято спрощену модель одного з кронштейнів кріплення авіаційного двигуна, який використовується при його транспортуванні (рис. 4.1), умовно з матеріалу ЕП718.

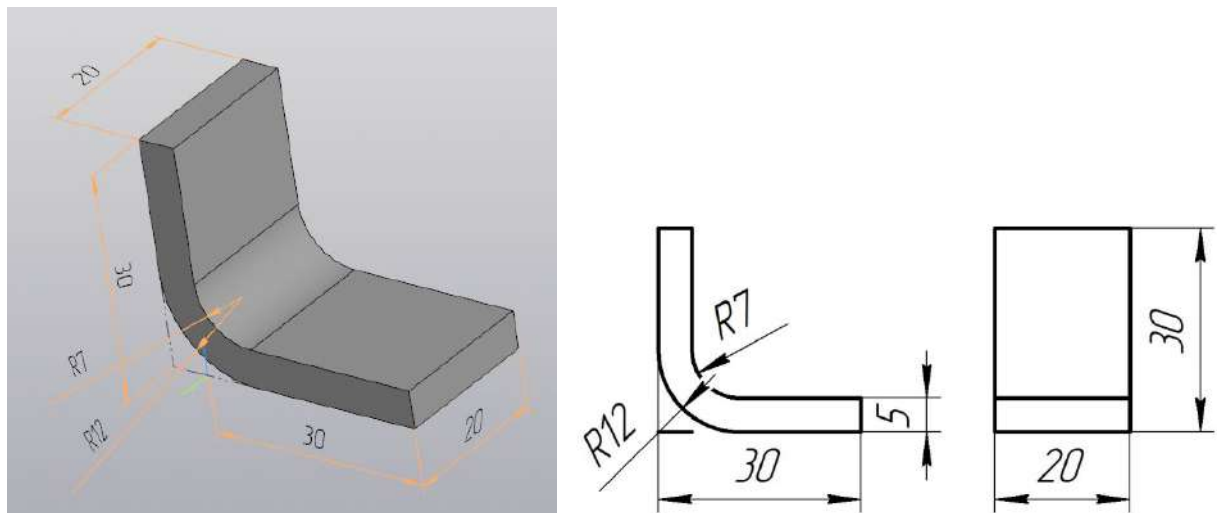


Рисунок 4.1 – Модель та ескіз кронштейну

4.2 Розрахунок на міцність

При розрахунку деталі на міцність першим етапом є побудова моделей і завдання властивостей досліджуваного матеріалу (густина матеріалу ρ , модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона μ). Для матеріалу ЕП718 вони наступні:

- $\rho=8320 \text{ кг/м}^3$;
- $E=2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;
- $\mu=0,32$.

Далі деталь необхідно розбити на скінчені елементи (рис. 4.2). Розмір скінченого елемента становив $0,0001 \text{ м}$, щоб достатньо правильно вписатись у всі радіуси скруглення моделей.

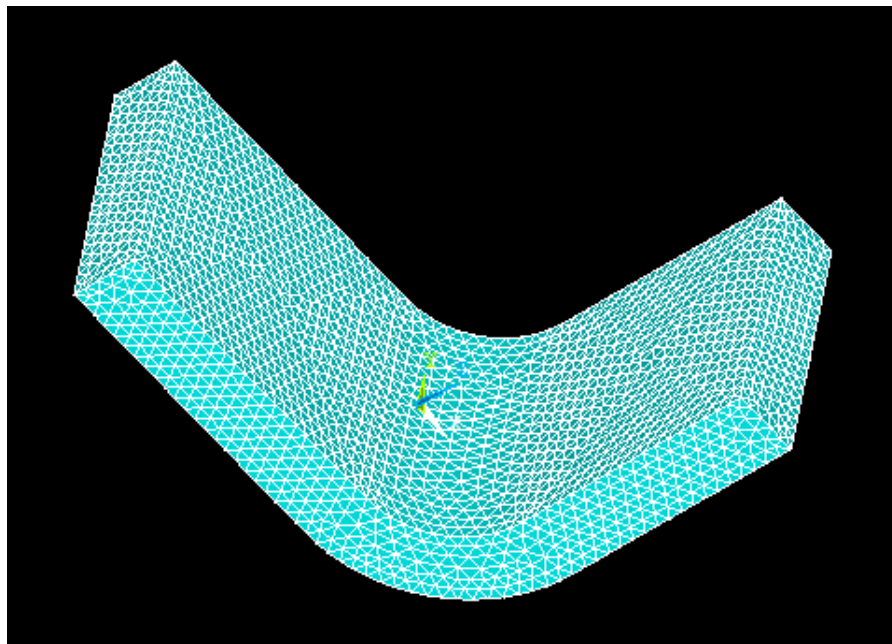


Рисунок 4.2 – 3D-модель деталі, розбитої на скінченні елементи

Далі до моделі кронштейну було прикладено граничні умови, тобто необхідно закріпити та прикласти навантаженнями, еквівалентні експлуатаційним (рис. 4.3). Закріплюємо по задній поверхні та прикладаємо

навантаження $\sigma=5$ МПа на передню верхню поверхню кронштейну. Після цього проводимо міцностний розрахунок.

4.3 Результати розрахунків

Результатом розрахунку НДС моделі є картина розподілу максимальних напружень в деталі залежно від навантаження (рис. 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12) та максимального прогину в деталі від навантаження (рис. 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13) в залежності від радіусу заокруглення гострих кромek. Результати розрахунків наведено в таблиці 4.1.

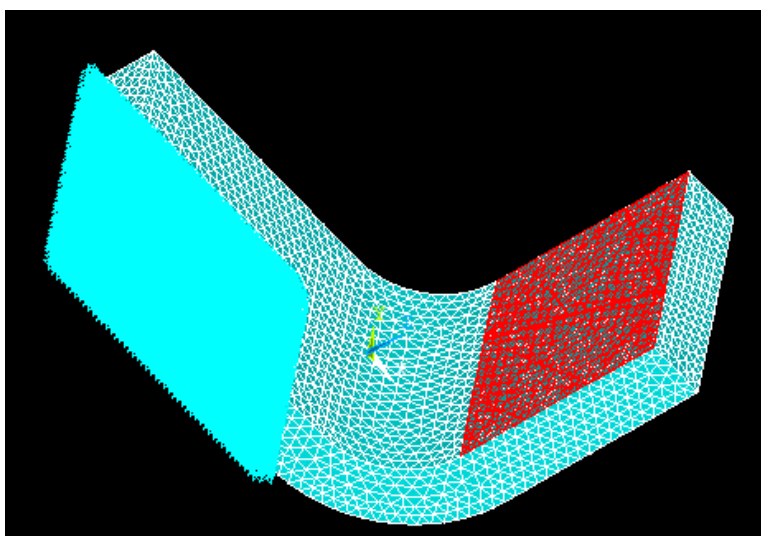


Рисунок 4.3 – 3D-модель деталі з граничними умовами - поверхнями закріплення та навантаження

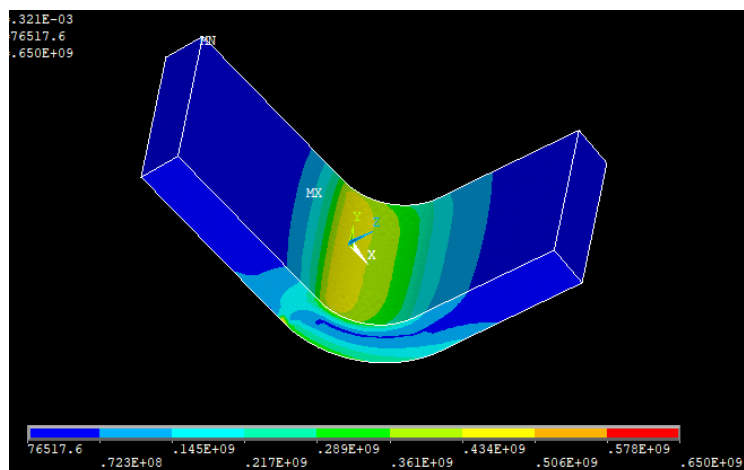


Рисунок 4.4 – Максимальні напруження на моделі без радіуса заокруглення гострих кромek

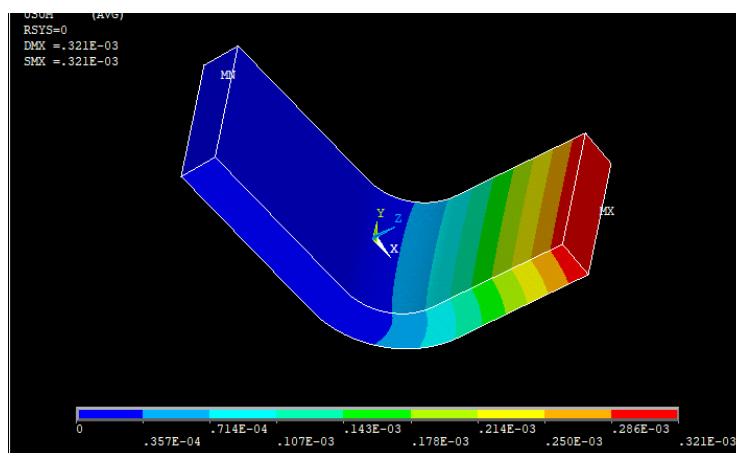


Рисунок 4.5 – Прогин моделі без радіуса заокруглення

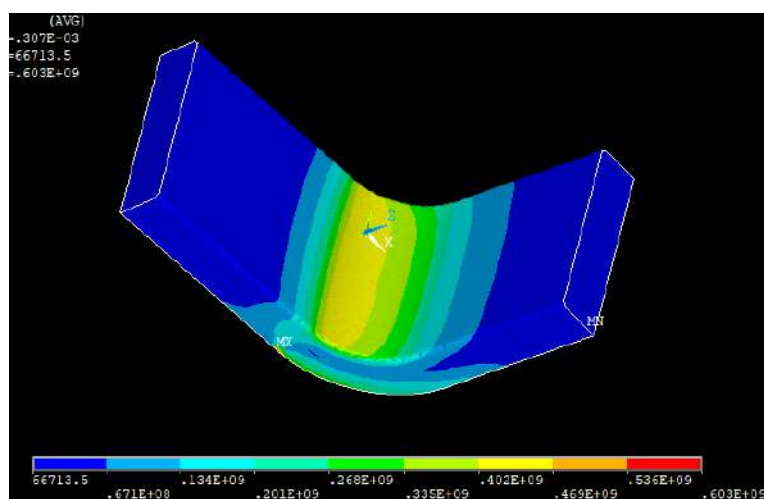


Рисунок 4.6 – Максимальні напруження на моделі з радіусом заокруглення гострих кромek $r=0,5$ мм

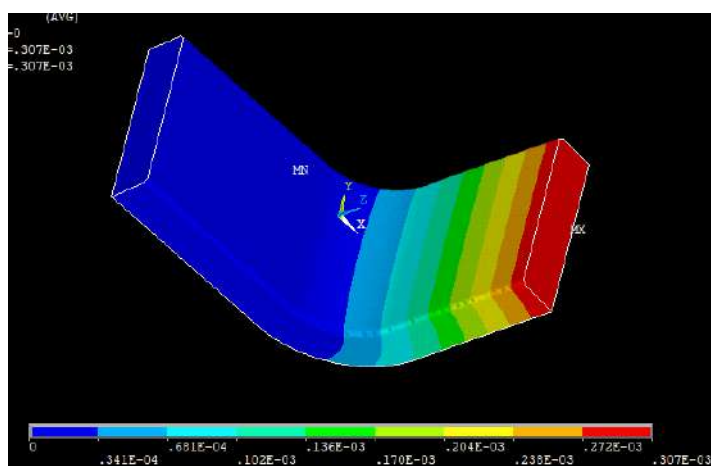


Рисунок 4.7 – Прогин моделі з радіусом заокруглення гострих кромок $r=0,5$ мм

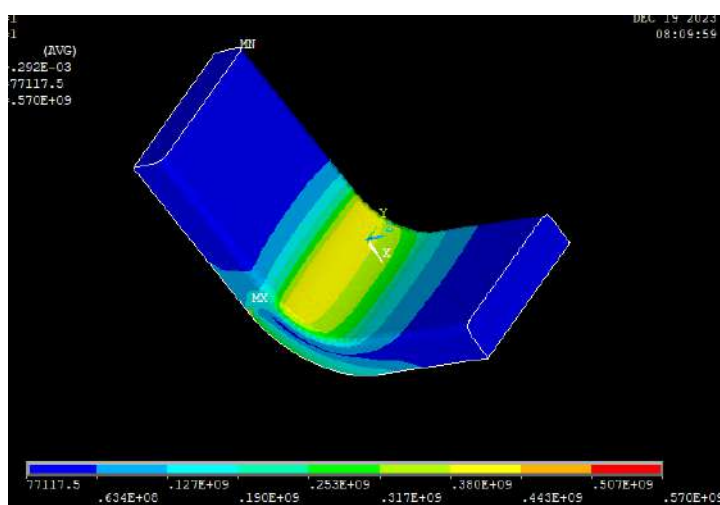


Рисунок 4.8 – Максимальні напруження на моделі з радіусом заокруглення гострих кромок $r=1,0$ мм

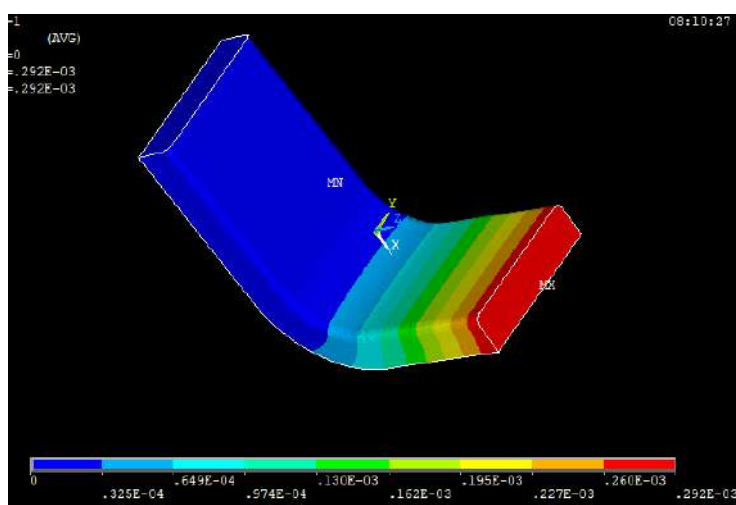


Рисунок 4.9 – Прогин моделі з радіусом заокруглення гострих кромок $r=1,0$ мм

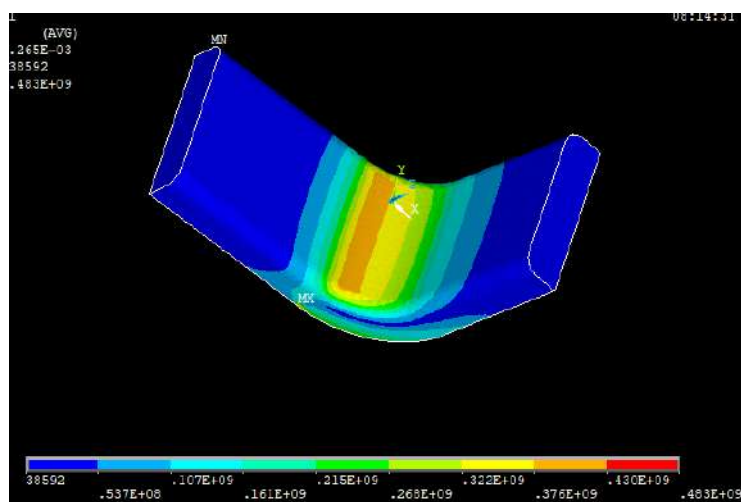


Рисунок 4.10 – Максимальні напруження на моделі з радіусом заокруглення гострих кромek $r=2,0$ мм

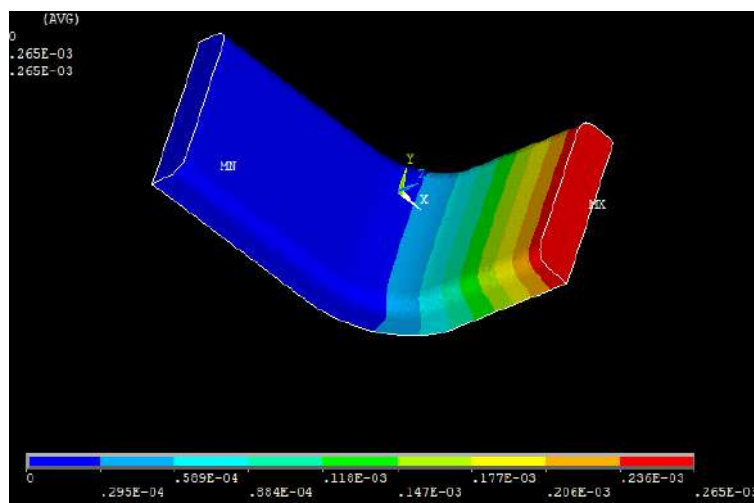


Рисунок 4.11 – Прогин моделі з радіусом заокруглення гострих кромek

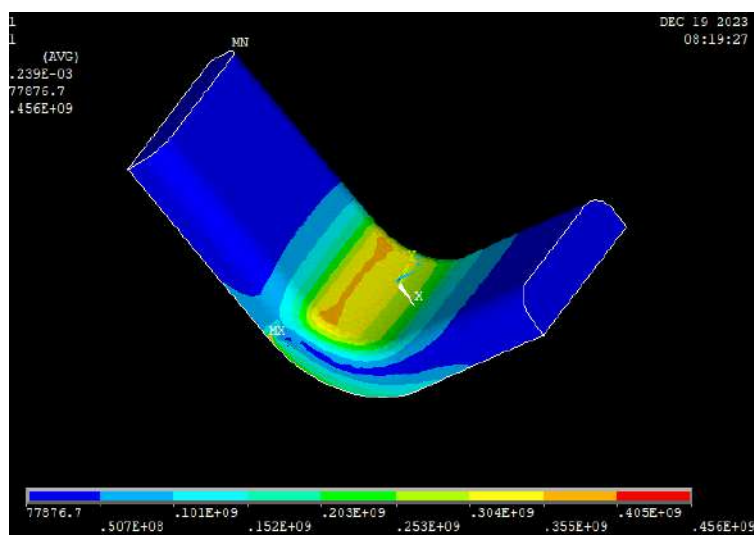
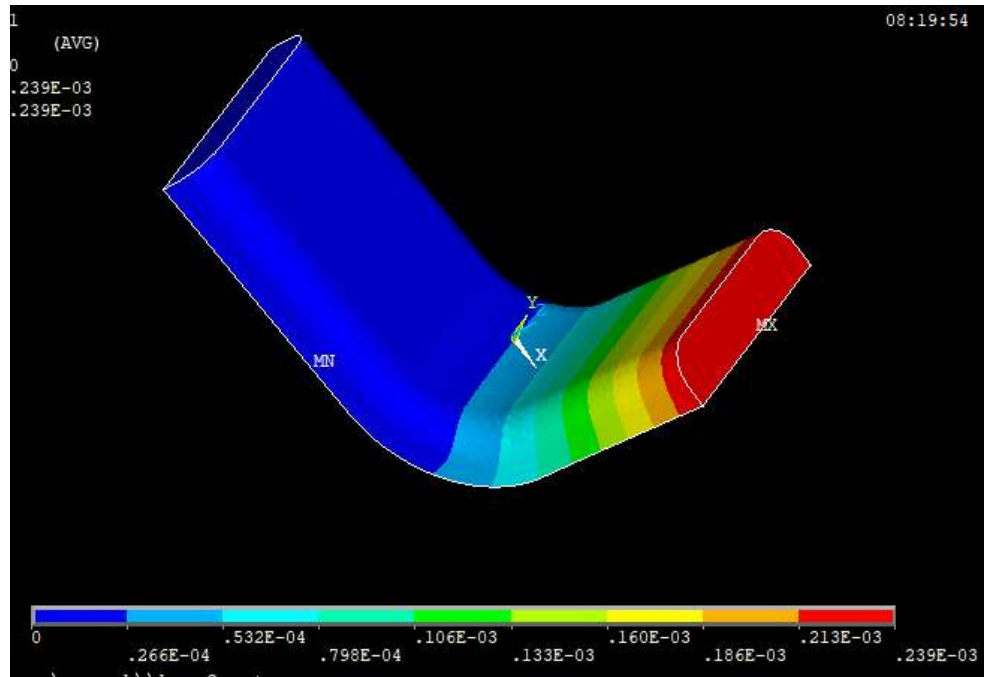


Рисунок 4.12 – Максимальні напруження моделі з радіусом $r=3,0$ ммРисунок 4.13 – Прогин моделі з радіусом заокруглення гострих кромки $r=3,0$ мм

Після розрахунку на міцність проводимо розрахунок коефіцієнту запасу міцності по напруженням та коефіцієнту запасу міцності за деформацією.

Таблиця 4.1 – Результати розрахунків залежності максимальних напружень та максимального прогину в моделі від радіусів заокруглень

№ досл.	Радіус r , мм	σ_{max} , МПа	n_σ	Δy_{max} , мм	$n_{\Delta y}$
1	-	650	1,8	0,32	2,5
2	0,5	603	1,9	0,31	2,6
3	1,0	570	2,1	0,29	2,8
4	2,0	483	2,4	0,27	3,0
5	3,0	456	2,6	0,24	3,5

Максимальна деформація кронштейну – прогин консольної частини

по вісі ОУ, він і дорівнює сумарній максимальній еквівалентній деформації. Коефіцієнти запасу міцності [44] розраховуємо за формулами (4.1) та (4.2):

$$n_{\sigma} = [\sigma] / \sigma_{\max}, \quad (4.1)$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу, границя міцності σ_{σ} , МПа. Для матеріалу ЕП718 $[\sigma] = 1175$ МПа;

$\sigma_{\max}$ – максимальне напруження в моделі, МПа.

$$n_{\Delta y} = [\Delta y] / \Delta y_{\max} \quad (4.2)$$

де $[\Delta y]$ – допустимий прогин в моделі, мм. Для даної деталі – кронштейну, він складає 0,6 мм, тобто задаємо $[\Delta y] = 0,0006$ м;

$\Delta y_{\max}$ – максимальний прогин в деталі від дії навантаження, мм.

Результати розрахунку коефіцієнтів запасу міцності та запасу прогину після розрахунків були занесені до таблиці (див. таблицю 4.1).

За результатами проведених експериментів та розрахунків були побудовані наступні графіки:

- графік залежності максимального напруження $\sigma_{\max}$ в деталі від наявності і величини радіусів заокруглення гострих кромek r (рис. 4.14),
- графік залежності коефіцієнту запасу міцності по напруженням n_{σ} від максимального напруження в деталі $\sigma_{\max}$ (рис. 4.15);
- графік залежності коефіцієнту запасу міцності по деформації $n_{\Delta y}$ від максимального прогину в деталі $\Delta y_{\max}$ (рис. 4.16).

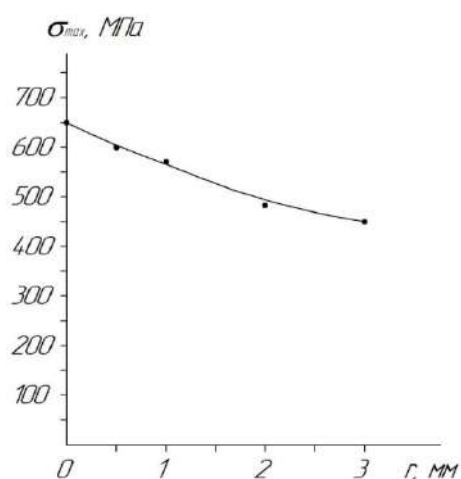


Рисунок 4.14 – Графік залежності максимального напруження σ_{max} в деталі від радіусів заокруглення r

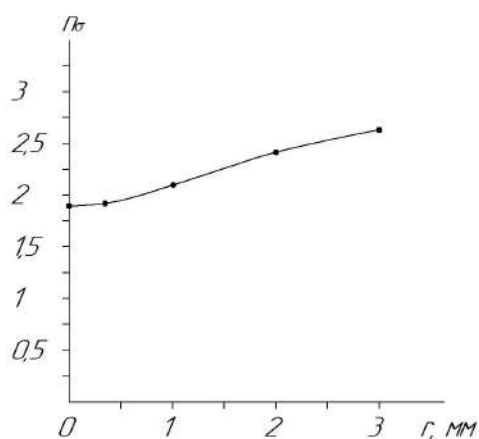


Рисунок 4.15 – Графік залежності коефіцієнту запасу міцності n_{σ} від радіусів заокруглення r

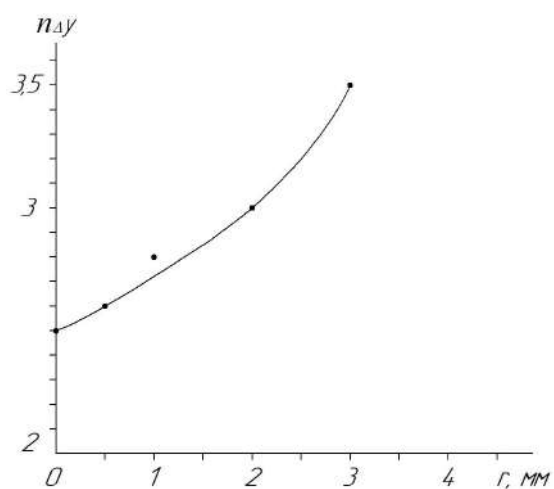


Рисунок 4.16 – Графік залежності коефіцієнту запасу прогину $n_{\Delta y}$ від радіусів заокруглення r

Як видно з графіків при знятті гострої кромки та утворення радіусу заокруглення на кромці деталі максимальне напруження в деталі зменшується на 30%, запас міцності росте та зменшується прогин.

5 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ

Більшість методів фінішного оброблення мають низку суттєвих недоліків – невисоку продуктивність, складність інструменту та оснащення, високу вартість обладнання. Ручне полірування деталей отриманих 3D-принтером не дозволяє отримати високої якості обробки, крім того, має невисоку стійкість, високу собівартість та низьку продуктивність праці.

Полімерно-абразивні щітки є достатньо новими інструментами фінішної обробки, вони забезпечують високу якість оброблюваної поверхні з мінімальним навантаженням на деталь. Використання полімерно-абразивних щіток обробка деталей отриманих 3D-принтером стала легшою, з'явилась можливість округляти гострі кромки при цьому зберігаючи форму вихідного виробу.

На основі системного аналізу і узагальнення досвіду, фінішного оброблення деталей отриманих 3D-принтером полімерно-абразивними щітками, визначено, що використання щіткових інструментів обертальної дії на основі полімерно-абразивних волокон, забезпечує високу якість і продуктивність виробу та знижують собівартість виготовлення.

Використання полімерно-абразивних щіток для фінішного оброблення деталей отриманих 3D-принтером дозволяє отримати високі експлуатаційні характеристики, скорочення долі ручної праці та підвищення продуктивності оброблення.

Використання полімерно-абразивних щіток при декоративній чистовій обробці деталей отриманих 3D-принтером дозволило отримувати більш контрольовану якість оброблюваної поверхні при відсутності дефектів. Висока еластичність полімерно-абразивних волокон виключає можливості поломок щетини, що дозволяє застосовувати такий інструмент як для ручної, так і автоматичної обробки, причому в останньому випадку різко знижуються вимоги до точності підведення інструменту до оброблюваної поверхні, що

дозволяє застосовувати їх в робототехніці і верстатах з ЧПУ. Полімерна основа волокон не абсорбує охолоджуючих або мастильних засобів, тому щітки придатні як для сухого, так і мокрого шліфування.

Фінішне оброблення деталей отриманих 3D-принтером вимагає певних витрат, розглянемо та розрахуємо їх відповідно до формул [45]. Результати зведемо в таблицю 5.1.

Витрати на інструмент для фінішної обробки полімерно-абразивними щітками включають витрати на полімерно-абразивні щітки у кількості 50 одиниць по 1820 грн. за одиницю, разом витрати складають:

$$S_{in1}=50 \cdot 1820 = 91000 \text{ грн. чи 91 тис.грн.}$$

Витрати на інструмент для фінішної обробки вручну включають витрати на абразивні круг у кількості 400 одиниць по 362,5 грн. за одиницю, разом витрати складають:

$$S_{in2}=400 \cdot 362,5 = 145000 \text{ грн. чи 145 тис.грн.}$$

Витрати на електроенергію для фінішної обробки полімерно-абразивними щітками включають витрати у кількості 13050 кВт по 6 грн. за кВт, разом витрати складають:

$$S_{el1}=13050 \cdot 6 = 78300 \text{ грн. чи 78,3 тис.грн.}$$

Витрати на електроенергію для фінішної обробки вручну включають витрати у кількості 27600 кВт по 6 грн. за кВт, разом витрати складають:

$$S_{el2}=27600 \cdot 6 = 165600 \text{ грн. чи 165,6 тис.грн.}$$

Місячний фонд заробітної плати для фінішної обробки полімерно-

абразивними щітками складає:

$$S_{\text{зпм1}} = 1 \cdot 13,5 = 13,5 \text{ тис.грн.}$$

Таблиця 5.1 – Економічний розрахунок впровадження фінішного оброблення деталей отриманих 3D-принтером полімерно-абразивними щітками

№	Показник	До провадження	Після впровадження	Економія (-) / Витрати (+)
1	2	3	4	5
1	Програма випуску, одиниць деталей	1000	1000	0
2	Витрати на інструмент для фінішної обробки, тис.грн.	145	91	-54
3	Витрати на електроенергію, тис.грн.	165,6	78,3	-87,3
4	Кількість працівників, осіб	6	1	-5
5	Середньомісячна заробітна плата, тис.грн.	12	13,5	+1,5
6	Місячний фонд заробітної плати, тис.грн.	72	13,5	-58,5
7	Річний фонд заробітної плати, тис.грн.	864	162	-702

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
8	ЄСВ, тис.грн.	190,08	35,64	-154,44
9	Разом витрати, тис.грн.	1364,68	366,94	-997,74
10	Витрати на одну деталь, грн.	1364,68	366,94	-997,74

Річний фонд заробітної плати для фінішної обробки полімерно-абразивними щітками складає:

$$S_{зпр1}=13,5 \cdot 12=162 \text{ тис.грн.}$$

$$S_{есв1}=162 \cdot 0,22=35,64 \text{ тис.грн.}$$

Місячний фонд заробітної плати для фінішної обробки вручну складає:

$$S_{зпм2}=6 \cdot 12=72,00 \text{ тис.грн.}$$

Річний фонд заробітної плати для фінішної обробки вручну складає:

$$S_{зпр2}=72 \cdot 12=864 \text{ тис.грн.}$$

$$S_{есв2}=864 \cdot 0,22=190,08 \text{ тис.грн.}$$

Результати проведеного економічного розрахунку представлено в таблиці 5.1.

Оцінка економічної ефективності показала, що за рахунок впровадження фінішного оброблення полімерно-абразивними щітками деталей, отриманих 3D-принтером, скоротяться витрати на інструмент, адже полімерно-абразивні щітки більш витривалі та довговічні.

Крім того, скоротяться витрати на електроенергію, через скорочення витрат на необхідність освітлення приміщення для працівників, що займались ручним поліруванням, а також тривалість роботи обладнання полімерно-абразивними щітками значно коротше, ніж ручним шляхом.

Також слід відзначити, що реалізація проекту дозволить зменшити кількість задіяного персоналу до 1 особи, тобто значно скоротяться витрати на оплату праці та ЄСВ. В абсолютному вираженні економія складе:

- на річний фонд оплати праці 702 тис.грн.;
- на відрахування ЄСВ 154,44 тис.грн.

Разом витрати до впровадження проекту склали:

$$S_{\Sigma \text{до вп}} = 145 + 165,6 + 864 + 190,08 = 1364,68 \text{ тис.грн.}$$

Разом витрати після впровадження проекту складуть:

$$S_{\Sigma \text{після вп}} = 91 + 78,3 + 162 + 35,64 = 366,94 \text{ тис.грн.}$$

Річна економія:

$$S_{\text{річ}} = 366,94 - 1364,68 = -997,74 \text{ тис.грн.}$$

Тобто за рахунок впровадження фінішного оброблення деталей отриманих 3D-принтером полімерно-абразивними щітками витрати на рік зменшаться на 997,74 тис.грн.

Розрахуємо умовно річний економічний ефект за формулою (5.1) [46, с. 6]:

$$E_{\text{ур}} = (C_1 - C_2) \cdot N \quad (5.1)$$

де C_1 - собівартість одиниці продукції після впровадження змін, грн.;

C_2 - собівартість одиниці продукції до впровадження змін, грн.;

N - річний випуск продукції, шт.

$$E_{up} = (366,94 - 1364,68) \cdot 1000 = -997,74 \text{ тис.грн.}$$

Таким чином, встановлено, що автоматизація процесу фінішної обробки деталей отриманих 3D-принтером, дозволила повністю усунути ручну працю, геометрія та шорсткість деталей значно покращилася, собівартість обробки зменшилась на 997,74 грн. на одну деталь, значно скоротилась тривалість процесу фінішної обробки.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Заходи по забезпеченню пожежної безпеки

Згідно стандарту ДСТУ Б В.1.1-36:20016 приміщення, в якому проводимо дослідження відноситься до найменш небезпечної категорії Д [47]. Це аудиторія 2а у головному корпусі НУ «Запорізька політехніка».

Категорія приміщення Д - знижено пожежонебезпечна. У цьому приміщенні знаходяться: речовини і матеріали, що відносяться до категорій приміщень А, Б і В (крім горючих газів, горючих пилу та волокон), а також негорючі речовини та матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться зазначені вище речовини та матеріали, не відносяться до категорій А, Б, В. [48]

Також у приміщенні передбачений вогнегасник ОУ- 2 у кількості 1 штуки (рис. 6.1).

Вогнегасники були і залишаються одним із найбільш затребуваних засобів боротьби з пожежею. У деяких випадках за допомогою вогнегасників можна ліквідувати вогнище загорання власними силами ще на перших незначних проявах.

Вогнегасник вуглекислотний ВВК-1,4 (ОУ-2) призначений для гасіння загорянь різних горючих речовин, горіння яких не може відбуватися без доступу повітря, на промислових підприємствах, на транспортних засобах, загорянь електроустановок, що знаходяться під напругою не більше 1000 В.

Використання переносного вуглекислотного вогнегасника ОУ- 2: піднести вогнегасник до осередку пожежі, з урахуванням безпечного від теплового впливу відстані; висмикнути чеку, направити сопло на вогнище загорання і натиснути ручку клапана запірною пристрою. Треба дотримуватися обережності при випуску заряду з розтруба, тому, що температура його поверхні знижується до мінус 60- 70 градусів. Крім того, на

поверхні розтруба може концентруватися електростатична напруга, здатна пробити діелектричну рукавичку. При гасінні електроустановок, що знаходяться під напругою, не допускається підводити розтруб ближче 1 метра до електроустановки і полум'я.

Гарантійний термін експлуатації вогнегасника ОУ- 2 становить 24 місяці з дня приймання ВТК, куди входить і термін зберігання. Його заборонено встановлювати поблизу нагрівальних приладів, він повинен бути захищений від впливу сонячних променів. Вогнегасник ОУ- 2 підлягає періодичній перевірці один раз на півроку на герметичність і відповідність ваги паспортним даним. Якщо вага балона нижче передбаченого технічними характеристиками або закінчився термін опосвідчення балона, він підлягає перевірці й перезарядці на спеціалізованій станції перезарядки і технічного обслуговування. [49]



Рисунок 6.1 - Вогнегасник вуглекислотний ВВК-1,4 (ОУ-2).

Переваги вуглекислотних вогнегасників: універсальність застосування, висока надійність, відмовостійкість; застосування не призводить до забруднення об'єкта, у якому проводиться гасіння пожежі;

широкий діапазон температур використання від - 40 до + 50 градусів.

Недоліки вуглекислотних вогнегасників: заборонено використання при займанні лужноземельних та лужних металів; накопичення на корпусі вогнегасника статичної електрики при його використанні за прямим призначенням; токсичний вплив на людину, при гасінні загоряння у замкнутому просторі; необхідність обов'язкового провітрювання об'єкта після використання у замкнутому просторі; незначне зниження ефективності використання за низьких температур; при попаданні на відкриті ділянки шкіри спричиняє сильне обмороження; концентрація CO₂ в навколишньому просторі, викликає параліч дихальних шляхів. [50]

Для швидкої евакуації передбачено: аварійне освітлення; двері в аудиторії 2а відчиняються назовні.

Своїм дослідникам у моїй науковій роботі, ми забезпечили безпеку, продумавши всі заходи щодо пожежної безпеки.

6.2 Розрахунок загального рівномірного штучного освітлення в лабораторії

Вихідні дані: довжина виробничого приміщення A=4,5 м; ширина виробничого приміщення B=6,5 м; висота виробничого приміщення H=4 м; нормоване значення освітленості E_н=300 лк.

Основним розрахунковим рівнянням методу світлового потоку є:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E_{\text{н}} \cdot S \cdot k_3 \cdot z}{N \cdot n \cdot \eta} \quad (6.1)$$

де $\Phi_{\text{л}}$ – розрахункове значення світлового потоку однієї лампи в кожному світильнику, лм;

E_н – нормоване значення освітленості, лк;

- S – площа освітлюваної поверхні, m^2 ;
 k_z – коефіцієнт запасу;
 z – коефіцієнт мінімальної освітленості;
 N – загальна кількість світильників;
 n – кількість ламп у одному світильнику;
 η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Виходячі з умов вибираємо систему комбінованого освітлення (додат. А [50]).

Виходячи із розряду зорових робіт, фону, контрасту об'єкта з фоном, системи освітлення вибираємо обираємо лампу з рівнем нормованої освітленості $E_n=300$ лк (дод. А [51]).

В залежності від умов виробничого середовища і класу освітлюваного приміщення за вибухопожежонебезпекою вибираємо економічне джерело світла: люмінесцентні лампи [51].

Вибираємо тип світильника ЛПО так як в нас лабораторія з висотою приміщення 4 м, коефіцієнт світильника $L/h=1,4$ (додат. В, Г[51]).

Оцінюємо коефіцієнт запасу (k_z) освітленості та коефіцієнт нерівномірності освітлення (z) (дод. Г, табл.4 [51]). Коефіцієнт запасу $k_z=1,6$, коефіцієнт нерівномірності освітлення $z=1,11$.

Визначаємо коефіцієнти відбиття світлового потоку від стелі ($\rho_C=70\%$), стін ($\rho_{CT}=50\%$) та підлоги ($\rho_{II}=30\%$) у приміщенні (дод. Г, табл.5 [51]) для світлих приміщень.

Визначаємо значення індексу приміщення (i), що характеризує співвідношення розмірів освітлюваного приміщення і висоти розміщення світильників.

Чисельне значення індексу приміщення визначається за рівнянням:

$$i = \frac{AB}{h(A+B)} \quad (6.2)$$

де A – довжина приміщення, м;

B – ширина приміщення, м;

h – висота розміщення світильників над робочою поверхнею, м.

$$i = \frac{4,5 \cdot 6,5}{2,8 \cdot (4,5 + 6,5)} = 0,95$$

Загальна висота приміщення включає наступні складові:

$$H = h + h_p + h_3 \quad (6.3)$$

де H – висота виробничого приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні над підлогою, м; (як правило, висота умовної робочої поверхні $h_p = 0,8$ м);

h_3 – висота звисання світильника від стелі, м; (може вибиратися за технологічною доцільністю).

Визначення h і h_3 проводили за наступною послідовністю:

а) розраховували кількість рядів світильників у приміщенні:

$$N_p = \frac{B}{(H - h_p) \cdot [L/h]} \quad (6.4)$$

де $[L/h]$ – числове значення коефіцієнта світильника (дод. В) [51].

$$N_p = \frac{6,5}{(4 - 0,8) \cdot 1,4} = 1,45$$

Округлюємо до цілого значення $N_p = 2$.

б) визначаємо максимально припустиму відстань між рядами світильників:

$$L_{max} = \frac{B}{N_p}, \text{ м} \quad (6.5)$$

$$L_{max} = \frac{6,5}{2} = 3,25 \text{ м}$$

в) розраховуємо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = \frac{L_{max}}{[L/h]}, \text{ м} \quad (6.6)$$

$$h = \frac{3,25}{1,4} = 2,32 \text{ м}$$

г) знаходимо висоту звисання світильника від стелі:

$$h_3 = H - h_p - h, \text{ м} \quad (6.7)$$

$$h_3 = 4 - 0,8 - 2,32 = 0,88 \text{ м}$$

За довідковою таблицею (дод. Д [51]) визначаємо значення коефіцієнта використання світлового потоку (η), створюваного світильниками вибраного типу. $\eta=42\%$.

Визначення світлового потоку лампи:

а) визначаємо сумарний світловий потік освітлювальної установки у даному виробничому приміщенні:

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot S \cdot k_3 \cdot z}{\eta} \quad (6.8)$$

де Φ_{Σ} – розрахункове значення сумарного світлового потоку у приміщенні, лм;

E_n – нормоване значення освітленості, лк;

S – площа освітлюваної поверхні, м²;

k_3 – коефіцієнт запасу;

z – коефіцієнт нерівномірності (мінімальної) освітленості;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{300 \cdot 29,25 \cdot 1,6 \cdot 1,11}{0,42} = 37106 \text{ лм}$$

б) визначаємо розрахункову загальну кількість світильників N^* у приміщенні, виходячи з позиції розташування їх у вершинах квадрата:

$$N^* = AB/L_{max}^2$$

$$L_{max} = \frac{6,5}{2} = 3,25 \text{ м} \quad (6.9)$$

де (L_{max} визначається за формулою 5.5).

$$N^* = 4,5 \cdot 6,5 / 3,25^2 = 2,76 = 3 \text{ шт}$$

в) визначаємо розрахунковий світловий потік лампи Φ_L^* :

$$\Phi_L^* = \frac{\Phi_{\Sigma}}{N_L}, \text{ лм} \quad (6.10)$$

де N_L – загальна кількість ламп у приміщенні;

$$N_L = N^* \cdot n \quad (6.11)$$

n – кількість ламп у світильнику.

$$\Phi_L^* = \frac{37106}{6} = 6184 \text{ лм}$$

г) вибираємо з дод. Б [51] тип стандартної лампи з найближчими значеннями фактичного світлового потоку лампи Φ_L і знаходимо коефіцієнт пропорційності m :

$$m = \Phi_L^* / \Phi_L \quad (6.12)$$

Φ_L вибираємо з таблиці 1 додадок Б [51]. $\Phi_L = 5400 \text{ лм}$

$$m = 6184 / 5400 = 1,15$$

д) визначаємо оптимальну кількість світильників у приміщенні:

$$N = N^* \cdot m \quad (6.13)$$

$$N=3 \cdot 1,15=3,45 \text{ шт}$$

Округлюємо до 4 шт.

Визначаємо загальну розрахункову освітленість (E_p) у приміщенні, що створюється при застосуванні стандартних ламп.

$$E_p = \frac{\Phi_{\text{л}} \cdot N_{\text{фл}} \cdot \eta}{S \cdot k_3 \cdot z} \quad (6.14)$$

$$E_p = \frac{5400 \cdot 8 \cdot 0,42}{29,25 \cdot 1,6 \cdot 1,11} = 349 \text{ лк}$$

Розраховуємо сумарну потужність освітлювальної установки:

$$P_{\Sigma} = N_{\text{фл}} \cdot P_{\text{л}} \quad (6.15)$$

де $P_{\text{л}}$ – потужність вибраної стандартної лампи (додат. Б) [51].

$$P_{\Sigma} = 8 \cdot 80 = 640 \text{ Вт}$$

За результатами розрахунків виконуємо схему розміщення світильників у робочому приміщенні (рис. 6.2).

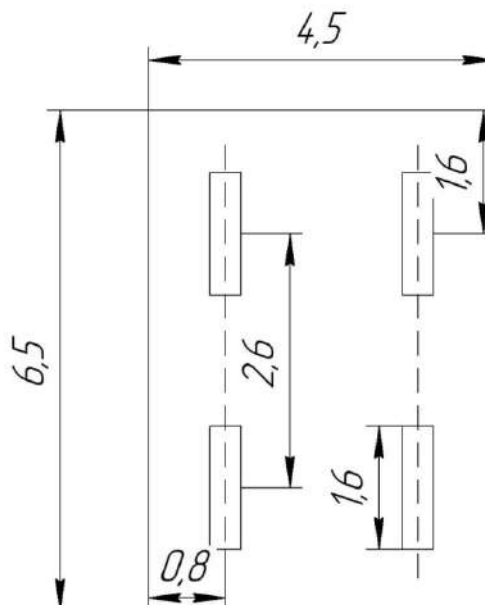


Рисунок 6.2 – Схема розміщення світильників у робочому приміщенні

7 ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. У випадку обробки полімерно-абразивними щітками деталей, виготовлених з матеріалу 2М2А, для отримання найкращої якості поверхні полірування ПАЩ слід проводити з наступними режимами: швидкість обертання ПАЩ $V=17$ м/с, натяг $i=2$ мм, кількість подвійних ходів $N=10$ под.х., подача $S=1$ м/хв.

2. У випадку обробки полімерно-абразивними щітками деталей, виготовлених з матеріалу ЕП718, для отримання найкращої якості поверхні обробку слід проводити з наступними режимами: швидкість обертання ПАЩ $V=17$ м/с, натяг $i=2$ мм, кількість подвійних ходів $N=3$ под.х., подача $S=1$ м/хв.

3. Для отримання максимально можливого радіусу заокруглення на деталях, виготовлених 3D-друком або методом спікання з матеріалів 2М2А і ЕП718, необхідно використовувати наступні режими різання:

- матеріал зразка 2М2А: натяг $i=3$ мм, кількість подвійних ходів $N=10$ подв.х., подача $S=1$ м/хв.;

- матеріал зразка ЕП718: натяг $i=3$ мм, кількість подвійних ходів $N=5$ подв.х., подача $S=1$ м/хв.

4. Якщо необхідно просто видалити задирки і одночасно скруглити гострі крайки мінімальним радіусом 0,5 мм, достатньо встановити режими, мінімальні з досліджуваних діапазонів: натяг $i=1,5$ мм, кількість подвійних ходів $N=1$ подв.х., повздовжня подача $S=1$ м/хв.

ВИСНОВКИ

За результатами виконання магістерської роботи можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що застосування постдрукової обробки, фінішингу та зміцнення деталей, виготовлених за допомогою адитивних технологій є актуальним напрямом, який потребує дослідження. Вибір методу постдрукової обробки залежить від вимог до якості обробленої поверхні деталі та особливостей її конструкції. Обробка полімерно-абразивними щітками є раціональною альтернативою іншим методам для полірування складнопрофільних деталей, отриманих 3D-друком.

2. Проведено експериментальні дослідження фінішної обробки зразків ПАЩ, за результатами яких надані технологічні рекомендації, які можна застосувати на фінішних етапах ТП виготовлення натурних деталей з досліджених матеріалів, отриманих за допомогою 3D-друку.

3. З розрахунку на міцність моделі кронштейна було встановлено, що при знятті гострої кромки та утворення радіусів різної величини 0,5...3 мм, заокруглення на кромці деталі максимальне напруження в деталі зменшується на 30%, запас міцності росте та зменшується прогин.

4. Економічно обґрунтовано використання полімерно-абразивних щіток для фінішного оброблення деталей, отриманих 3D-принтингом. Встановлено, що автоматизація процесу фінішної обробки деталей отриманих 3D-принтингом, дозволила повністю усунути ручну працю, геометрія та шорсткість деталей значно покращилася, собівартість обробки зменшилась на 997,74 грн. на одну деталь, значно скоротилась тривалість процесу фінішної обробки.

5. В розділі охорони праці розглянуто заходи по забезпеченню пожежної безпеки, а також було розраховано необхідна норма освітлення для комфортного проведення експериментів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Liz Nickels. AM and aerospace: an ideal combination [Text] / L. Nickels // Metal Powder Report, Volume 70, Issue 6. – November–December 2015. – Pages 300-303.
2. Runze Huang. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components Author links open overlaypanel [Text] / R. Huang, M. Riddle, D. Graziano, J. Warren, S. Das, S. Nimbalkar, J. Cresko, E.Masanet // Journal of Cleaner Production, Volume 135. – 1 November 2016. – Pages 1559-1570.
3. Joel C. Najmon. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry [Text] / Joel C. Najmon, Sajjad Raeisi, Andres Tovar // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry – 2019 – Pages 7-31.
4. Altıparmak S. C., Xiao B. A market assessment of additive manufacturing potential for the aerospace industry [Text] / S. C. Altıparmak, B. Xiao // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – T. 68. – Pages 728-738.
5. Blakey-Milner B. et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review [Text] / B. Blakey-Milner, P. Gradl, G. Snedden, M. Brooks, J. Pitot, E. Lopez, M. Leary, F. Berto, A. du Plessis // Materials & Design. – 2021. – Pages 110-118.
6. Sadettin C. Challenges in additive manufacturing of high-strength aluminium alloys and current developments in hybrid additive manufacturing [Text] / Sadettin C. Altıparmak, Victoria A. Yardley, Zhusheng Shi, Jianguo Lin // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture 4 – 2021. – Pages 246-261.
7. R. Liu. Aerospace applications of laser additive manufacturing [Text] / R. Liu, Z. Wang, T. Sparks, F. Liou, J. Newkirk // Laser Additive Manufacturing. Materials, Design, Technologies, and Applications. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials – 2017. – Pages 351-371.

8. Jia Q., Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties [Text] / Q. Jia, D. Gu // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Т. 585. – С. 713-721.

9. Электронний ресурс. Режим доступу: <https://easy3dprint.com.ua/uk/aditivni-tehnologiy>.

10. Электронний ресурс. Режим доступу: <https://cusu.edu.ua/images/conf-2017-04/s2/>

11. Электронний ресурс. Режим доступу: <https://view.officeapps.live.com/op/>

12. Najmon J. C., Raeisi S., Tovar A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry [Text] / J. C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar // Additive manufacturing for the aerospace industry. – 2019. – С. 7-31.

13. Maleki E. et al. Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities [Text] / E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, M. Guagliano // Additive Manufacturing. – 2021. – Т. 37. – С. 101619.

14. Kaynak Y., Tascioglu E. Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing [Text] / Y. Kaynak, E. Tascioglu // Progress in Additive Manufacturing. – 2020. – Т. 5. – №. 2. – С. 221-234.

15. Lesyk D. A. et al. Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress [Text] / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk, V.V. Dzhemelinskyi, A. Lamikiz, G.I. Prokopenko // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 381. – С. 125136.

16. Электронний ресурс. Режим доступу: <https://tweko.com.ua/drobestrujna-ustanovka-priznachennja-princip-roboti/>.

17. Ardi D. T. et al. Effects of post-processing route on fatigue performance of laser powder bed fusion Inconel 718 [Text] / D. T. Ardi, L.

Guoweia, N. Maharjana, B. Mutiargoa, S. H. Leng, R. Srinivasana //Additive Manufacturing. – 2020. – Т. 36. – С. 101442.

18. Lesyk D. A. et al. Surface Shot Peening Post-processing of Inconel 718 Alloy Parts Printed by Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing [Text] / D.A. Lesyk, V.V. Dzhemelinskyi, S. Martinez, B.N. Mordyuk, A. Lamikiz //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – Т. 30. – №. 9. – С. 6982-6995.

19. Erfan Malekia. Application of gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment on fatigue behavior of additively manufactured AlSi10Mg [Text] / Erfan Malekia, Sara Bagherifarda, Asghar Heydari Astaraee, Simone Sgarbazzinia, Michele Bandinib, Mario Guagliano // Materials Science and Engineering: A. Volume 881, 10 August 2023, 145397.

20. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/8896980/page:6/>

21. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://what.com.ua/yltrazvykova-obrobka-tehnolog/9/>

22. D.A. Lesyk. Ultrasonic surface post-processing of hot isostatic pressed and heat treated superalloy parts manufactured by laser powder bed fusion [Text] / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk , O.O. Pedashd , V.V. Dzhemelinskyi, A. Lamikiz // Additive Manufacturing Letters 3 (2022) 100063.

23. Электронный ресурс. Режим доступа: https://studme.org/267771/tehnika/snyatie_zausentsev_prituplenie_ostryh_kromok

24. Леванцевич М.А. Технологические возможности покрытий, нанесенных металлическими щетками. *Вестник Полковского государственного университета*. Сер. В, Прикладные науки. 2003. Т. 2, №4. С. 53-55.

25. Белевский Л.С., Завалишина Е.Г. Металлизация поверхности стали металлическими щетками. *Теория и практика процессов обработки композиционных и сплошных материалов: Межвузовский сборник научных трудов*. (г. Магнитогорск, 1990 г.) Магнитогорск: МГМИ, 1990. С.88-92.

26. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справ. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
27. Степанов Д. Технологічні особливості забезпечення якості та продуктивності обробки складнопрофільних і тонкостінних деталей полімерно-абразивними інструментами [Текст] / Степанов Д.М. // Дисертація – 2019. – 223 с.
28. Внуков Ю.Н. Применение полимерно-абразивных инструментов для обработки острых кромок пазов типа «ласточкин хвост» [Текст] / Внуков Ю.Н., Гончар Н.В., Кондратюк Э.В., Степанов Д.Н. // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. – Вып. 79. – С. 14-24.
29. Гончар Н.В., Кондратюк Э.В., Степанов Д.Н. Формирование радиуса скругления острых кромок сложных пространственных форм при помощи полимерно-абразивного инструмента. Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Вип. 2 (41). Полтава, 2014. С. 178-183.
30. Абрашкевич Ю.Д., Компанцев А.Н. Расширение области применения полимерно-абразивных щеток. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 1996. №1. С. 9-14.
31. Степанов Д.М. Особливості фінішної обробки складнопрофільних і тонкостінних авіаційних деталей щітковими полімерно-абразивними інструментами : монографія / Степанов Д.М., Гончар Н.В., Кондратюк Е.В., Тришин П.Р. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 200 с.
32. Степанов Д.Н. Финишная обработка тонкостенных и сложнопрофильных деталей. Сообщение 1. Анализ финишно-отделочных методов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2015. №2. С. 122-125.
33. Яковлев Д.Р. Теоретическое и экспериментальное исследование технологических возможностей абразивно-полимерных щеток с

определением эффективных областей их использования. Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». Секция №7 «Технологии и оборудование механосборочного производства». 2010. С. 293-299.

34. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Моделирование тепловых процессов при обработке плоских поверхностей полимерно-абразивными щетками. Вестник национальной академии наук Белоруси. 2012. №4. С. 63-68.

35. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Управление тепловыми режимами при обработке плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками. Вестник Половского государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. 2012. №3. С. 90-94.

36. Абрашкевич Ю.Д. Влияние различных факторов на износостойкость абразивного инструмента. Монтажные и специальные работы в строительстве. 2008. №3. С. 9-13.

37. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Технологические возможности полимер-абразивного инструмента. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: машинообладнання. Випуск 1: Донецьк, ДонНТУ, 2004. URL: <http://ea.dgtu.donetsk.ua:8080/jspui/handle/123456789/27111>.

38. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Моделирование тепловых процессов при обработке тел вращения полимерно-абразивными щетками. Вестник национальной академии наук Белоруси. 2011. №2. С. 62-68.

39. Трошин Ф.В. Некоторые особенности применения щеток из полимерно-абразивного ворса. Автомобильная промышленность. 2008. №8. С. 35.

40. Абрашкевич Ю.Д. Рациональное применение полимерно-абразивных щеток. Монтажные и специальные работы в строительстве. 2007 №7. С. 23-26.

41. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е. Влияние колебаний волокон дисковой полимерно-абразивной щетки на ее работоспособность. Монтажные и специальные работы в строительстве. 2012. №10. С. 5-8.

42. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.Н. Устройство для очистки полимерно-абразивными щетками. Монтажные и специальные работы в строительстве. 2013. №5. С. 2-5.

43. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимераабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. №23. С. 106-108.

44. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу “Твердотільне моделювання і основи інженерних розрахунків”, частина 1, для студентів денної і заочної форми навчання спеціальності 131 "Прикладна механіка", спеціалізації «Технології машинобудування», галузь знань «Механічна інженерія» / Скл.: Гончар Н.В., Павленко Д.В., Степанов Д.М. – Запоріжжя: – НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 54 с.

45. Економіка і організація виробництва: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за технічними та інженерними спеціальностями / Петренко К. В., Скоробогатова Н. Є. - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 177 с.

46. Методичні рекомендації для дипломного проектування « Оцінка економічної ефективності технічних рішень» для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми « Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023 – 41 с.

47. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах (проектах) зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» за освітньою програмою (спеціалізація) «Технологія машинобудування»; 133 «Галузеве машинобудування» за освітньою програмою (спеціалізація) «Металорізальні

верстати та системи»; 134 «Авіаційна та ракетно- космічна техніка» за освітньою програмою (спеціалізація) «Авіаційні двигуни та енергетичні установки», «Технології виробництва авіаційних двигунів та енергетичних установок» / Укл. : В.І. Шмирко- Запоріжжя: Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 32 с.

48. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007; чинний від 2017-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Державний Стандарт України).

49. <https://pojsnab.com.ua/ukr/vognegasniki/vognegasniki-vuglekislotni/vognegasnik-vuglekislotniy-vvk1%2C4-%28ou2%29.html>

50. <https://euroservis.com.ua/preimushchestva-uglekislotnykh-ognetushiteley/>

51. Методичні вказівки до лабораторного заняття «Розрахунок загального рівномірного штучного освітлення виробничих приміщень» з дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі»: для студентів усіх спеціальностей та форм навчання /Укл. : В.І. Шмирко, О.В. Коробко, Ю.І. Троян. – Запоріжжя: каф. ОПіНС. НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 36с.