

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра конструювання машин

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ **Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО**

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Інструментальні системи

інженерного дизайну»

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Підвищення якості 3D друкованих деталей методом магнітно-абразивного оброблення.»

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи МІ-01мп

Кучерук Дмитро Валерійович _____

Науковий керівник:

Доцент, к.т.н.

Джулій Дмитро Юрійович _____

Консультант з _____:

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-наукова програма «Інструментальні системи інженерного дизайну»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Кучерука Дмитра Валерійовича

1. Тема дисертації «Підвищення якості 3D друкованих деталей методом магнітно-абразивного оброблення.», науковий керівник дисертації Джулій Дмитро Юрійович к.т.н, доцент, затверджені наказом по університету від «01» листопада 2021 р. № 3611-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: дослідження впливу магнітно-абразивного оброблення на якість поверхонь надрукованих деталей.
4. Предмет дослідження: Підвищення якості деталей після 3D друку.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Виконати аналіз проблематики пост оброблення металевих виробів після LPBF(SLM) друку; провести пошук обладнання, матеріалів, методики дослідження; провести наліз розташування оброблюваних виробів в робочій зоні установки для магнітно-абразивного оброблення, оптимізація та створення керуючої програми для друку деталей; дослідження впливу магнітно- абразивного оброблення на якість поверхонь LPBF(SLM) друкованих деталей.

АНОТАЦІЯ

Кучерук Д.В. Підвищення якості 3D друкованих деталей методом магнітно-абразивного оброблення.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – Київ, 2021.

Провівши аналіз всіх сучасних методів підвищення якості 3D друкованих деталей на прикладі зразків з різних матеріалів які друкувались на LPBF(SLM) принтері, для обробки був обраний метод магнітно-абразивної обробки. Даний метод дозволив підвищити якість оброблених поверхонь і значно покращити шорсткість поверхневого шару.

Виконані експериментальні дослідження показали, що МАО доцільно використовувати для обробки поверхонь після 3D друку, особливо якщо використовувати МАО після механічної обробки. Був проведений спрощений розрахунок положення деталей у кільцевій ванні. За допомогою МАО досягли значного покращення поверхонь деталей після 3D друку.

Ключові слова. Магнітно-абразивне оброблення, Селективне лазерне плавлення, 3D друк, пост-оброблення, магнітно-абразивний інструмент, магнітно-абразивний порошок.

SUMMARY

Kucheruk D.V. Improving the quality of 3-D printed parts by method of magneto-abrasive machining.

Thesis for a master's degree in specialty 131 - Applied mechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". - Kiev, 2018.

After analyzing all modern methods of improving the quality of surfaces of 3D printed parts on the examples of parts made of different materials that were printed on LPBF(SLM) printers, magnetic-abrasive treatment was chosen for processing. This method has improved the quality of treated surfaces and significantly improved the surface layer.

Experimental studies have shown that MAO should be used for surface treatment of 3D printing, especially if MAO is used after machining. A simplified calculation of the position of the parts in the ring bath was performed. MAO has significantly improved the surfaces of parts after 3D printing.

Keywords. Magnetic abrasive treatment, Selective laser sintering, 3D printing, post-processing, magnetic abrasive tool, magnetic abrasive powder.

РЕФЕРАТ

Актуальність дослідження. Використання аддитивних технологій на сьогоднішній день набуло широкого розповсюдження. Їх використовують на різних підприємствах, також дана технологія має широкий спектр можливостей. Зокрема 3D друк надає компаніям такі можливості та переваги: збільшення економічної ефективності підприємства, відсутність людського фактору, зменшення часу та витрат на технологічну підготовку випуску нової продукції тощо.

На ринку промислових 3D принтерів представлена велика кількість машин самого широкого спектру застосування. Головними недоліками всіх технологій є необхідність виконання постоброблення для досягнення необхідних властивостей поверхневих шарів.

Мета та задачі дослідження. Покращення параметрів якості поверхонь деталей отриманих методом селективного лазерного плавлення за рахунок магнітно–абразивного оброблення.

Для досягнення мети було поставлено наступні задачі:

1. Аналіз існуючих рішень покращення поверхонь 3D друківаних деталей;
2. Аналіз впливу розташування деталей в робочій зоні на оброблення в умовах великих магнітних щілин.
3. Встановити вплив процесу МАО на параметри шорсткості поверхонь деталей після друку;
4. Встановити вплив процесу МАО на параметри шорсткості поверхонь деталей механічного оброблення;
5. Встановити вплив процесу МАО на параметри твердості поверхневого шару;
6. Розробка рекомендацій і удосконалення виробничих процесів та сфер застосування процесу МАО для надруківаних деталей методом селективного лазерного плавлення.

Об’єкт дослідження – Процес магнітно–абразивного оброблення деталей, надрукованих методом SLM.

Предмет дослідження – Технологічні параметри магнітно–абразивного оброблення, які впливають на покращення поверхонь деталей після 3D друку.

Практичне значення В роботі вирішено ряд задач з досягнення необхідних параметрів шорсткості та твердості поверхонь деталей, для отримання більш якісних деталей. Отримані дані доцільно використовувати при пост оброці деталей на підприємствах будь-якої машинобудівної спеціалізації, а також як початок для потенціальних поглиблених досліджень в цій галузі.

Зміст

ВСТУП	11
1.1. Технологія LPBF(SLM) 3D друку	12
1.2. Застосування деталей	16
1.3. Проблеми, що виникають при LPBF(SLM) друці	20
1.4 Електрохімічна поліровка деталей після друку	23
1.5. Шліфівка і поліровка деталей після друку	25
1.6. Обробка різанням деталей після друку	26
1.7. Піскоструменева обробка	28
1.8. Магнітно-абразивне оброблення	28
1.9 Висновки і постановка задач досліджень	32
2. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ	34
2.1 Обладнання для створення сферичного металевго порошку для процесу LPBF(SLM) друку.....	34
2.2 Обладнання LPBF(SLM) для друку деталей	36
2.3 Характеристика і хімічний склад матеріалу оброблюваних деталей.	38
2.4 Вимірювання шорсткості поверхні.....	44
2.5 Вимірювання поверхневої твердості	48
2.6 Обладнання для магнітно-абразивного оброблення.	49
2.7 Магнітно-абразивні матеріали, що використовувались при МАО	52

3. АНАЛІЗ РОЗТАШУВАННЯ В РОБОЧІЙ ЗОНІ МАО, ОПТИМІЗАЦІЯ ТА СТВОРЕННЯ КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ ДРУКУ ДЕТАЛЕЙ.....	54
3.1. Аналіз розташування деталі в робочій зоні верстата для МАО	54
3.2. Оптимізація положення деталі для створення керуючої програми.....	61
3.3. Створення підтримок та керуючої програми.....	63
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНО–АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ LPBF(SLM) ДРУКОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	67
4.1. Вплив МАО на шорсткість поверхонь після LPBF(SLM) друку.....	67
4.2. Вплив МАО на шорсткість механічно оброблених поверхонь деталей отриманих за допомогою селективного лазерного плавлення	81
4.3. Вплив МАО на твердість поверхневого шару оброблюваних деталей.	82
4.4. Висновки до розділу	84
5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	85
5.1 Опис ідеї-проекту	85
5.2 Основні вигоди, що може отримати користувач товару	85
5.3 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.	86
5.4 Технологічний аудит ідеї проекту	88
5.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	89
5.6 Аналіз ринкового середовища	91

5.7 SWOT-аналіз	95
5.8 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	97
5.10 Розроблення маркетингової стратегії проекту.....	99
5.11 Визначення цінових меж товару	99
5.12 Визначення оптимальної системи збуту	100
5.13 Висновки:.....	100
ВИСНОВКИ	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104

ВСТУП

Одним з факторів, що забезпечують підвищення продуктивності виробництва це час виготовлення виробу тому в сучасному виробництві використовують 3-Д друк, а тому вироби після друку потрібно звільнити від підтримуючих структур а також довести поверхні необхідних шорсткостей і для цього використовують різні способи обробки такі як :

- Методи механічного оброблення: алмазне шліфування і полірування, методи вібраційного, дрібноструменого і гідроабразивного оброблення, оброблення щітками, у вільному абразиві, тощо;

- шліфування;
- полірування;
- хімічне полірування.

Але жоден з них не надає комплексного та швидкого методу обробки.

Тому зважаючи на вище перераховані методи було вирішено обрати метод магніто-абразивного оброблення (МАО), по причині того що дана технологія забезпечує підвищення якості деталей після друку за рахунок одночасного зниження шорсткості та збільшення твердості на його робочих поверхнях.

Тому для вирішення даної проблеми є актуальною науковою проблемою і має велике практичне значення.

ПОСТ ОБРОБЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ПІСЛЯ LPBF(SLM) 3D ДРУКУ

1.1. Технологія LPBF(SLM) 3D друку

LPBF(SLM) або Lazer Power Bed Fusion (Selective laser melting) - інноваційна технологія виробництва складних виробів за допомогою лазерного плавлення металевого порошку по CAD моделях. За допомогою технології LPBF(SLM) створюють точні та функціональні металеві деталі для роботи у вузлах і агрегатах.

Незважаючи на свій потенціал, LPBF(SLM) використовується лише в кількох галузях. Здебільшого це пов'язано з високою вартістю обладнання та деталей, а також з вимогами до обробки. Найбільш популярні галузі для використання LPBF(SLM) принтерів це:

Медицина: спеціальні для пацієнта імпланти та інші компоненти високоякісного медичного обладнання

Автомобілебудування: швидкісне створення прототипів і виготовлення деталей на замовлення або малі серії;

Аерокосмічна промисловість: повітроводи та інші деталі;

Техніка: конформні канали охолодження для обладнання

В даній технології використовуються потужні лазери для створення тривимірних фізичних об'єктів. Цей процес успішно замінює традиційні методи виробництва, так як фізико-механічні властивості виробів, побудованих за технологією LPBF(SLM), часто перевершують властивості виробів, виготовлених за традиційними технологіями[1].

Обладнання для LPBF(SLM) допомагають вирішувати складні виробничі завдання промислових підприємств, що працюють в авіакосмічній, енергетичній, машинобудівній і приладобудівній галузях,

створюючи високотехнологічні вироби, при цьому зі зменшеним часом технологічної підготовки в порівнянні з традиційними технологіями.

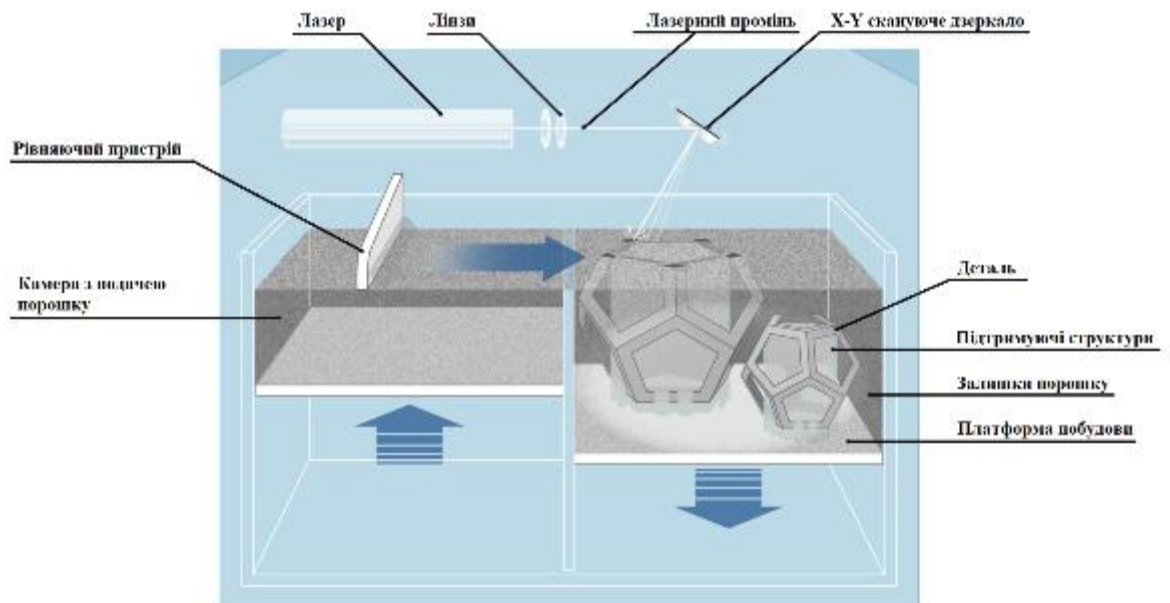


Рисунок 1.1 – Схема роботи LPBF(SLM) принтера [1]

Процес друку починається з розділення цифрової 3-D моделі на шари товщиною від 20 до 100 мкм з метою створення 2-D зображення кожного шару виробу. Стандартним форматом для створення G-code є STL. Цей файл додається в спеціалізоване програмне забезпечення так званий ”слайсер”, де відбувається аналіз інформації і підбирання технічних характеристик які задані в технічному завданні до деталі.

На основі отриманих даних запускається виробничий цикл побудови, який складається з чисельних циклів побудови окремих шарів виробу.

Цикл побудови складається з типових операцій:

1. Нанесення шару порошку за допомогою рівняючого пристрою з камери де знаходиться порошок заданої товщини від 20 до 100 мкм на платформу побудови.
2. Сканування поверхні та нанесення лазерним променем січення шару деталі.

3. Опускання платформи побудови вниз на величину шару, яка відповідає товщині шару.

Процес побудови платформи виробу відбувається в машині, яка заповнена інертним газом аргоном або азотом (в залежності від типу порошку, з якого відбувається побудова). Основний витрати інертного газу відбувається на початку роботи, під час продування камери побудови, коли з неї повністю видаляється повітря (допустимий вміст кисню менше 0,15%).[1]

Після побудови виріб з платформою витягується з камери LPBF(SLM) машини, після чого виріб відділяється від плити механічним способом. Від надрукованого виробу видаляються підтримки, проводиться фінішна обробка побудованого виробу.

Практично повна відсутність кисню дозволяє уникати оксидації витратного матеріалу, що робить можливою друк такими матеріалами, як титан.[1]

Переваги технології LPBF(SLM) 3Д друку [1]:

1. Економія витратних матеріалів, після 3D-друку можливе багаторазове повторне використання матеріалу після його попереднього просіювання на спеціальному допоміжному обладнанні. Таким чином, досягається мінімальна кількість відходів, і значно знижується кінцева вартість виробів;

2. Рішення складних технологічних задач, виробництво різноманітних деталей зі складною геометрією, з внутрішніми порожнинами і каналами охолодження, які найчастіше неможливо виготовити за допомогою традиційних технологій виробництва;

3. Швидкість проектування, істотне скорочення циклу науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт за рахунок можливості побудови виробів без виготовлення додаткової дорогої оснастки;

4. Механічні властивості, завдяки високій щільності (до 99,99%) механічні властивості створюваних виробів не поступаються властивостям

аналогічним виробам, отриманим за допомогою традиційних технологій виробництва, а й часто перевищують їх;

5. Широкий спектр використовуваних матеріалів, протікання процесу побудови виробів в інертному середовищі камери 3D-принтера дозволяє використовувати в якості витратного матеріалу необмежений спектр порошків металевих сплавів, в тому числі, алюмінію і медичного титану;

6. Топологічна оптимізація, можливість топологічно оптимізувати форму майбутнього виробу ще на стадії моделі і значно знизити його вагу.

Недоліки

1. Ціна, особливо якщо деталі не оптимізовані або не призначені для процесу;

2. Потрібні спеціалізовані навички та знання при проектуванні та виробництві;

3. В даний час обмежений відносно невеликими деталями та переліком матеріалів;

4. Груба поверхня після виготовлення, що пов'язано з особливостями процесу;

5. Зазвичай потрібна пост-обробка.

1.2. Застосування деталей

3-D друк за технологією LPBF(SLM) використовують в багатьох галузях не тільки виробництва але й медицини ось наприклад такі імпланти для медичної галузі :

- Ацетабулярні чашки
- Ревізійні чашки
- Плечові імпланти
- Ендопротези
- Зубні коронки і мости
- Стоматологічні імпланти
- Титанові пластини
- Імпланти нижньої щелепи
- Продукти для остеосинтезу
- Фіксуючі пластини

Так як багато матеріалів якими друкують є біосумісні дана технологія ідеально підходить для медицини На рисунку 1.2 показаний зразок щелепи який надрукована за допомогою 3D принтеру:



Рисунок 1.2 – Протез щелепи

Також дана технологія активно використовуються в Авіаційно-Космічній галузі так як дана технологія має ряд переваг таких як:

- зниження витрат матеріалу;
- зниження ваги кінцевої деталі;
- дрібносерійне виробництво;

Ось ряд прикладів деталей надрукованих за допомогою LPBF(SLM) машини



Рисунок 1.3 – Топологічно оптимізований кронштейн [2]

ЗД друк дає можливість моделювати складні структури та оптимізувати існуючі деталі для покращення вагових характеристик, габаритних і т.д.

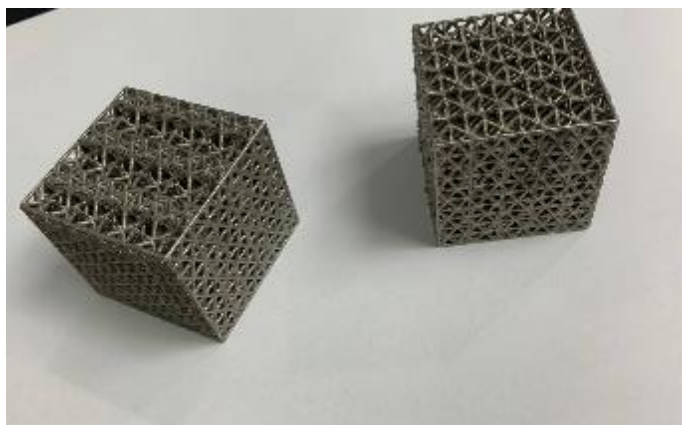


Рисунок 1.4 – Складні структури

Можливість друкувати складні структури є дуже затребуваним в виробництві тому що дають можливість виготовляти деталі складної форми. Дані структури показані на рисунку 1.4 ,такі деталі майже не можливо виготовити традиційними методами



Рисунок 1.5 – Частина механізму.

Також 3-D друк можна використовувати для прототипування вузлів деталей як показано на рисунку 1.5 та 1.6



Рисунок 1.6 – Профільна труба.



Рисунок 1.7 – Кронштейн зі складною геометрією

Такі деталі для 3-D друку часто застосовують як ремонтні деталі та малосерійне швидке виробництво для ремонту будь-яких вузлів. Що показано на рисунку 1.7 дана деталь є ремонтним кронштейном .

1.3. Проблеми, що виникають при LPBF(SLM) друці

Металеві деталі після друку повинні пройти пост-оброблення на них є нависаючі елементи, які використовуються для того щоб деталь не деформувалася від температури та не зруйнувалась під власною вагою. Основні процеси пост оброблення: видалення не зв'язаного порошку, термічне оброблення, видалення підтримуючих структур, фінішне оброблення. Для більшості процесів спікання та сплавлення великою проблемою є шорсткість поверхні. У надрукованих деталей бокова поверхня зазвичай має шорсткість Ra 10-12 мкм. На рисунку 1.8 показано фото поверхні після друку на якому видно проблематику дефектів на поверхні деталі.

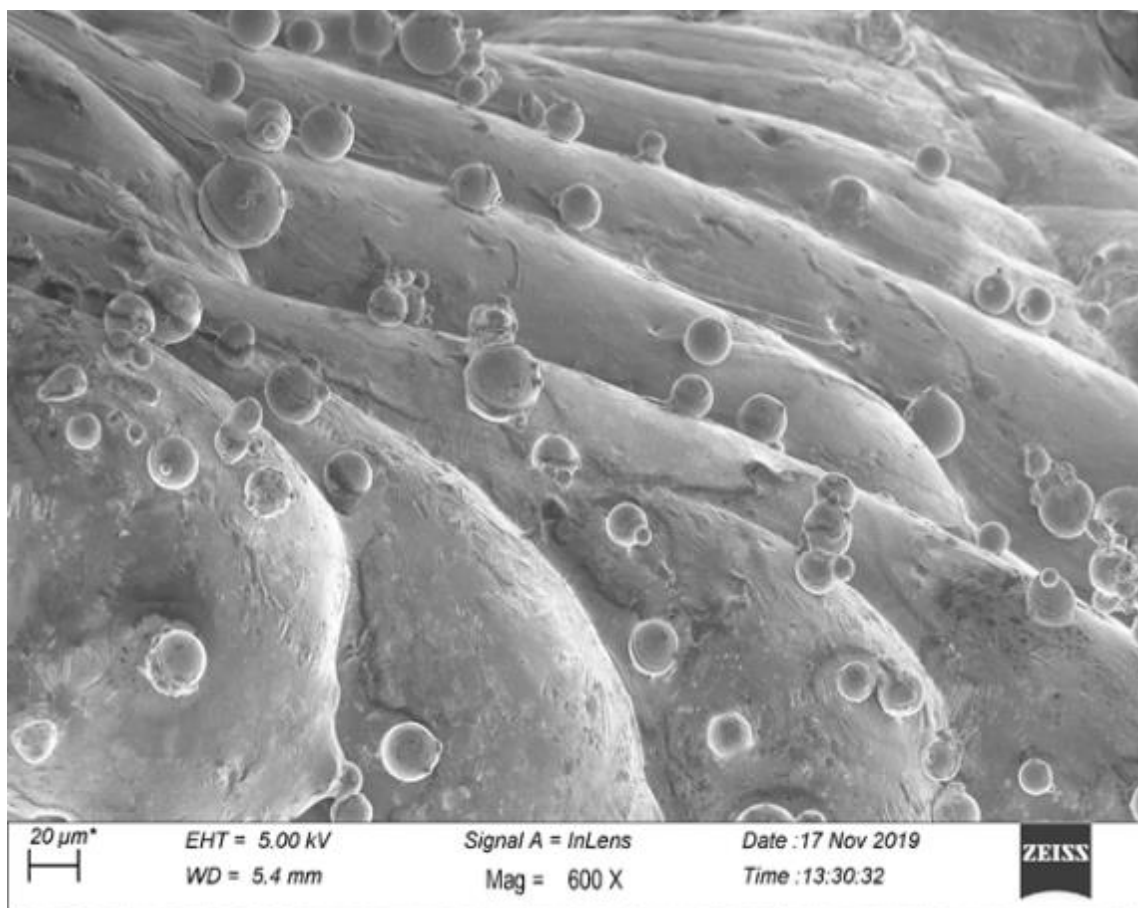


Рисунок 1.8 – Поверхневі дефекти після 3D друку, Ti6Al4V

Традиційні методи фінішного оброблення після 3D друку металевих виробів спрямовані на підвищення експлуатаційних показників, які можна поділити на основні групи:

- фрезерування
- шліфування
- полірування
- хімічне полірування

У процесі формування виробу відбувається розплавлення металу під впливом променя лазера. Розмір одиничної ванни розплаву буде залежати від фокусування променя лазера, теплопровідності металу, щільності розташування частинок, поверхневого натягу, яке утворюється на поверхні розплаву і т.д. Це багатфакторний процес, але можна відзначити, що одинична ванна завжди більше чим пляма впливу лазера на шар. Величина плями впливу лазера (ступінь фокусування) визначається на стадії створення керуючої програми, зазвичай варіюється в межах 40 - 80 мкм. У зв'язку з тим що одинична ванна розплаву має певну (близьку до півкола) форму (рис. 1.9), на поверхні будуть з'являтися нерівності, величина яких залежить від ступеня фокусування променя і теплопровідності шару. Крім того, в крайніх поодиноких ваннах можуть залишатися частково розплавлені частки, що спотворює мікрогеометрію поверхні і змінює геометричні розміри одержуваних виробів. Ступінь проплавлення частинок в периферійних шарах може бути різноманітною, а отже, і міцність їх утримання поверхнею буде різною. Частинки з мінімальною величиною проплавлення (розмір частки зазвичай від 18.80 мкм) можуть значно впливати на шорсткість поверхні і на геометричний розмір, але їх легко видалити. Якщо ступінь переплавлення частки більш або близько 50%, то для її видалення необхідні зусилля, близькі за величиною до міцності самого матеріалу, але вплив на зміну розміру виробу значно менше, ніж в попередньому випадку. З вищесказаного впливає, що геометрія поверхні виробів, одержуваних за LPBF(SLM)-

технології, буде визначатися розміром одиничної ванни (тобто. прямою впливу лазера) і величиною частинок вихідного металевого порошку. Якщо виходити з припущення, що розмір частинок вихідного порошку 25 ... 45 мкм і одинична ванна 40 мкм, то шорсткість поверхні повинна бути близько $R_z = 20$.

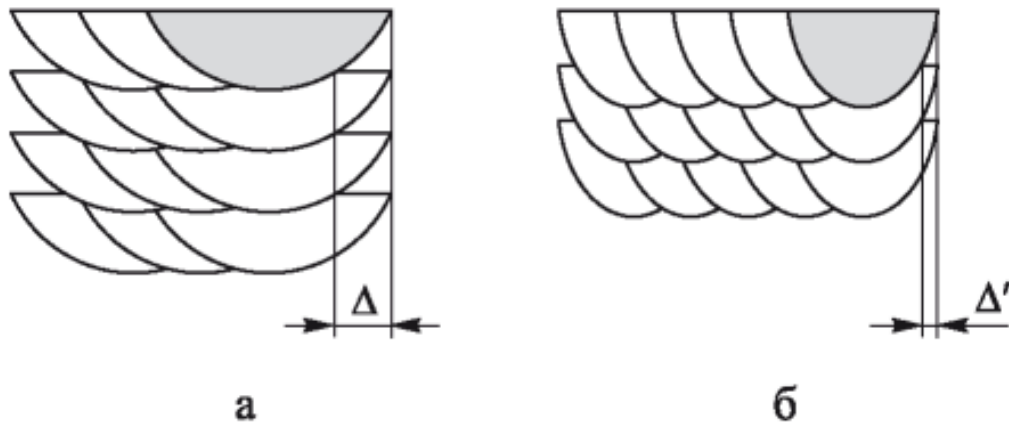


Рисунок 1.9 – Схеми процесу плавлення по LPBF(SLM)-технології: а - одинична ванна при малому ступені фокусування променю лазера; б - одинична ванна при високому ступені фокусування променю лазера

Так як деталь на поверхні має велику шорсткість яка створена великою кількістю сфер тому було запропоновано застосування методу магнітно-абразивного оброблення (МАО), що забезпечує підвищення якості деталей та одночасного зниження шорсткості та покращення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів.

1.4 Електрохімічна поліровка деталей після друку

Процес електрохімічного полірування полягає в анодному розчиненні мікро виступів поверхні металу в електроліті під впливом постійного току. В результаті анодної обробки видаляється зовнішній деформований шар металу, поверхня якого стає однорідною і гладкою, підвищується блиск основного металу, покращується якість готових виробів.

Електрохімічне полірування – технологія, яка дозволяє замінити трудомісткі механічні методи шліфовки та поліровки поверхонь виробів на більш швидке та якісне електрохімічне полірування. Полірування нержавіючих сталей здійснюється в електроліті при температурі не вище 60-80 С, що не викликає термічного впливу на структуру поверхневого шару деталей. Процес електрохімічного полірування складної форми є достатньо складним, оскільки вимагає виготовлення спеціальних пристосувань (технологічної оснастки) для забезпечення рівномірного блиску всієї полірованої поверхні, в тому числі ви ‘ямки, та інші важкодоступних для рівномірного розподілу по ділянкам.

Для електрохімічного полірування металів деяких марок в розчин вводять інгібітори. Також широке застосування знайшли поверхнево-активні речовини в якості добавок в електролітах для розширення можливостей процесу[3].

Основні сфери застосування

Процес електрохімічного полірування дозволяє вирішувати такі завдання як:

- ефективніше полірувати вироби з нержавіючих сталей для надання їм високих декоративних властивостей
- усувати сліди термічної обробки виробів (сліди прокату, зварювання, оксидної плівки та ін.)
- підвищувати ступінь чистоти поверхні на 1-2 класи

- Знімати задирки і виступи, гострі кромки
- обробляти вироби перед нанесенням покриттів
- обробляти деталі з трохи завищеними розмірами зменшення цих розмірів.

Дефекти при електрохімічному поліруванні

Для отримання якісного результату полірування необхідно враховувати таке:

- Наявність пор у металі, глухих отворів малого діаметра та інших порожнин, у яких може накопичуватися електроліт (у тому числі і під дією капілярних ефектів), що згодом може призводити до утворення різнокольорових плям. Такі отвори повинні бути або герметизовані перед початком процесу, або підготовлені пристрої для їх якісного промивання.

- Так як електрохімічне полірування найкраще підходить для усунення мікронерівностей, наявність глибоких вибоїн, раковин, подряпин не призводить до їх усунення, а часто робить їх більш помітними на тлі відполірованої поверхні. З цієї причини електрохімічне полірування некоректно розглядати як повну заміну механічного полірування, так як воно дає якісний результат тільки в певних ситуаціях.

1.5. Шліфівка і поліровка деталей після друку

Процес шліфування – це ручний або механічний процес обробки матеріалу (металу, деревини, кераміки, скла і т.д.).[4]

Шліфування металу, як і полірування, здійснюється різними інструментами та верстатами такими як :

- шліфувальні машини з круглими дисками;
- шліфувальні верстати, в яких шліфувальним інструментом виступають спеціальні шліфувальні круги;
- шліфувально-полірувальні верстати зі спеціальними щітками;
- стрічково-шліфувальні верстати;
- промислові верстати для високоточного шліфування.

Існує плоске, кругле, без центрове та ручне шліфування. Для вибору способу шліфування важливо враховувати розмір деталі, складність її форми та твердість металу з якого вона зроблена. Абразивна обробка буквально захоплює нові позиції в різних промислових галузях. На сьогоднішній день це один із найбільш затребуваних видів обробки металів. Завдяки новим способам виливки (формування) деталей вона дозволяє максимально наблизити розміри заготовок до розмірів необхідних готових виробів. Таким чином, можна обійти процеси точіння, фрезерування або стругання, переходячи відразу до абразивної обробки.

Однак нескінченні шліфувальні стрічки під час обробки металу мають як плюси, так і мінуси. Для отримання бажаного результату важливо враховувати усі нюанси.

З мінусів слід зазначити таке:

- шліфування заготовок нестандартних форм досить складно обробити ;
- складність обробки уступів;

- Проблема обробки важкодоступних місць у різних конструкціях, де не рятує навіть шліфування ручними стрічковими машинками.

1.6. Обробка різанням деталей після друку

У 3Д друці тай не тільки наприклад у машинобудуванні та інших галузях народного господарства, для деталей використовують обробку металу різанням, при цьому деталі можуть бути надруковані, після поковки, відливки, штампування, і т.д.

До кожного певного виду деталей використовується своя технологія обробки металу різанням. Сенс оброблення всіх деталей у такий спосіб полягає у знятті зайвого шару металу із заготівлі.

Шар матеріалу, який необхідно прибрати із заготівлі, щоб вийшла деталь, має свою виробничу назву «припуск на обробку». такий шар також додають і для надрукованих деталей. Розглянемо основні способи обробки деталей обробкою металу різанням, які широко застосовують для пост обробки 3-D друкованих деталей:

Точіння

Цей спосіб ще можна назвати обточуванням. Він може застосовуватись, коли припуск на обробку деталі невеликий. Використовуються різні верстати, на яких встановлений різець.

Такий спосіб обробки металу різанням передбачає велику швидкість обертання заготовки. Це головний рух у роботі верстата, від якого залежить швидкість різання. Один або кілька різців рухаються до заготівлі повільно, рухи відбуваються вздовж або впоперек, залежно від конфігурації майбутньої деталі. Такі поступальні дії – рух подачі.

Популярні кілька століть різні види токарних верстатів використовуються практично кожному промисловому підприємстві[5].

Свердління

Застосовується на будь-яких верстатах, де можна встановити свердло. Вочевидь, що свердлильні верстати підходять насамперед виготовлення різних отворів в заготовках.

Принцип роботи в усіх верстатів один. Свердло, затиснуте в шпинделі, рухається назустріч заготовці, міцно закріплений в лещатах. Шпиндель зі свердлом обертається. Обертання регулюється, що залежить від технології виготовлення отворів у різних металах.

Шпиндель може рухатися вертикально чи горизонтально, що залежить від типу свердлильного верстата[5].

Фрезерування

Складний спосіб обробки металу різанням може відбуватися лише на спеціальному устаткуванні, на якому використовується багатозубий інструмент під назвою фрези. До такого обладнання належать різного виду фрезерні верстати.

Заготівля, міцно закріплена на столі верстата, рухається разом із площиною столу назустріч ріжучому інструменту з певною швидкістю. Фреза обертається із заданою для роботи швидкістю. Рух фрези та заготівлі перпендикулярні.

Фреза обертається – це головний рух. Деталь переміщається – це рух подачі.

На фрезерних верстатах можна робити канавки, наскрізні пази і на одну поверхню, колодязі, фрезерувати профільні поверхні, наприклад, шестерні. Для різних робіт використовують кінцеві, фасонні, торцеві та інші фрези[5].

1.7. Піскоструменева обробка

Піскоструменева обробка металу - це спосіб очищення металевих поверхонь абразивним потоком, який з великою швидкістю спрямовується та вдаряється в метал і виконує роль шліфувального засобу. Такий процес має подвійну функцію: очищає поверхні і надає їй шорсткості. Залежно від типу абразиву, що використовується, поверхня обробляється та набуває шорсткості у вигляді певної текстури, яка в подальшому стає бездоганною основою для зчеплення із захисним покриттям.

У процесі піскоструминних робіт використовуються різні типи абразиву, найбільш поширеним серед яких є пісок. Для обробки металу додають зерна величиною різної величини залежно від товщини матеріалу[6].

1.8. Магнітно-абразивне оброблення

Принцип роботи магнітно абразивного фінішного оброблення який показаний на рисунку 1.10(b). Заготовка розміщується між двома магнітами.

При такій конфігурації магнітний абразив може створювати стабільну полірувальну щітку в магнітному полі. Коли магнітний тримач вібрує, та створює відносний рух між полірувальною щіткою та робочою поверхнею деталі полегшує процес механічного видалення матеріалу. Щільність магнітного потоку було змодельовано, що показано на рисунку 1.10(a) який співпадає з розподіленням магнітних частинок між магнітом і заготовкою, як показано на рисунку 1.10(a), Рисунку 1(в).[7]

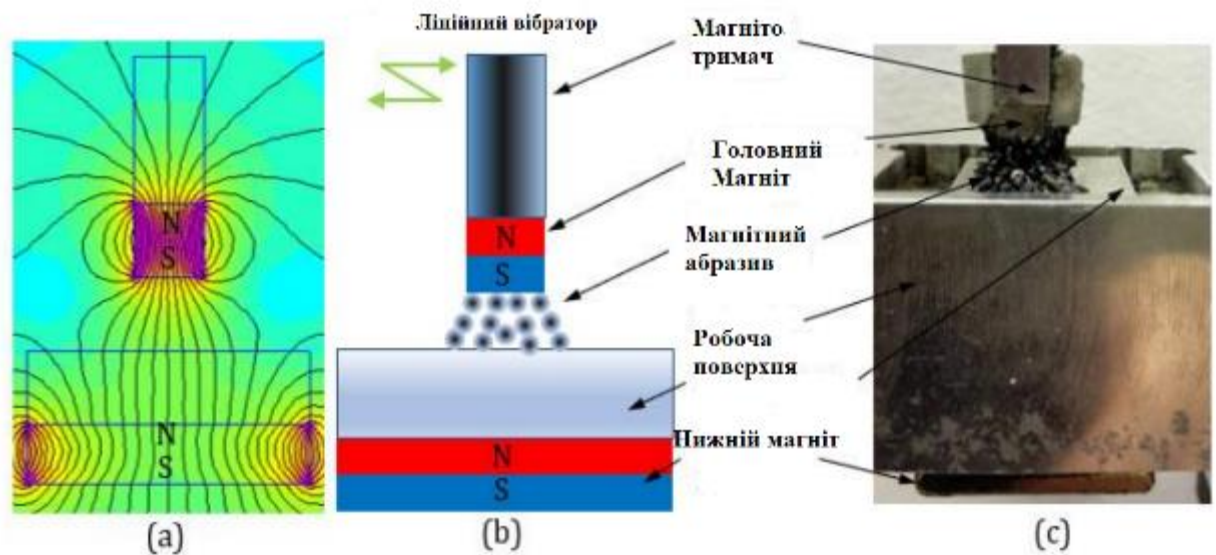


Рисунок 1.10 – Принципова схема магнітного абразивного інструменту [7]

Зображення неpolірованої та polірованої поверхонь показані на рисунку 1.10. Поверхня деталі містить більше не розплавлених частинок на зразку А, ніж на зразку В. Цю різницю можна пояснити плавленням частинок у наступних шарах. Після 75-хвилинного polірування більшість не розплавлених частинок було видалено, а відpolіровані поверхні не мають істотної різниці [7].

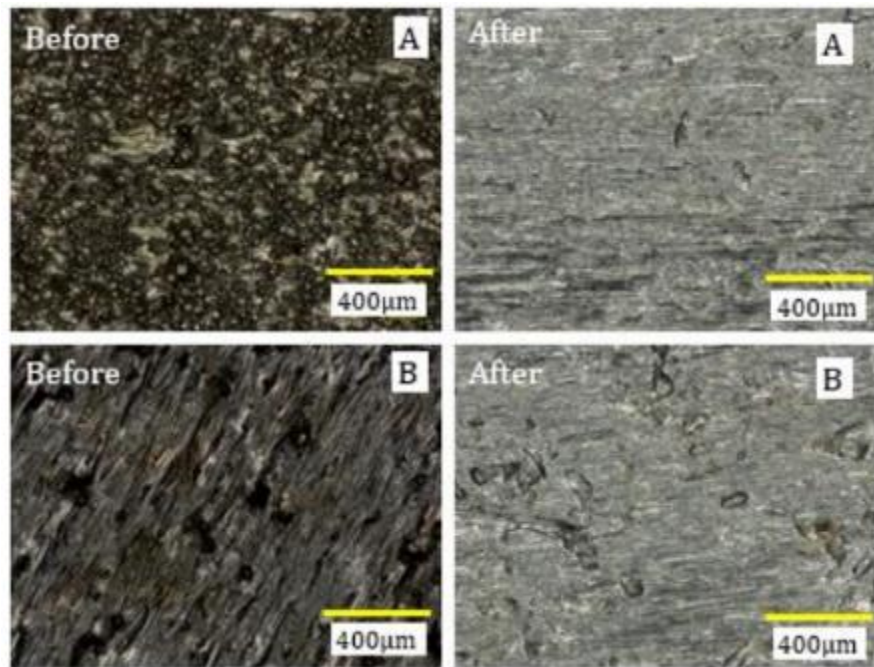


Рисунок 1.11 – А) вхідний зразок В) зразок після обробки[7]

Шорсткість поверхні (R_a) і видалення матеріалу під час полірування. Шорсткість його поверхні R_a покращилася швидше з ~ 12 до 3 мкм (R_a) після 75-хвилинного полірування. На рисунках 1.12 показано профіль шорсткості поверхні обох зразків до і після полірування. Видно було, що піки початкової поверхні були вилучені, поки долини ще збереглися. 78,5% поліпшення шорсткості поверхні досягнуто для зразка А і лише 51,4% для зразка Б. Таким чином, результати експерименту вказує на кращу поверхню для зразка А під таким же станом полірування[7]

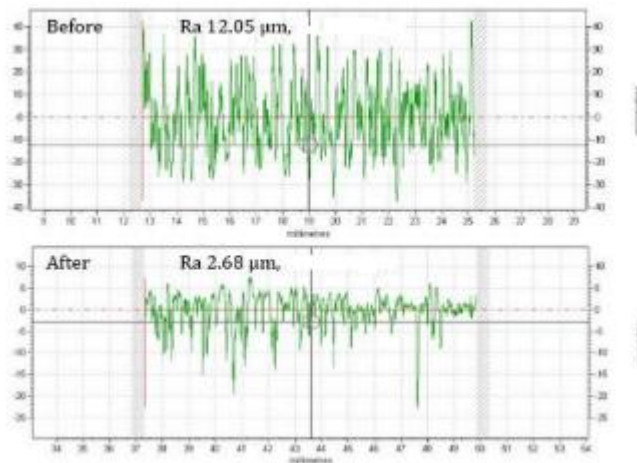


Рисунок 1.12 – Шорсткість поверхні зразка А до і після полірування
(Розріз вимкнено: 2,5 мм; оціночна довжина: 12,5 мм)[7]

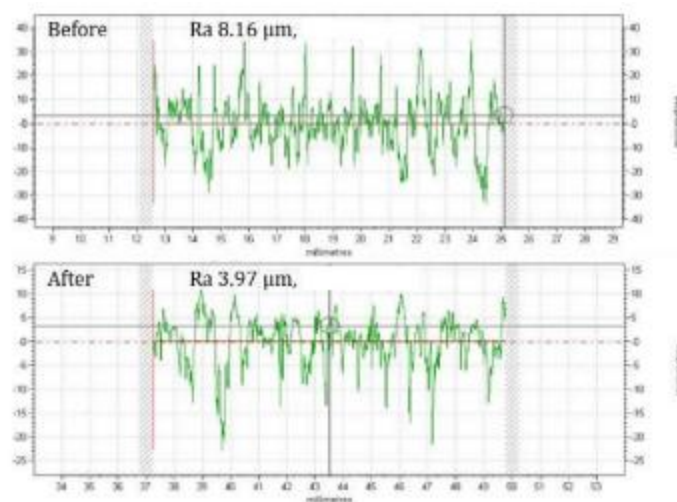


Рисунок 1.13 – Шорсткість поверхні зображення В до і після
поліровки (розріз викл: 2,5 мм; оціночна довжина: 12,5 мм)[7].

Видно було, що піки початкової поверхні були вилучені, поки долини ще збереглися. 78,5% поліпшення шорсткості поверхні досягнуто для зразка А рис 1.12 і лише 51,4% для зразка Б. Таким чином, результати експерименту показують на кращу шорсткість для зразка А під таким же станом полірування.

1.9 Висновки і постановка задач досліджень

В зв'язку з розвитком технологій та впровадженням аддитивних технологій у сучасне виробництво зростає потреба як в машинах для 3D друку так і пост обробці деталей після обробки.

Один з популярних методів 3D друку металом це селективне лазерне сплавлення його принцип роботи полягає в послідовному лазерному правлінню порошку по створеному за здалегіть математичним моделям за допомогою цієї технології друкують тонкостінні металеві деталі, також не розбірні конструкції які змінюють геометричні властивості в процесі експлуатації.

Так як на даний момент не можливо задати необхідну якість поверхні на моменті створення керуючої програми а також необхідність для підтримуючих структур, стоїть проблема пост-обробки надрукованих деталей. На даний момент є багато способів обробки деталей після 3D друку такі як:

- Електрохімічна поліровка;
- Шліфовка;
- Поліровка;
- Обробка різанням
- Піскоструменева обробка;

Вирішення проблеми підвищення якості поверхні деталі після LPBF(SLM) 3D друку є актуальною науковою проблемою і має велике практичне значення.

Тому було вирішено перевірити можливість обробки деталей після 3D друку за допомогою МАО в умовах великих магнітних зон кільцевого типу.

Мета роботи: перевірити можливість зменшення шорсткості поверхні деталей після друку шляхом МАО в умовах великих магнітних робочих зон кільцевого типу.

Задачі дослідження:

Для досягнення мети було поставлено наступні задачі:

1. Аналіз існуючих рішень покращення поверхонь 3D друкованих деталей;
2. Встановити вплив процесу МАО на показники шорсткості деталей при застосуванні МАІ;
3. Провести аналіз існуючих датчиків виміру довжини та габаритів;
4. Порівняльний аналіз використання різних матеріалів надрукованих деталей при МАО в умовах великих робочих зон на показники якості поверхні;
5. Розробка рекомендацій і удосконалення виробничих процесів та сфер застосування процесу МАО для надрукованих деталей методом селективного лазерного плавлення.

2. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Обладнання для створення сферичного металевого порошку для процесу LPBF(SLM) друку.

Для якісного 3Д друку деталей необхідно щоб порошок мав сферичну форму з розміром від 20 до 60 мкм. Для отримання такого порошку використовувався атомізатор компанії ATO LAB (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Атомізатор сферичного порошку ATO LAB

Принцип роботи обладнання заснований на технології ультразвукової атомізації, яка дає можливість швидко створювати дрібнодисперсні порошки з високим ступенем сферичності і від того сипучості. Завдяки самій природі процесу атомізації, порошок має дуже вузький гранулометричний склад, який залежить від обраної частоти ультразвукового впливу. Багато про що говорить той факт, що 80% отриманого порошку підходить для друку.

Матеріал розплавляється безпосередньо на поверхні металевого дроту і атомізується з поверхні синоптроду, тому відсутній ризик появи домішок від тигеля. Рекомендоване робоче середовище - аргон, але можливе використання азоту. АТО LAB дозволяє отримувати порошок практично з будь-якого матеріалу, представленого в дроті або прутках, включаючи дуже крихкі і м'які матеріали.

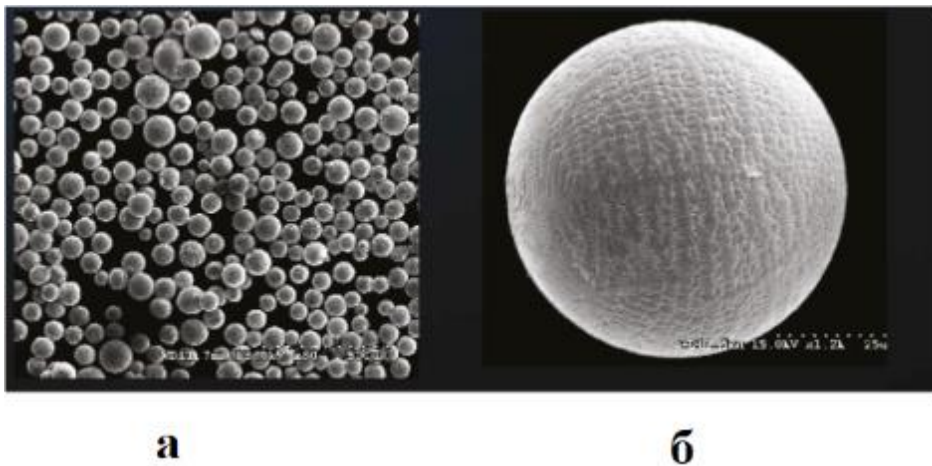


Рисунок 2.2 – а) Не просіяний порошок АТО LAB, однорідний розмір і сферична форма частинок. б) Сферична частка порошку сталі 316L, вироблена в атомізаторі [8]

Установка з може відразу після підключення виробляти матеріал потрібної якості і що найважливіше не має обмежень по мінімальній партії виробництва. Завдяки цьому ідеально підходить для використання в дослідницьких цілях і невеликих адитивних виробництвах. А також для роботи з дорогоцінними матеріалами. [8]

2.2 Обладнання LPBF(SLM) для друку деталей

Для друку деталей використовується LPBF(SLM) 3D принтер Alfa-150D від компанії Additive Laser Technology(ALT).



Рисунок 2.3 – LPBF(SLM) 3D принтер ALT Alfa-150D [9]

Також для процесу та пост-обробки потрібно і допоміжне обладнання, Для даного принтеру використовується вакуумний транспортувальник металевого порошку APR-041 дане обладнання призначене для збору відпрацьованого металевого неактивного порошку з робочої зони 3D - принтера:



Рисунок 2.4 – Вакуумний транспортувальник металевого порошку
APR- 041[10]

Для повторного використання порошку після друку потрібний пристрій для просіювання, для принтера використовується Автоматизована станція просіювання металевого порошку APS - 051 Пристрій призначений для просіювання, перемішування і гомогенізації не реактивного металевого порошку для повторного використання.



Рисунок 2.5 – Автоматизована станція просіювання металевого порошку APS - 051.[10]

2.3 Характеристика і хімічний склад матеріалу оброблюваних деталей.

Для обробки використовувались деталі з різних матеріалів перший з яких це копія крильчатки газотурбінного двигуна загальний розмір якої склав 30x17x7 мм. Матеріал з якого друкувалась деталь це Нікель-хромовий сплав Inconel 625, це жароміцний сплав стійкий до широкого спектру жорстких корозійних середовищ і особливо стійкий до точкової та щілинної корозії, протистоїть газовій корозії при дії високих температур. Діапазон робочих температур – від криогенних до 980 °С. Поставиться у вигляді порошку з номінальним розміром частинок від 15 до 45 мкм.

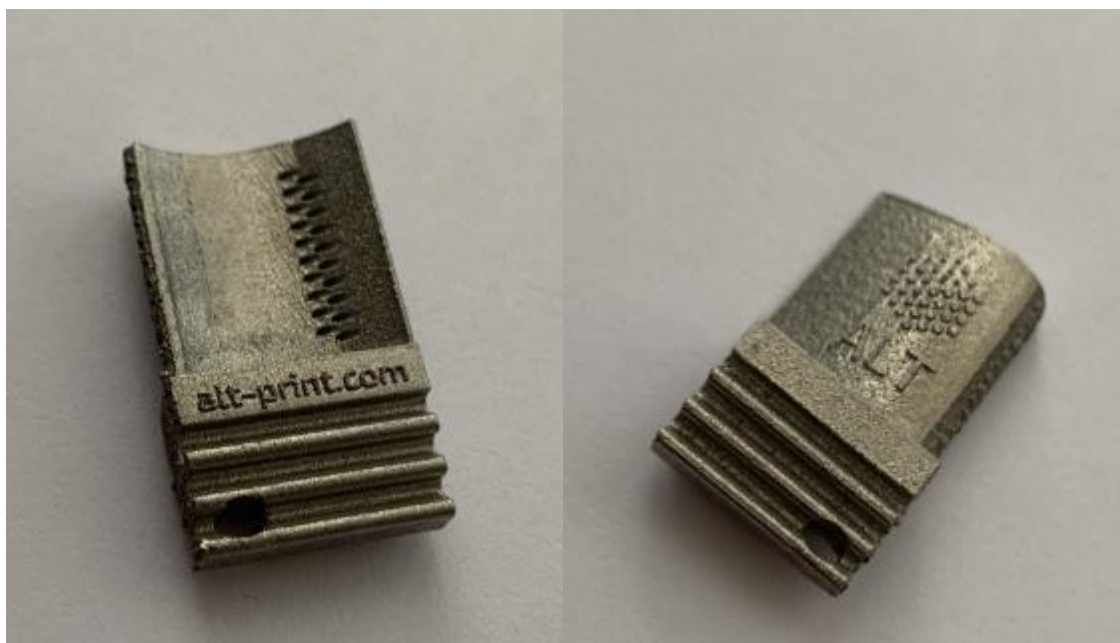


Рисунок 2.6 – Зменшена копія крильчатки газотурбінного двигуна

Таблиця 2.1: Фізико-механічні властивості Inconel 625 [12]

	Горизонтальне направлення XY	Вертикальне направлення Z
Поріг міцності	950-1050 МПа	875 -950 МПа
Поріг текучості	700-750 МПа	575 -625 МПа
Модуль Юнга	165 -185 ГПа	135 -155 ГПа
Видовження	30-35%	35 - 45%
Твердість	300-330 HV0.5	
Щільність	8,44 г/см ³	

Таблиця. 2.2. Хімічний склад Inconel 625 [13]

$Al \leq 0.4\%$	$C \leq 0.1\%$
$Co \leq 1\%$	Cr 20-23%
$Cu \leq 0.5\%$	$Fe \leq 5\%$
$Mn \leq 0.5\%$	Mo 8-10%
$N \leq 0.02\%$	Nb+Ta 3.15 - 4.15%
$S \leq 0.015\%$	$O \leq 0.03\%$
$Si \leq 0.5\%$	$P \leq 0.015\%$
$Ti \leq 0.4\%$	Ni основа

Наступні деталі для обробки це крильчатка витратоміра загальний розмір деталі 20x50x20 мм вона представлена на рисунку 2.7



Рисунок 2.7 – Крильчатка витратоміра

Крильчатка витратоміра, оправка прицілу 10x10x40мм та магазин пістолету матеріал з якого друкували це Нержавіюча сталь AISI 316L.деталь показана рисунку 2.8.

Для обробки використовувались деталі з різних матеріалів перший з яких це крильчатка витратоміра..



А)

Б)

Рисунок 2.8 – А) Оправка Б) Профільна труба

Нержавіюча сталь AISI 316L даний друкований матеріал зі сплаву нержавіючої аустенітної сталі. Готові вироби з даного матеріалу мають високу стійкість до корозії, мають підвищену міцність і зносостійкість. Поставляється у вигляді сферичного порошку з номінальним розміром частинок від 15 до 53 мкм.

Таблиця 1.5. Хімічний склад AISI 316 [13]

Cr 16-18%	$O \leq 0,1\%$
Ni 10-14%	$C \leq 0.03\%$
Mo 2-3%	$P \leq 0,045\%$
$Mn \leq 2\%$	$S \leq 0,03\%$
$Si \leq 1\%$	$N \leq 0.1\%$
$Cu \leq 0,75\%$	Fe основа

Таблиця 1.6: Фізико-механічні властивості Нержавіюча сталь AISI 316 [13]

	Горизонтальне напрявлення XY	Вертикальне напрявлення Z
Поріг міцності	590-690 МПа	485 -595 МПа
Поріг текучості	470-590 МПа	380-560 МПа
Модуль Юнга	159-175 ГПа	117-151 ГПа
Видовження	25 -55%	30-70%
Твердість	210-214 HV0.5	114 -226 HV0.5
Щільність	8,0 г/см ³	

Також для часткової обробки було взято гантелі для розтягу матеріал з якого вони надруковані це Титановий сплав Ti6Al4V показано на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 – Гантелі для розтягу

Біосумісний Титановий сплав Ti6Al4V друкований матеріал зі сплаву титану. Готові вироби з даного матеріалу мають високу стійкість до корозії, володіють підвищеною міцністю і низькою питомою вагою. Поставляється у вигляді сферичного порошку з номінальним розміром частинок від 15 до 53 мкм.

Таблиця 1.7. Хімічний склад Ti6Al4V [14]

Al 5,50-6,50%	N \leq 0,03%
V 3,50- 4,50%	H \leq 0,0125%
Fe \leq 0.25%	Yt \leq 0,005%
O \leq 0,13%	Ti основа
C \leq 0,08%	

Таблиця 1.8. Фізико-механічні властивості Ti6Al4V [14]

	Горизонтальне направлення XY	Вертикальне направлення Z
Поріг міцності	1130-1250 МПа	1100-1250 МПа
Поріг текучості	210-245 МПа	1000-1125 МПа
Модуль Юнга	105 -115 ГПа	110-115 ГПа
Видовження	5 -10%	5 -10%
Твердість	395 - 405 HV0.5	
Щільність	4,42 г/см ³	

2.4 Вимірювання шорсткості поверхні

Вимірювання шорсткості крильчатки витратоміра та зменшеної копії лопатки ГТД виконувалось на спеціальному модулі для вимірювання зовнішніх поверхонь зібраного з профілометра мод. 296.

Поверхня яка вимірюється, ощупуватися алмазною голкою з малим радіусом округлення і механічні коливання щупа, які при цьому виникають, перетворюються в електричний сигнал, пропорційний цим коливанням

Вимірювальний прилад 1 відповідає за перетворення лінійних коливань голки, які переносять профіль поверхні, в електричні сигнали. Переміщення вимірювального приладу 1 по поверхні зразка 5, який лежить на столикі-призмі 4, здійснюється приводом двигуна 2, живлення якого здійснюється за допомогою блока живлення 14 через блок “генератор-модулятор”. Привод 2 встановлюється на стійці 3. Блок спряження 15 складається з фільтру низьких частот 8 типу RC і підсилювача 9. Фільтр використовується для відсіювання сигналу в діапазоні 0... 250Гц. Сигнал з блока спряження поступає на аналого-цифровий перетворювач (АЦП),

встановлений в блоці 12 вичислю вального комп'ютера. Керування процесом здійснюється через шину 13, яка з'єднує привод з АЦП через роз'єм 10.

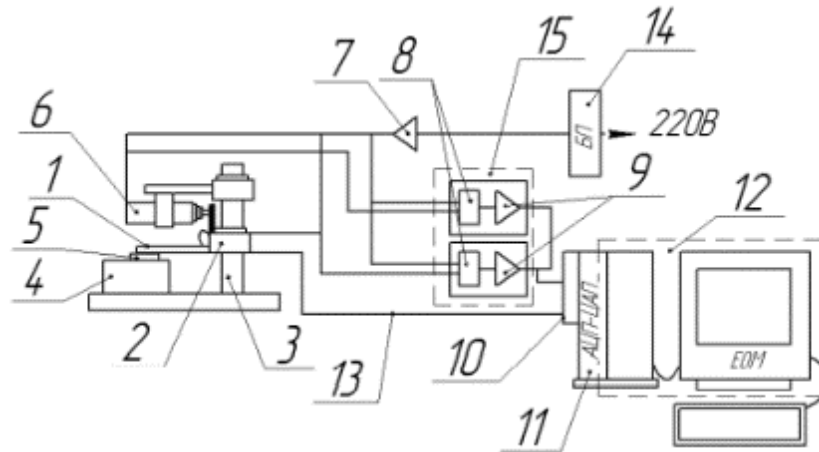


Рисунок 2.10 – Блок-схема модуля для вимірювання фасонних профілів[22].

У модулі також є функції запису та оброблення сигналу, можливість порівняння профілю поверхні з існуючою моделлю або з даними, отриманими за допомогою інших засобів вимірювання. Необхідні характеристики поверхні визначаються за допомогою спеціально розроблених програм. Точність вимірювання модуля – 0,001 мм (радіус заокруглення алмазної голки – 0,01 мм), яка отримується при застосуванні додаткового математичного апарату. Вимірювання шорсткості поверхні деталей проводилося в декілька етапів. Перед вимірюваннями необхідно провести тарування величини вертикальних та горизонтальних переміщень алмазної голки, що означає визначення масштабних коефіцієнтів по осях. Тарування вертикальних переміщень проводиться на всьому вимірюваному діапазоні по набору плоско паралельних кінцевих мір довжини. Тарування горизонтальних переміщень проводиться на всій вимірюваній довжині переміщення датчика за допомогою повіреної лінійки, а для більш точного тарування використовується еталонна міра шорсткості з регулярним мікропрофілем [22].

Модуль з пристосуванням для вимірювання шорсткості показано на рис. 2.11



Рисунок 2.11 – Модуль для вимірювання шорсткості поверхні

Далі проводяться вимірювання профілю, результати якого, за допомогою масштабних коефіцієнтів, приводяться до метричної системи координат деталі. Для оброблення даних використовувався пакет MathCad.

До механічної обробки та після обробки зовнішніх поверхонь всіх інших деталей які оброблялись методом магнітно обробки вимірювалась шорсткість на устаткуванні методом ощупування. Для виміру використовувався профілометр-профілограф Калібр 252 (рис. 2.11).



Рисунок 2.12 – Профілометр-профілограф «Калібр 252»

На рис. 2.12 зображено профілометр-профілограф «Калібр 252» блокової конструкції лабораторного типу. Він призначений для вимірювання параметрів шорсткості та хвилястості плоских та циліндричних поверхонь виробів, поверхонь кульок та роликів діаметром 1...25 мм, поверхонь отворів малих діаметрів (до 3 мм). Прилад має аналоговий вихід ЕОМ. Вимірювання шорсткості проводиться шляхом обмацування поверхні алмазною голкою з радіусом при вершині 10 мкм та фіксацією цифрових показань на табло за параметрами R_a , R_z , R_{max} , R_p , S_m , t_p або відтворення профілю на електротермічному папері прямокутних координатах. Вертикальне збільшення мікропрофілю варіюється по 11 ступенях від 100 до 200 000 крат, а горизонтальне - від 0,5 до 2 000 крат. Швидкість трасування датчика вибирається залежно від величини шорсткості не більше 0,6...60 мм/хв. Статичне вимірювальне зусилля алмазної голки на поверхню, що вимірюється, не перевищує 0,003 Н. Похибка показань приладу по записуючого блоку становить $\pm 4,5\%$, а по показовому блоку становить $\pm 10\%$ [15].

2.5 Вимірювання поверхневої твердості

Дослідження поверхневої твердості деталей виконували на мікротвердомірі ПМТ-3 рис. 2.13.

Технічні характеристики мікротвердоміру ПМТ-3:

- 45 - збільшення мікроскопу – 138 та 520;
- межі координатного переміщення предметного столику у двох взаємно перпендикулярних напрямках, мм – від 0 до 10;
- ціна поділки шкал барабанчиків мікрометричних гвинтів координатного переміщення, мм – 0,01.

Після навантаження на поверхні свердла залишається відбиток від алмазної пірамідки (рис. 2.13). Значення довжини діагоналі відбитка дозволяє розрахувати твердість поверхневого шару.



Рисунок 2.13 – Мікротвердомір ПМТ-3

$$P = \frac{1.854 \times N}{(d \times c)^2} \times 1000 (2.1)$$

де P – поверхнева твердість, ГПа;

d – середня довжина діагоналі відбитка, поділки шкал;

c – перерахунковий коефіцієнт ПМТ-3.

Відносну похибку з деяким наближенням вважають рівною половині ділення шкали барабанчика ПМТ-3, що виражається в одиницях поверхневої твердості $\pm(0,5 \text{ ГПа})$.

2.6 Обладнання для магнітно-абразивного оброблення.

Оброблення деталей складної форми, такі які ми будемо використовувати для обробки в магнітних зонах великої ширини, в яких досягнення високих значень магнітної індукції пов'язано з технічними труднощами і значними витратами. В процесі магнітно-абразивної обробки деталей в процесі внутрішніми впадинами та полостями заповнення об'єму останніх фероабразивним порошком, який, притискаючись до поверхні пазів (особливо деталей із феромагнітних матеріалів), створює тіньові зони, залишаючись при обробленні в мало рухливому стані. Тобто не виконується одна з умов МАО – наявність достатньої швидкості відносного переміщення абразиву по оброблюваній поверхні. У результаті процес МАО проходить нерівномірно.

У роботах [16, 18,19] показано, що найбільш прийнятною для МАО деталей складної форми типу свердел є схема типу кільцева ванна з використанням робочих зон значної ширини [20, 21]. Саме така схема

підходить для обробки деталей складної форми, вона забезпечує спроможність робочого середовища “обтікати” оброблювані профілі і здійснювати зміцнення поверхні за рахунок ударної взаємодії частинок середовища з поверхню деталей.

МАО деталей після 3д друку , відбувалось на верстаті з установкою типу ванни кільцевого типу(рис. 2.8), що забезпечить обтікання деталей навколо силової осі, осі кільця. ванни (2) і зміщення вертикальної осі.



Рисунок 2.14 Універсальна магнітно-абразивна установка типу кільцева ванна

Налаштування магнітно-абразивної установки типу кільцева ванна здійснювалось в декілька кроків. Універсальна головка 4 встановлюється в шпинделі верстата так, щоб її вертикальна вісь співпадає з віссю кільцевої магнітної системи 1 і шпинделя верстата, і являє собою базову плиту 5 яка з

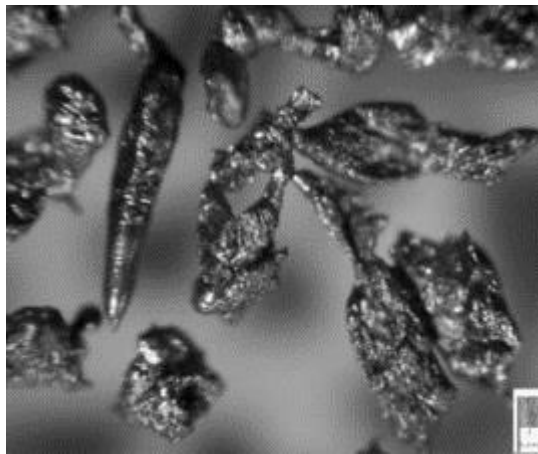
одного боку закріплюється з можливістю повороту навколо вертикальної осі пристрій повороту інструмента відносно площини обертання (площини кільцевої ванни 2).

В пристрої встановлено міні шпиндель 3 у який вставляється оправка 8, в якій закріплюється оброблюваний інструмент 8. Інструмент 8 має можливість вільно обертатися навколо власної осі і осі міні шпинделя 3. З протилежного від місця кріплення інструменту боку на осі міні шпинделя 3 встановлено редуктор, який через гнучкий вал з'єднано з двигуном постійного струму 7. Двигун 7 отримує електроенергію через контакти, які на рис. 2.8 показані в неробочому стані. В робочому стані контакти прижимаються до мідних кілець, які передають електричний струм через електропроводи на двигун 7. Двигун постійного струму з редуктором забезпечують обертання оброблюваної деталі навколо власної осі з певною частотою.

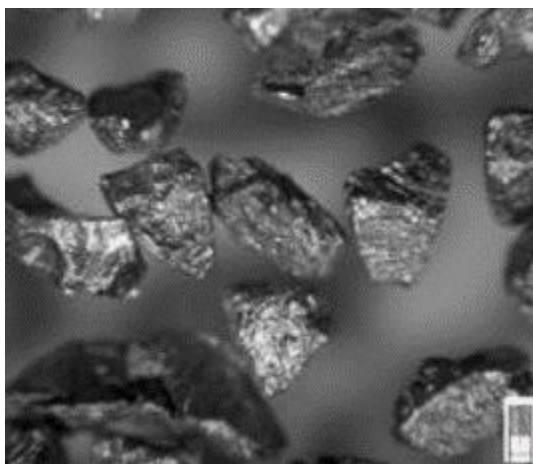
В процесі обробки деталей в установці МАО деталі обертаються навколо власної осі та рівнобіжної осі кільцевої ванни та навколо осі кільцевої ванни. Як наведено нижче найкраще розташування деталей між віссю інструменту та дотичною до середньої лінії кільцевої ванни що найкраще проходження порошку по деталі це кути від 60° до 40° . Також Оброблення можливо виконувалось при різних режимах – в умовах «стікання» та «стікання» феромагнітного середовища з поверхонь деталей.

2.7 Магнітно-абразивні матеріали, що використовувались при МАО

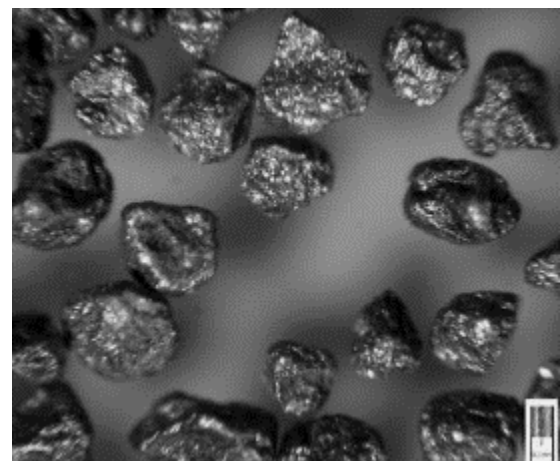
Для створення МАІ було використано такі види МАП: з осколковою формою Феромап зернистістю 630/400 мкм та ДЧК 630/400 чугуно колота + алмаз Асм 2014 та з округлою формою Царамам зернистістю 630/400 зовнішній вигляд порошків показаний на Рис 2.13.



Царамам 630/400 мкм



ДЧК 630/400 мкм + алмаз Асм 2014



Феромап 630/400

мкм

Рисунок 2.15 – Зовнішній вигляд порошків

Мікро геометричні та геометричні показники МАП [17] наведені в таблиці 2.9

Таблиця.2.9 Мікро геометричні та геометричні показники МАП

Тип порошку	Фракція, мкм	Середнє значення гкз, мкм	kf
ДЧК	630/400	71,22	1,63
Царамам	630/400	73,89	3,01
Феромап	630/400	65,69	1,41

Різниця в механічних характеристиках порошків вибрана з метою комплексного дослідження впливу МАО на твердість поверхневого шару, шорсткість деталей після друку .

Висновок: було визначена методика та стратегія дослідження а саме обране обладнання це магнітно абразивна установка типу кільцева ванна та матеріал магнітно-абразивного інструменту. Також вибрані установки для вимірювання шорсткості та твердості деталей після обробки.

3. АНАЛІЗ РОЗТАШУВАННЯ В РОБОЧІЙ ЗОНІ МАО, ОПТИМІЗАЦІЯ ТА СТВОРЕННЯ КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ ДРУКУ ДЕТАЛЕЙ.

3.1. Аналіз розташування деталі в робочій зоні верстата для МАО

Для оптимізації та покращення обробки деталей в верстаті МАО було вирішено провести спрощену симуляцію потоку

Для аналізу потоку МА було використане програмне забезпечення SolidWorks Flow Simulation [19], що дозволяє провести симуляцію потоку рідини та проаналізувати швидкість потоку, характер його руху та тиск.

SOLIDWORKS Flow Simulation[19] - це програма для спільного параметричного моделювання потоку, що використовує метод кінцевого обсягу (FVM). Вона дозволяє розраховувати характеристики виробу з допомогою сценаріїв "що, якщо" і використовувати отримані результати для оптимізації.

Було обрано 6 кутів повороту на рис 3.1 зображено симуляція потоку під кутом 90 градусів.

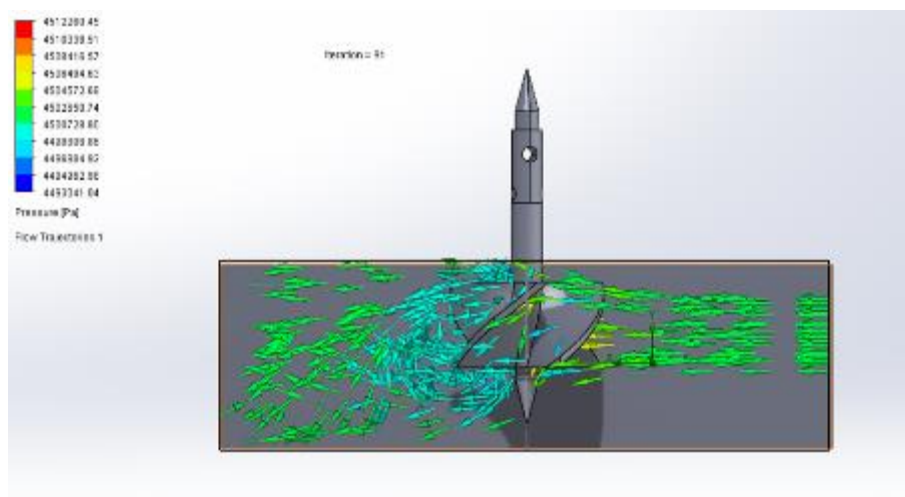


Рисунок 3.1 – Симуляція потоку під кутом 90 градусів

як бачимо на рис. 3.1 абразивний порошок вдаряється в деталь та збирається на задніх стінках деталі тобто деталь буде оброблятися не рівно мірно та багато абразивних елементів залишатись.

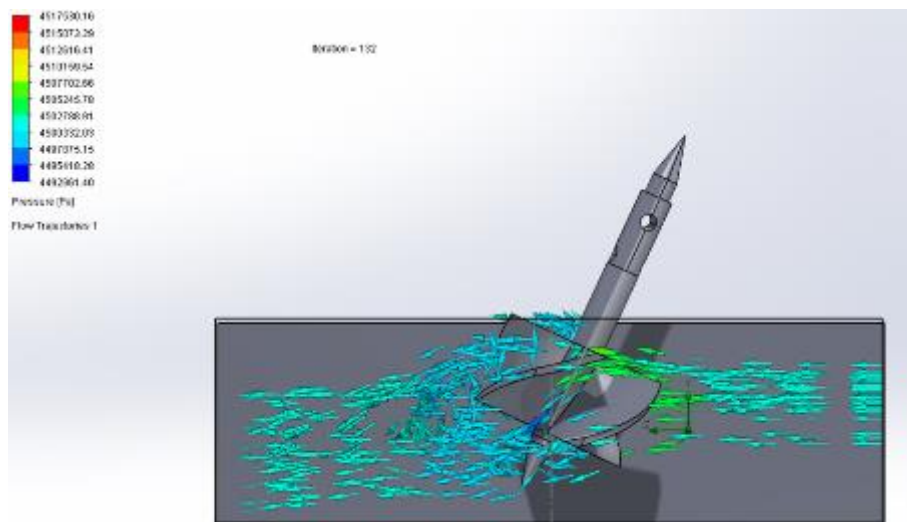


Рисунок 3.2 – Симуляція потоку під кутом -25 градусів

На рис 3.2 зображено симуляцію проходження потоку під -25 градусів, слід зазначити що завихрення потоку покращились але тиск залишився незмінний на рівні 4.5 МПа.

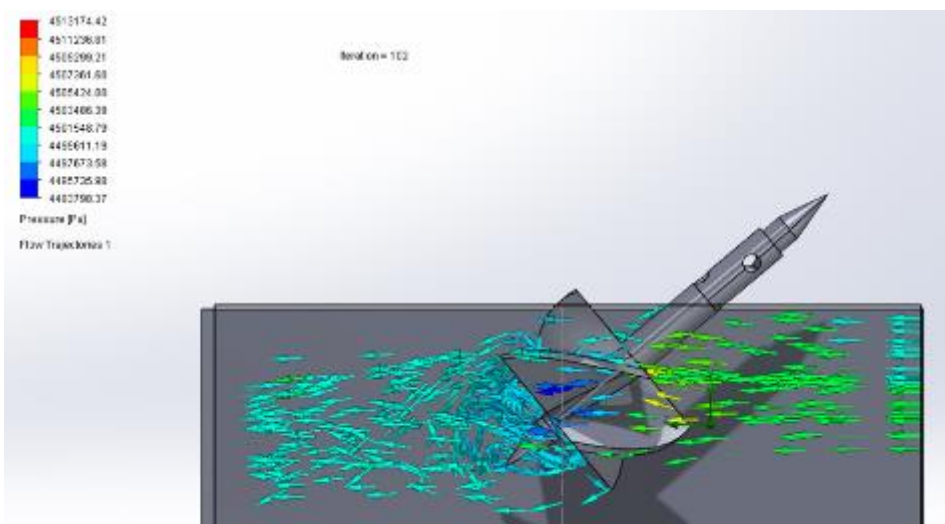


Рисунок 3.3 – Симуляція потоку під кутом -50 градусів

На рис 3.3 зображено симуляцію проходження потоку під -50 градусів, можемо побачити що потік став проходити через всю деталь не скупчуючись на одному місці також тиск зменшився з 4.5 МПа до 4.49 МПа.

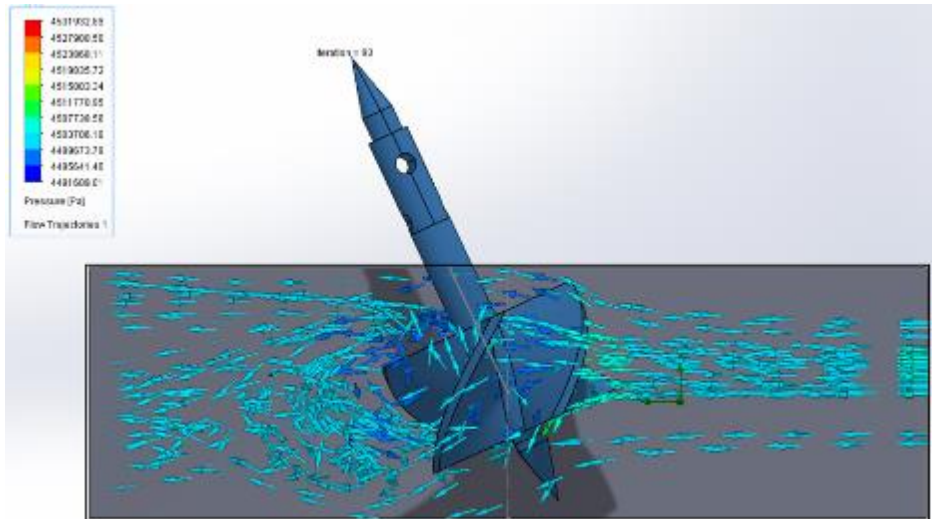


Рисунок 3.4 – Симуляція потоку під кутом 25 градусів

На рис 3.4 зображено симуляцію проходження потоку під 25 градусів, слід зазначити що завихрення потоку досить вільним і тиск залишився на рівні 4.5 МПа.

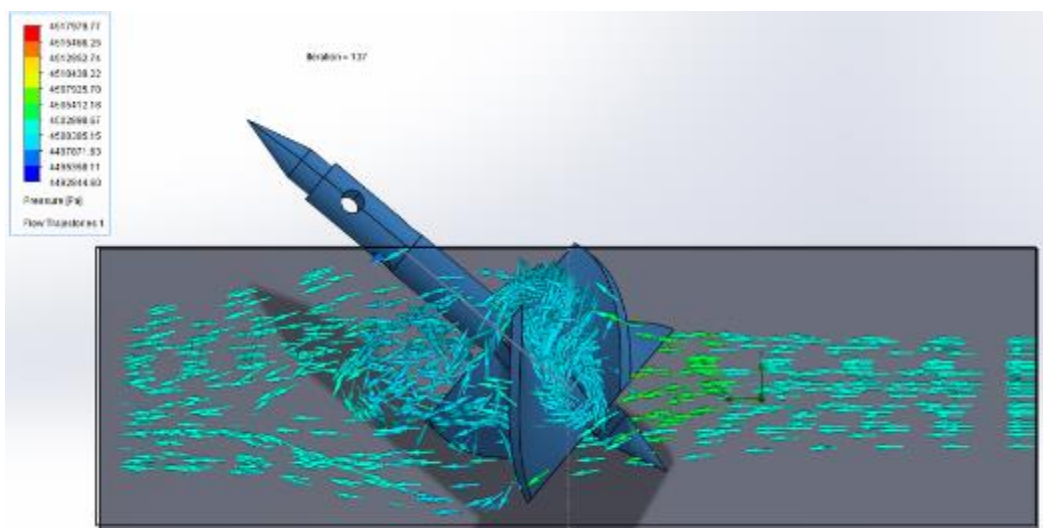


Рисунок 3.5 – Симуляція потоку під кутом 50 градусів

На рис 3.5 зображено симуляцію проходження потоку під 50 градусів, слід зазначити що завихрення потоку досить щільне і тиск залишився близько 4.5 МПа.

Також був побудований та виконаний спрощений аналіз розташування зменшеної копії лопатки турбіни під кутами $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ та в протилежному напрямку в $0^\circ, -5^\circ, -10^\circ$.

Виконуємо аналіз при розташуванні лопатки під кутом 0° по відношенню до напрямку потоку показано на (Рис. 3.6)

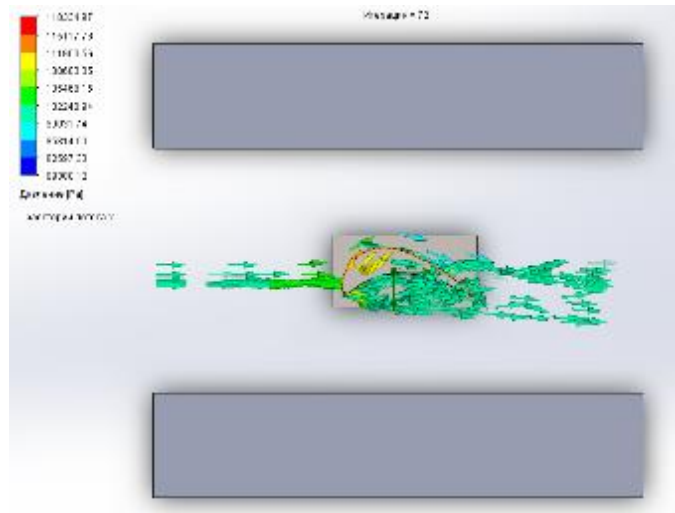


Рисунок 3.6 Симуляція потоку під кутом 0 градусів.

На рисунку 3.6 бачимо що МАІ скупчується на внутрішніх стінках деталі що означає що обробка в даній зоні не відбувається відбувається тільки по зовнішній стороні.

Далі було проведено аналіз під кутом градусів 10° що показано на рисунку 3.7

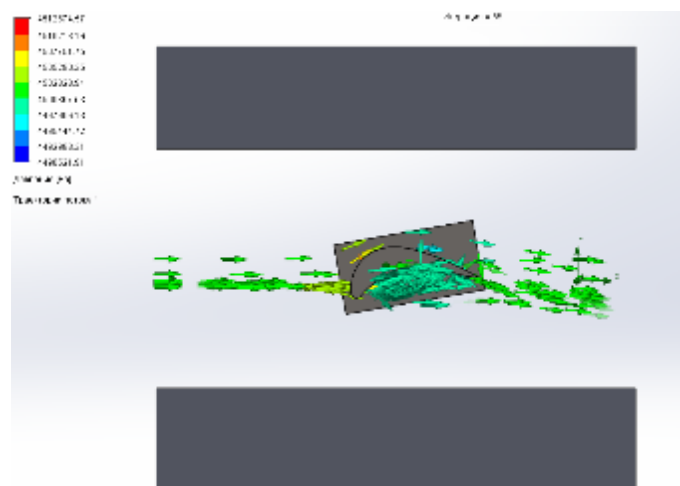


Рисунок 3.7 – Симуляція потоку під кутом 10 градусів.

Як бачимо на рисунку 3.7 проведений аналіз деталі під кутом 10 градусів показує що у деталі в середній полості скупчується абразивний порошок що дає нам зрозуміти що деталь в тій частині де не циркулює абразивний порошок буде погано оброблюватись.

Наступний етап це аналіз лопатки під кутом в 5 градусів результат аналізу показаний на рисунку 3.8:

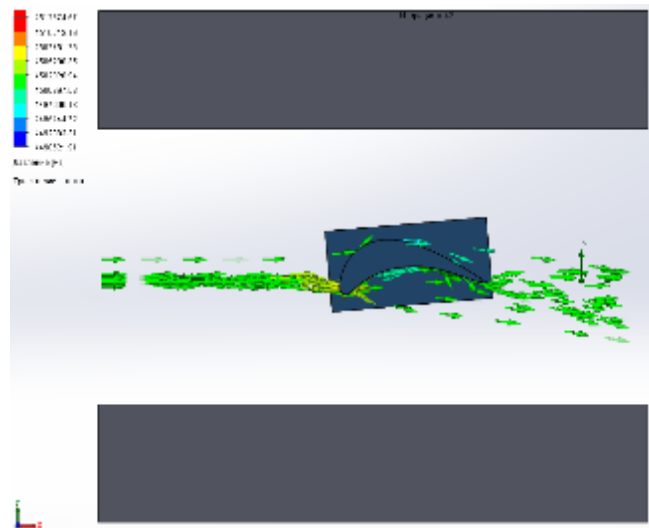


Рисунок 3.8 – Симуляція потоку під кутом 5 градусів.

Виконавши аналіз під кутом 5 градусів бачимо що магнітно абразивний порошок проходить по рівномірно і не скупчується у впадинах що означає що деталь оброблюється рівномірно.

Щоб деталь обробилась оптимально та зі всіх сторін необхідно також обробити її в протилежному напрямку. Було вирішено повести симуляцію потоку МАІ деталі в протилежних кутах (Рис3.9):

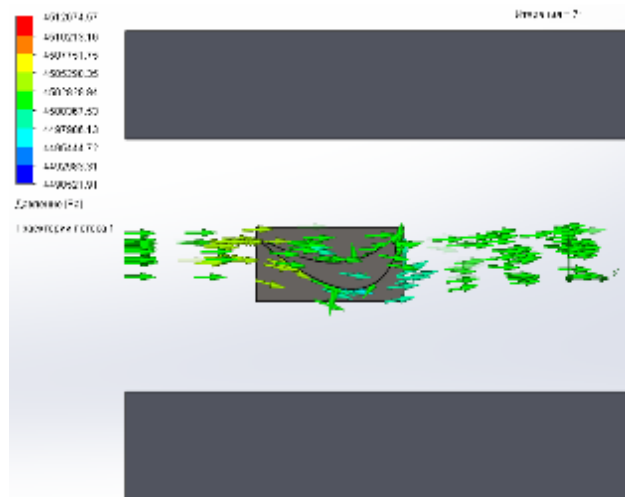


Рисунок 3.9 – Симуляція потоку під кутом 0 градусів

За результатами симуляції видно що магнітно абразивний порошок на деталі яка знаходиться в під кутом 0 градусів, все одно скупчується у впадині лопатки тому обробку перпендикулярно до робочої зони буде проводитись не оптимально.

Також проведено симуляцію потоку під кутом 5 та 10 градусів у протилежну сторону що показано рисунку 3.10 та 3.11:

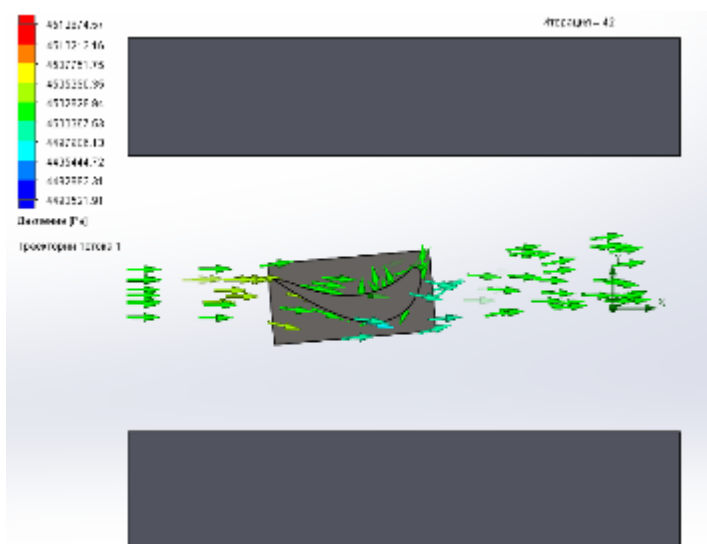


Рисунок 3.10 – Симуляція потоку під кутом 5 градусів

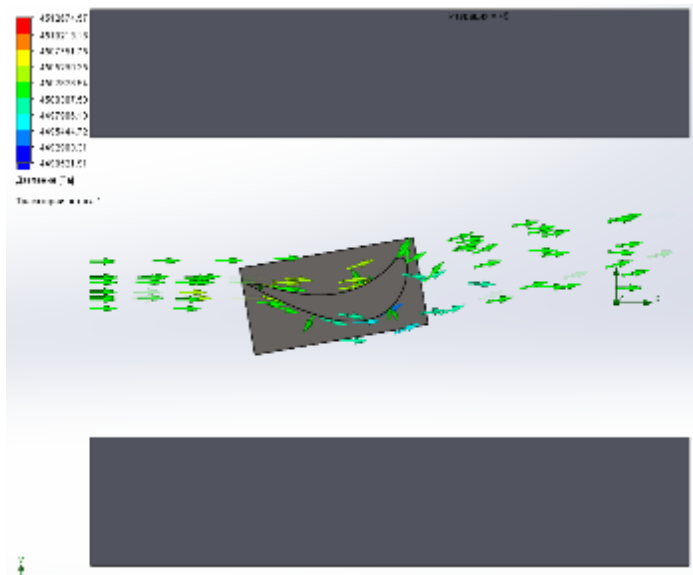


Рисунок 3.11 – Симуляція потоку під кутом 10 градусів

Виконавши аналіз потоку лопатки витратоміра можемо зазначити, що найкращий варіант обробки деталей це діапазон від 45-50 градусів він є досить продуктивним так як за результатами видно, що проходження потоку достатньо вільне без скупчення абразиву що приводить до висновку що деталь буде оброблятися рівномірно.

Для зменшеної копії лопатки газотурбінного літака було вирішено що розташування під кутом 5 градусів найоптимальніше, тому що там йде максимальне обтікання деталей що означає що деталі буде оброблюватись рівномірно. Було вирішено оброблювати деталі під кутом 5 градусів в одну та іншу сторону для найкращого ефекту.

3.2. Оптимізація положення деталі для створення керуючої програми.

Для створення керуючої програми для 3Д друку було обрано програму Autodesk Netfabb. Цей сапр автоматично підбирає оптимальне положення деталі у робочому просторі принтера. Для початку завантажує модель у форматі STL в програму.

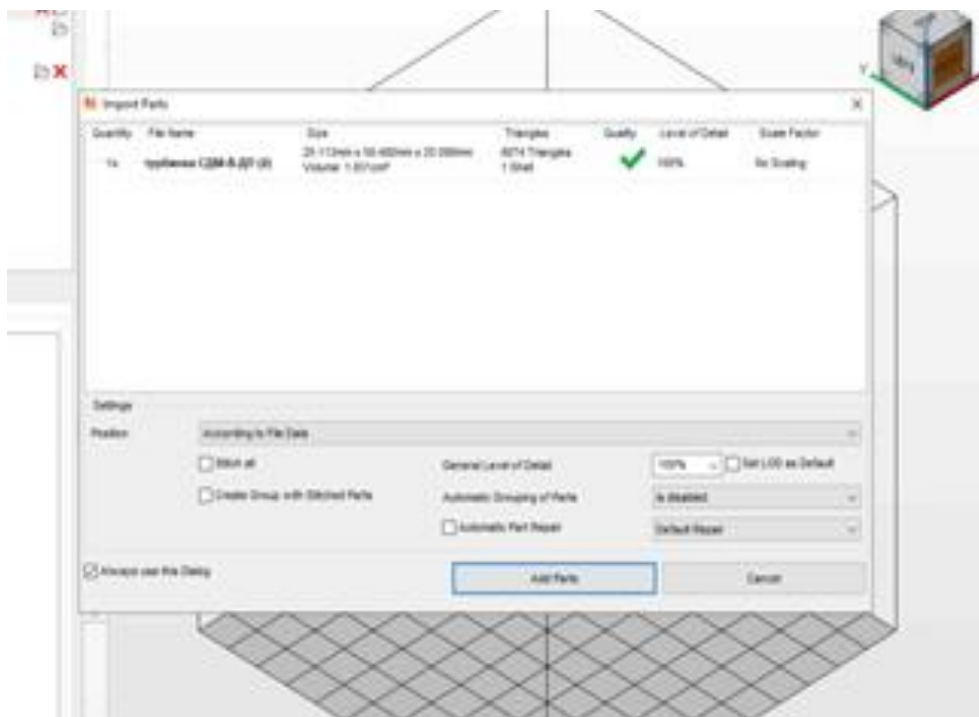


Рисунок 3.12 – Завантаження моделі у програму Netfabb

Далі в програмі є модуль який визначає критерії оптимальності розташування моделі та налаштування його допустимої зміни.

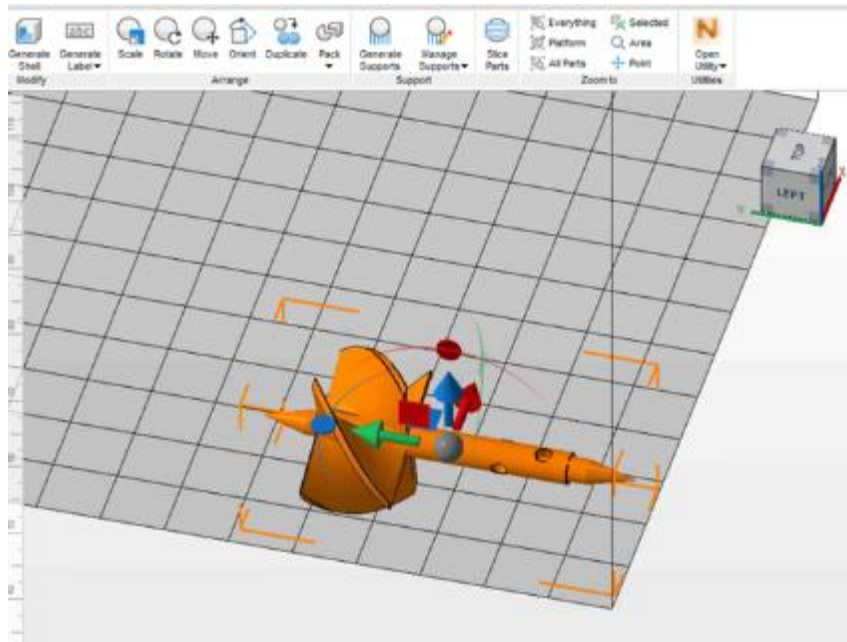


Рисунок 3.13 – Вибір модуля “Орієнтація”

Після того як зайдемо у цей модуль та налаштуємо необхідні параметри такі як положення деталі від низу платформи і т.д. програма запропонувала кілька оптимальних варіантів для друку який показаний на рисунку 3.3 та рисунку 3.4

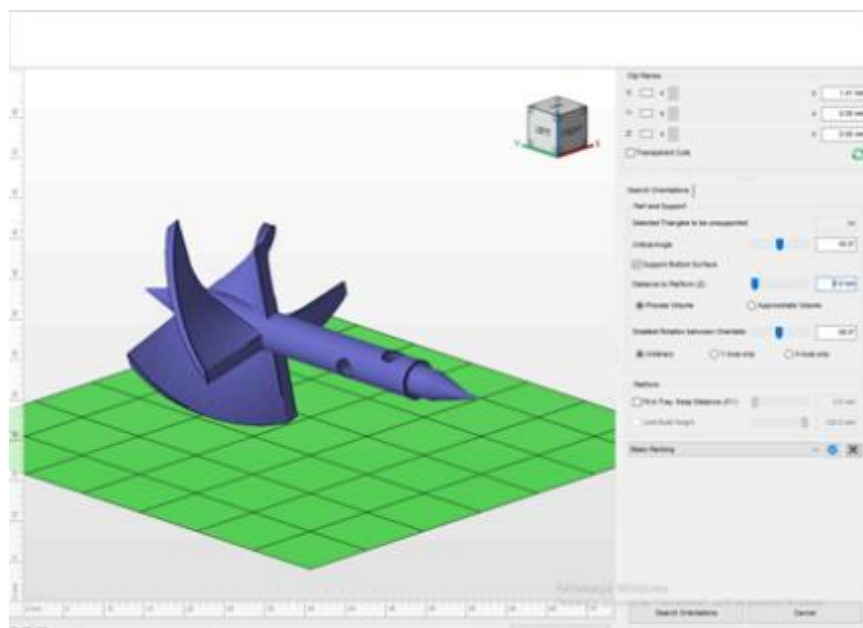


Рисунок 3.14 – Меню налаштування параметрів орієнтації

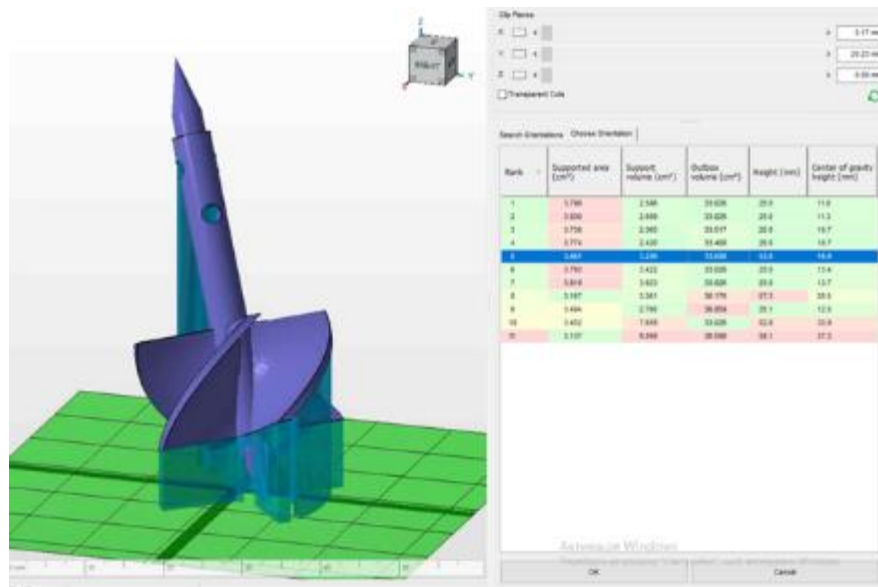


Рисунок 3.15 – Результати оптимального розташування деталі

Ми вибрали найбільш підходящий з нас варіант розташування при якому площа підтримок складає 3.451cm² об'єм підтримок складає 3.226 см² вихідний об'єм складає 33.026 см² висота підтримок 52.8 мм центр ваги 18.9 мм

3.3. Створення підтримок та керуючої програми.

Також для створення керуючої потрібно згенерувати підтримки для цього скористаємось програмою Netfabb. Після того як оптимізували положення деталі на робочому просторі відкриваємо модуль генерування підтримок та виставляємо необхідні нам налаштування такі як критичний кут 35% не критичний кут на якому можна друкувати без підтримок він складає 40% меню налаштування показано на рисунку 3.5

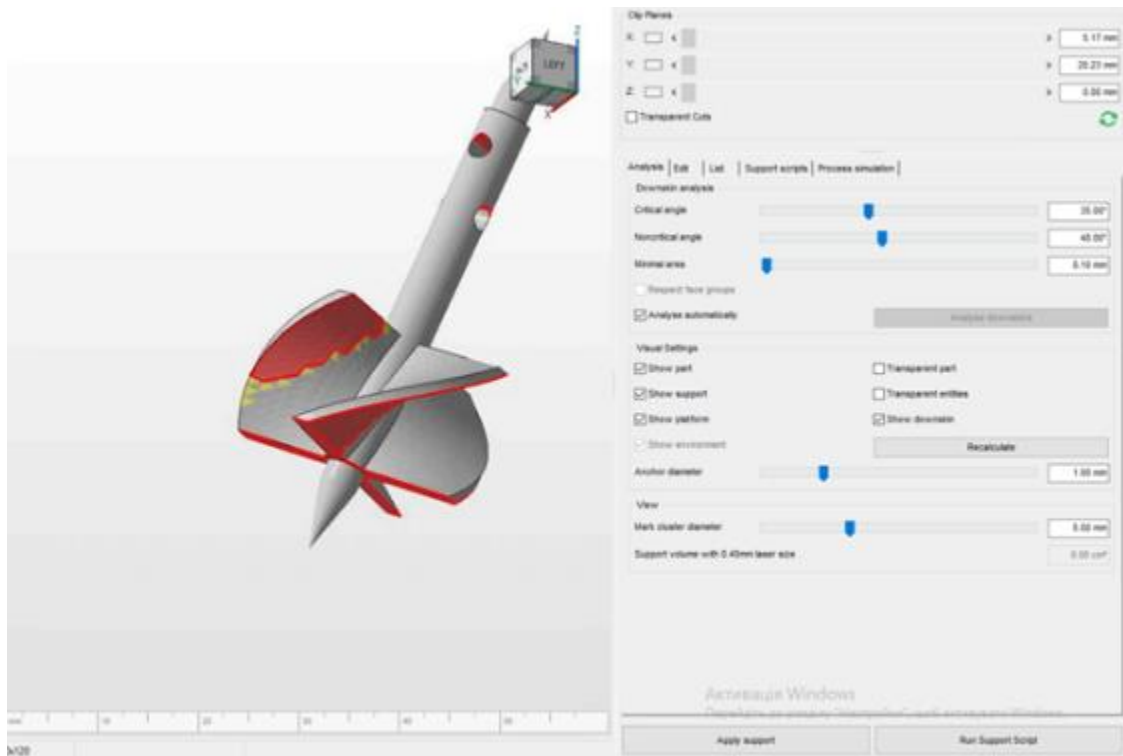


Рисунок 3.16 – Меню налаштувань для створення підтримок

Після цього обираємо варіант стратегії для створення підтримок. так як ми друкує за LPBF(SLM) технологією тому варіант створення підтримок LPBF(SLM).

Потім нам потрібно редагувати підтримки під дану деталь щоб її було максимально просто зняти з підтримки обираємо сітчастий варіант підтримок це показано на рисунку 3.6

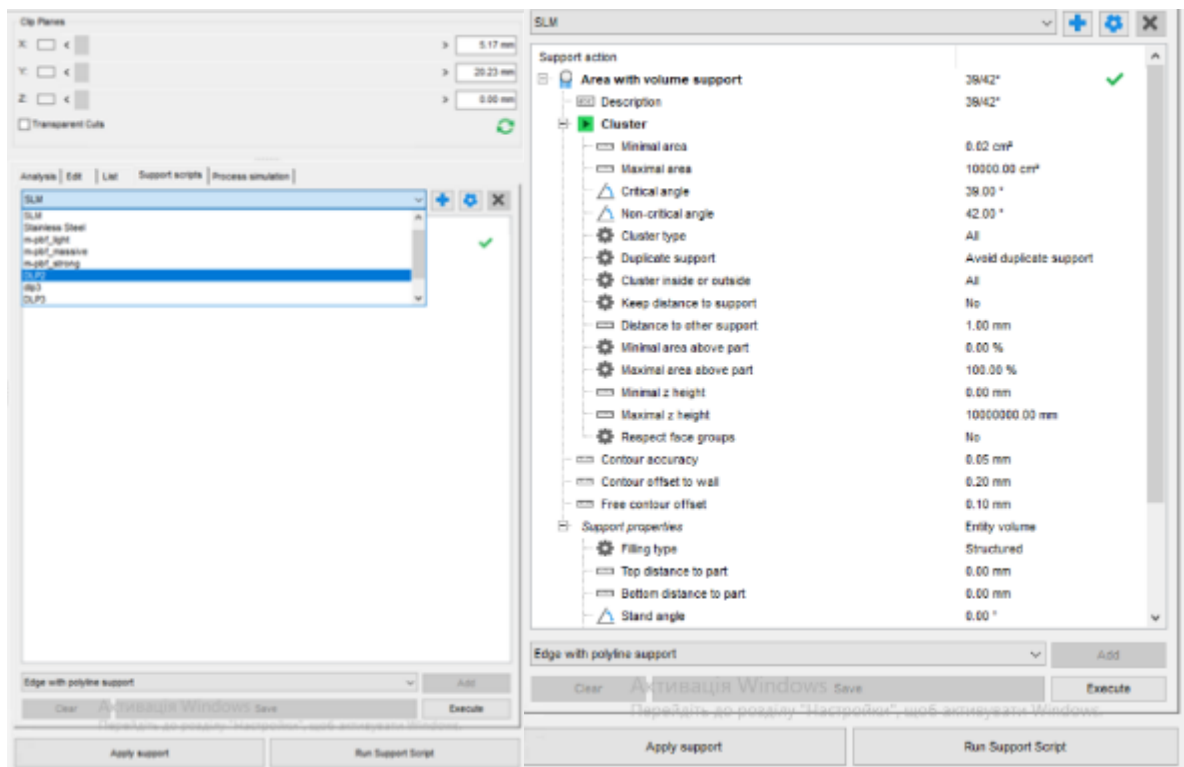


Рисунок 3.17 – Меню редагування підтримок

Після всіх налаштувань генеруємо підтримки результат показано на рисунку 3.7

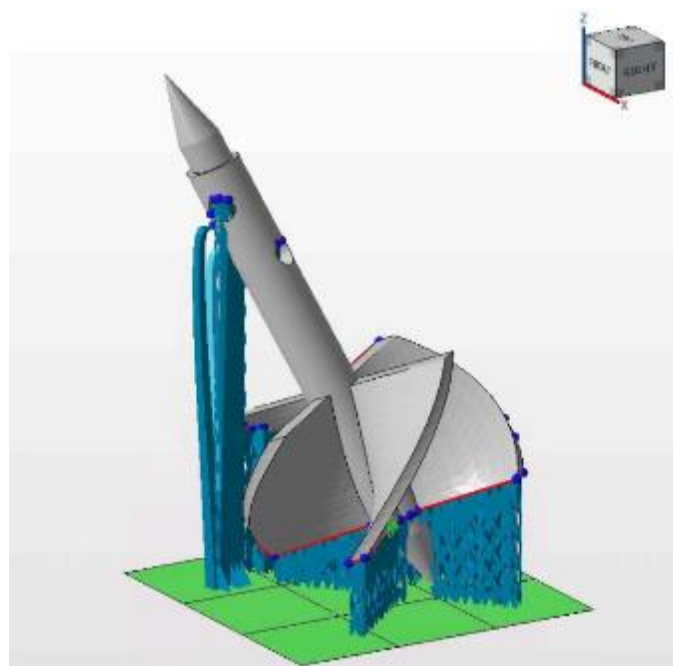


Рисунок 3.18 – результат генерації підтримок в NETFABB

Після цього результат створюємо керуючу програму для LPBF(SLM) 3Д принтера результат друку показаний на рисунку 3.8



Рисунок 3.19 – На друкована деталь

Висновок: виконавши аналіз потоку магнітного абразиву було вирішено взяти кут для обробки деталей який складає від 40 до 50 градусів, а також вибрана стратегія підтримок друку для деталей з найменшою кількістю підтримок та використаного матеріалу що обґрунтовано з економічної точки зору.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНО–АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ LPBF(SLM) ДРУКОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Вплив МАО на шорсткість поверхонь після LPBF(SLM) друку

Процес селективного лазерного спікання полягає в сплавлюванні металевих порошків під дією лазерного променя, який сканує перетин деталі. Тому на якість поверхонь значний вплив має розмір зерен. Для покращення якості поверхонь доцільно використовувати порошки меншої зернистості, але їх вартість більша, процес розподілення, зберігання та повторного використання значно ускладнюється зі зменшенням розмірів зерен. У даній роботі використовувався металевий порошок з зернистістю 60/20 мкм. Тому шорсткість поверхонь таких деталей має велику величину шорсткості. На якість поверхонь також має вплив те, що в процесі побудови деталей знаходиться при підвищеній температурі, що зумовлює твердо фазне спікання та з'єднання оточуючого порошку до деталі. В результаті деталі мають специфічну текстуру, яку для відповідальних поверхонь потрібно додатково обробляти на етапах пост оброблення.

Тому відповідно до умови роботи виконано магнітно–абразивне оброблення деталей для визначення можливості їх оброблення за допомогою цієї технології.

4.1.1. Вплив МАО на шорсткість сталльної крильчатки витратоміра

Оброблення крильчатки витратоміра, виготовленої зі сталі AISI 316L виконували на експериментальній магнітно–абразивній установці з кільцевим розташуванням робочої зони при нахиленому базуванні деталі в робочій зоні, відповідно до кутів отриманих в результаті симуляції потоків

. Оброблення виконували порошком Феромап зернистістю 630/400 мкм з мастилом Асфол при кутовій швидкості обертання крильчатки

навколо власної осі 450 об/хв (обертання за та проти годинникової стрілки) та при швидкості руху деталі вздовж робочої зони 3 м/с на "натікання" та "стікання" (рис. 4.1). Індукція магнітного поля в робочій зоні становила 0,244 Тл. Час оброблення становив 20 хв.



а



б

Рисунок 4.1 – Схема оброблення крильчатки витратоміра. а – розташування деталі в робочій зоні, б – робоча зона заповнена магнітно-абразивним порошком

Вихідна шорсткість на надрукованій деталі відрізняється на різних сторонах (рис. 4.2), оскільки, відповідно, до умов процесу друку одна сторона контактувала з підтримками (зона 2), які потім видалялись. Вихідна шорсткість в зоні 1 становила $Ra\ 13,93\ \mu\text{m}$, в зоні 2 – $Ra\ 18,4\ \mu\text{m}$.

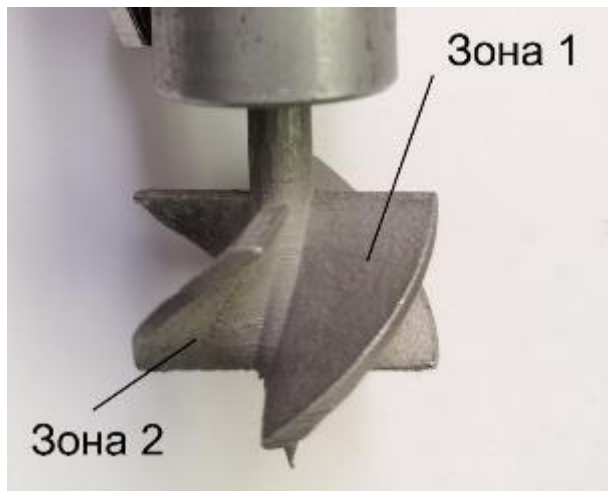


Рисунок 4.2 – Вимірювання шорсткості на крильчатці витратоміра. Зона 1 не контактувала з підтримками, зона 2 контактувала з підтримками в процесі друку

В результаті МАО шорсткість в зоні 1 зменшилась до $Ra\ 10,8\ \mu\text{m}$, а в зоні 2 збільшилась до величини $Ra\ 20,17\ \mu\text{m}$, що пов'язано з присутністю в цій зоні значних дефектів, пов'язаних з контактуючими в процесі друку підтримками. Тому для покращення шорсткості на фінішних операціях можна виконати лише при більш якісному слюсарному видаленні підтримуючих структур. Відзначимо, що в результаті МАО відбулось покращення мікропрофілю поверхні, що показано на профілограмах поверхонь до та після оброблення (рис. 4.3). На поверхні з'явився блиск (рис. 4.4).

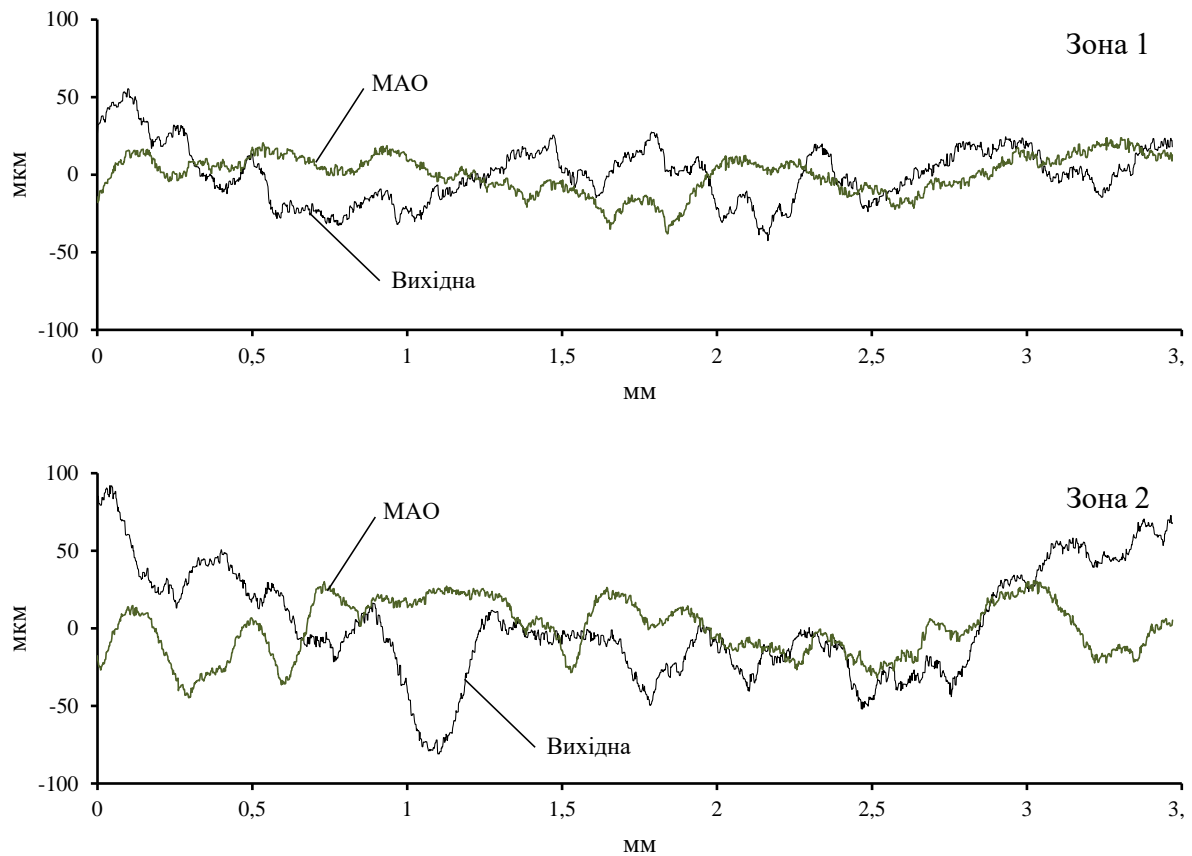


Рисунок 4.3 – Профілографи поверхонь



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд крильчатки витратоміра

4.1.2. Вплив МАО на шорсткість лопатки турбіни

Оброблення лопатки турбіни, виготовленої зі сплаву Inconel 625, виконували при вертикальному базуванні деталі в робочій зоні зі зміною кутів атаки (рис. 4.5). Оброблення виконували порошком ДЧК зернистістю

630+ мкм з алмазною пастою АСМ 20/14 мкм з мастилом Асфол. Оброблення виконували при лінійній швидкості переміщення лопатки в робочій зоні, яка складала 3 м/с. Індукція магнітного поля в робочій зоні становила 0,244 Тл. Час оброблення – 15 хв.



Рисунок 4.5 – Схема оброблення лопатки турбіни

Вимірювання шорсткості на лопатці виконували в 4 зонах, на кориті та на спинці, перпендикулярно та вздовж осі Z друку (рис. 4.6).

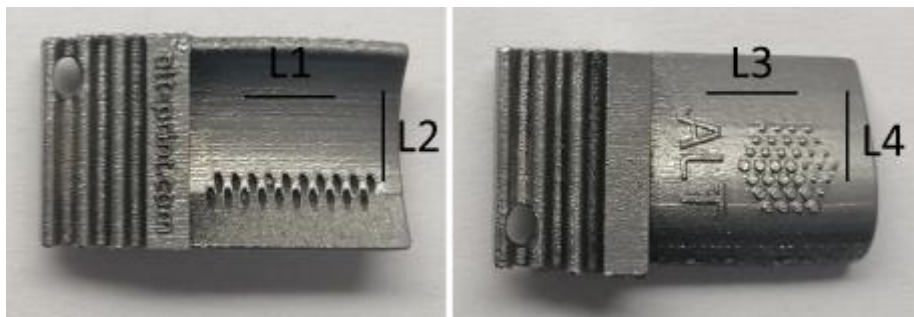


Рисунок 4.6 – Схема вимірювання шорсткості на лопатці турбіни

В результаті MAO найбільше покращення шорсткості відбулось для зони L4, незважаючи на те, що це в напрямку друку Z, для якої була найгірша вихідна шорсткість. Для цієї зони зменшення шорсткості склало 44%, таким чином вдалось зменшити шорсткість з Ra 6,4 мкм до Ra 3,57 мкм (рис. 4.7). В зоні L3 теж відбулось зменшення шорсткості, хоч не таке значне, але все ж воно склало 21%. Це можна пояснити тим фактом, що на цій ділянці

вимірювання виконувалось паралельно осі друку Z, тобто між шарами, а переважаюче відносне переміщення магнітно-абразивного інструменту та цієї поверхні відбувалось перпендикулярно до цього напрямку. Це підтверджується результатами отриманими в перпендикулярному напрямку вимірювання в зоні L4. Очевидно, що при даних умовах оброблення ця зона була в найкращих умовах. Таким чином доведена ефективність використання MAO для покращення параметрів шорсткості LPBF(SLM) друкованих деталей. Але для ефективного оброблення необхідно для кожної конструкції деталі вибирати раціональні умови оброблення, особливо це стосується складу магнітно-абразивного порошку та швидкостей відносного переміщення магнітно-абразивного інструменту та оброблюваних поверхонь.

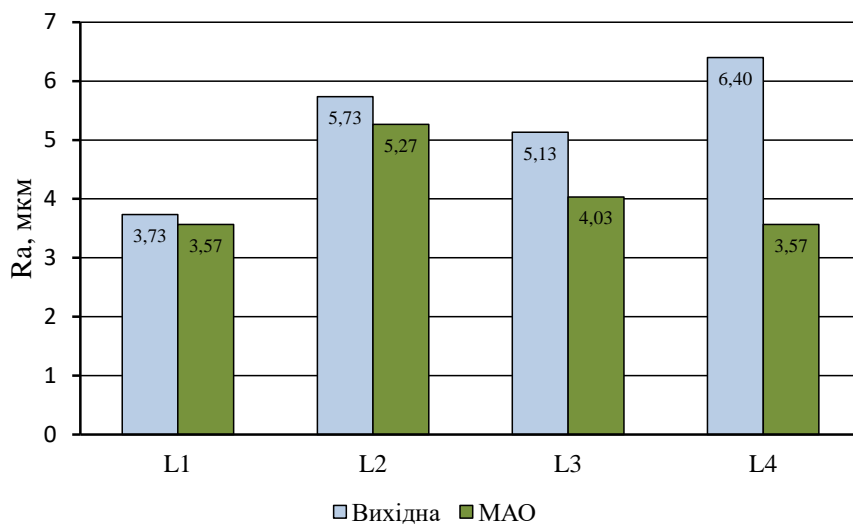


Рисунок 4.7 – Шорсткість поверхонь лопатки до та після оброблення

Що стосується ділянок L1 та L2, то вони знаходяться в зоні корита і в процесі оброблення вони були в тіньовій зоні відносно основного потоку магнітно-абразивного інструменту, а для покращення параметрів шорсткості цієї поверхні необхідно забезпечити більший кут розвороту відносно вертикальної осі в процесі оброблення.

Для всіх досліджуваних зон відбувається зрізування виступів, що проілюстровано на профілограмах поверхонь до та після оброблення (рис. 4.8).

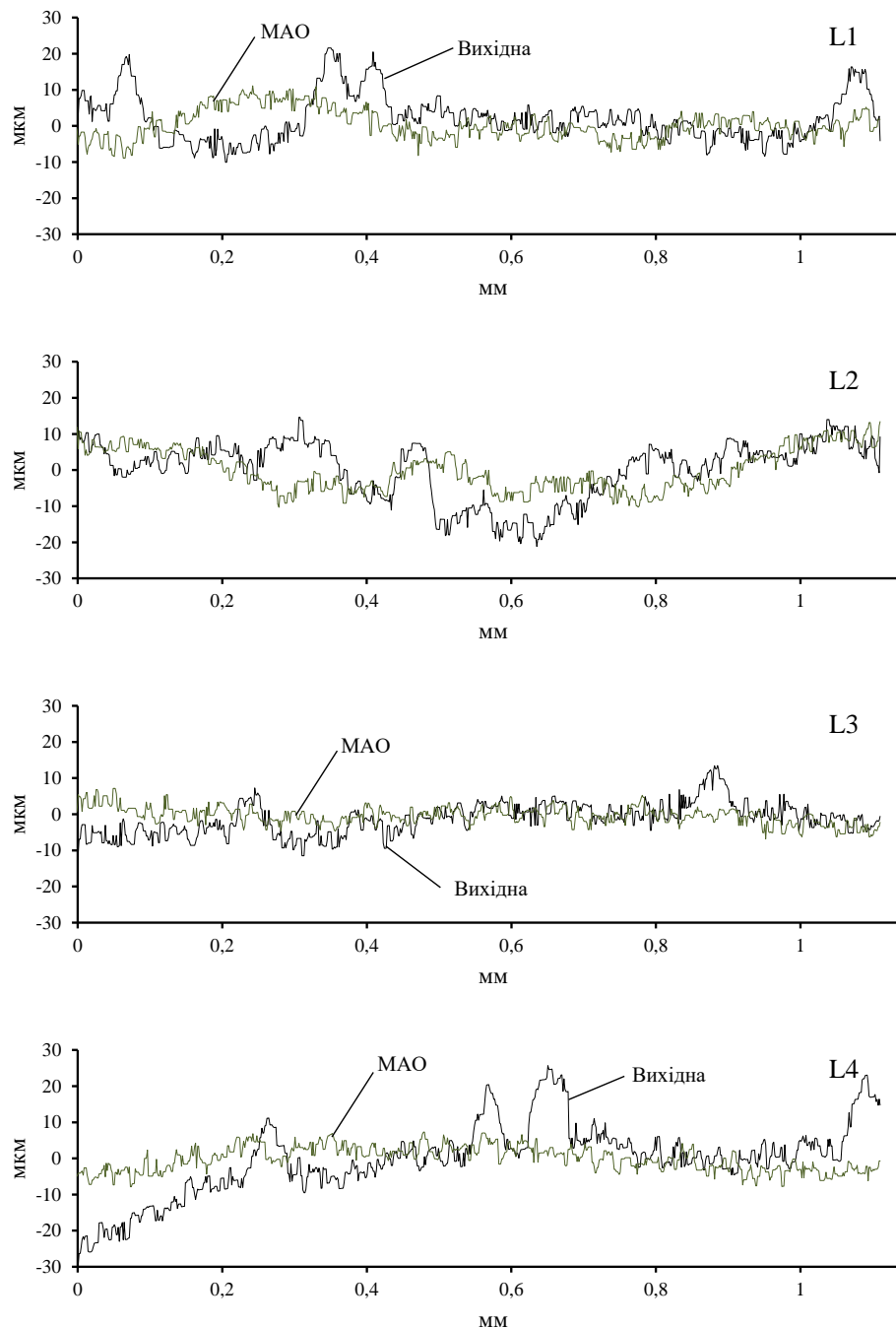


Рисунок 4.8 – Профілографи поверхонь

4.1.3. Вплив МАО на шорсткість титанових зразків для розриву

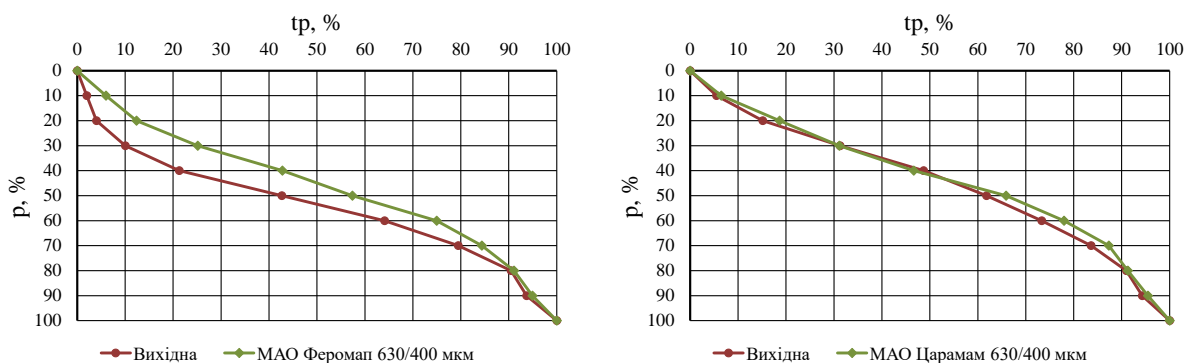
Оброблення зразків для розриву, виготовлених з титанового сплаву $Ti6Al4V$, виконували при нахилому базуванні деталі в робочій зоні в режимі та "стікання" (рис. 4.9). На зразку присутні ділянки безпосередньо після процесу друку та середня частина, яка оброблена на верстаті з ЧПК. Оброблення виконували при швидкості лінійного переміщення зразка вздовж робочої зони 3 м/с, кутовій швидкості обертання зразка навколо власної осі 500 об/хв та величині магнітної індукції 0,244 Тл. Час оброблення склав 10 хв, з яких 5 хв зразок обертася за годинниковою стрілкою навколо власної осі та 5 хв проти годинникової стрілки. В якості магнітно-абразивного порошку було обрано порошки: Феромап зернистістю 630/400 мкм та Царамам з зернистістю 630/400 мкм з мастилом Асфол.



Рисунок 4.9 – Схема оброблення титанового зразка для розриву

Вимірювання шорсткості виконували на циліндричних ділянках в напрямку осі друку Z , тобто перпендикулярно шарам. Для обох застосовуваних магнітно-абразивних порошків шорсткість вдалось зменшити на більш ніж 20 % при різній величині вихідної шорсткості (рис.10). При чому характер відносної опорної величини профілю для Царамам не змінився, а для Феромап піднявся. Це відбувається за рахунок того, що Царамам має більш гострі різальні кромки і легше повторює профіль

деталі при обробленні, тоді як Феромап більш активно зрізає вершинки шорсткості.



Ra вихідна 4,98 мкм
Ra MAO 3,8 мкм
Шорсткість зменшилась на 23,7 %

Ra вихідна 6,14 мкм
Ra MAO 4,8 мкм
Шорсткість зменшилась на 21,8 %

Рисунок 4.10 – Відносна опорна величина профілю

При обробленні титанових зразків вказаними порошками в обох випадках відбувається також очищення зразків та з'являється блиск (рис. 4.11).



Без оброблення



Феромап 630/400 мкм



Царамам 630/400 мкм

Рисунок 4.11 – Зовнішній вигляд титанових зразків до та після оброблення

4.1.4. Вплив MAO на шорсткість оправки з нержавіючої сталі

Оброблення оправок, виготовлених з нержавіючої сталі AISI 316L, виконували при нахиленому базуванні деталі в робочій зоні в режимі та "стікання" та "натікання". Оброблення виконували при лінійній швидкості

переміщення деталі вздовж робочої зони 3 м/с, кутовій швидкості обертання зразка навколо власної осі 550 об/хв та величині магнітної індукції в робочій зоні – 0,244 Тл. Час оброблення склав 20 хв.: 10 хв. в режимі "натікання" та 10 хв. – "стікання", з яких 5 хв. зразок обертася за годинниковою стрілкою навколо власної осі та 5 хв. проти годинникової стрілки. В якості магнітно–абразивного порошку було обрано порошки: Феромап зернистістю 630/400 мкм та ДЧК з зернистістю 630+ мкм з додаванням алмазної пасту АСМ 20/14 мкм з мастилом Асфол.

На зразку присутні ділянки з різними якостями поверхні, що сформувалось в результаті процесу друку та розташування деталі на робочій платформі адитивної машини, тому вимірювання шорсткості виконували в трьох зонах в напрямку друку Z (рис. 4.12).

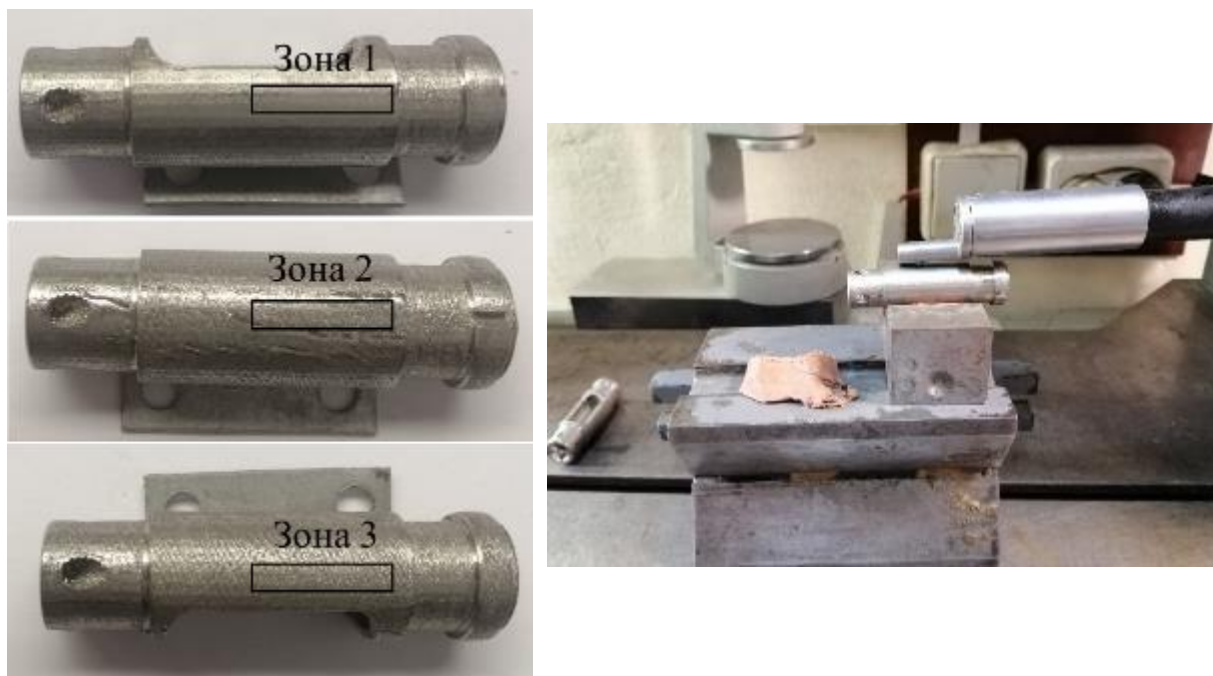


Рисунок 4.12 – Схема вимірювання шорсткості на оправці

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що кращий результат по шорсткості для порошку ДЧК 630+ мкм з алмазною пастою АСМ 20/14 мкм в порівнянні з порошком Феромап 630/400 мкм (рис. 4.13). Очевидно, що для оброблення друківаних деталей, які мають значну

твердість, необхідно використовувати абразивну складову магнітно–абразивного порошку підвищеної твердості. Для порошку Феромап 630/400 мкм найкраща зміна шорсткості відбулась лише в 1 зоні, де вихідна шорсткість була найменшою R_a 4,05 мкм, в ній шорсткість зменшилась до величини R_a 1,84 мкм.

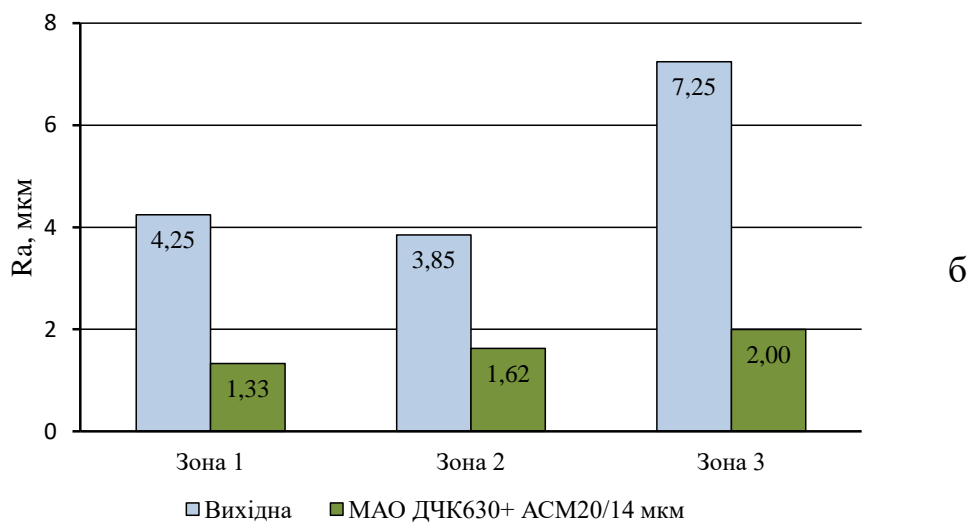
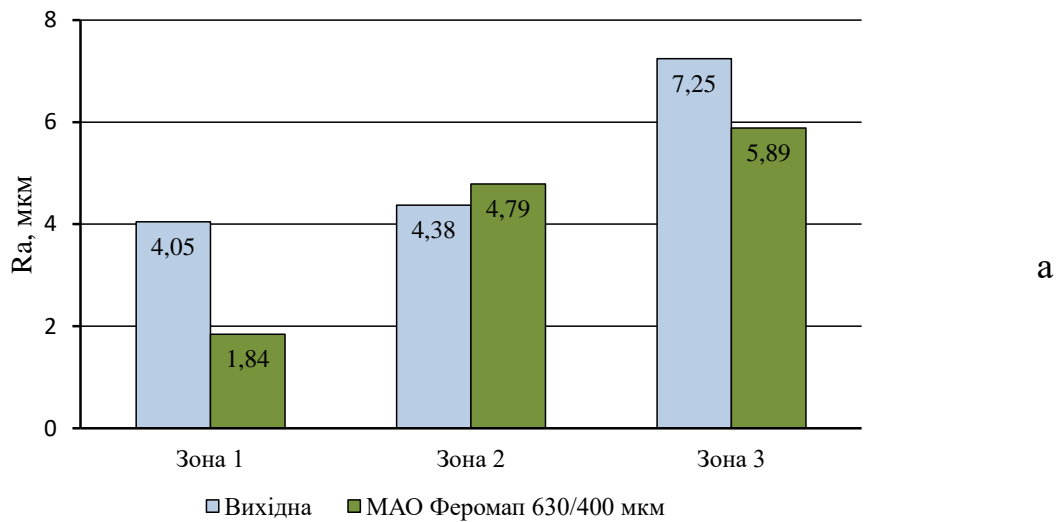


Рисунок 4.13 – Шорсткість поверхонь сталльної оправки до та після MAO при обробленні різними порошками:

а – Феромап 630/400 мкм; б – ДЧК630+ АСМ20/14 мкм

При використанні магнітно–абразивного інструменту, який складався з ДЧК 630+ мкм та алмазної пасті АСМ 20/14 мкм, шорсткість у всіх зонах

значно знизилась. Так в зоні 1 шорсткість зменшилась на 2,92 мкм, в зоні 2 – на 2,23 мкм, а в зоні 3 – на 5,25 мкм.

Відмітимо той факт, що для обох порошків відносна опорна величина профілю стає однаковою для всіх зон (рис. 4.14). Для Феромап 630/400 мкм для зон 2 та 3 вона практично не змінюється, а для зони 3 вона стає такою ж як і для двох попередніх ділянок.

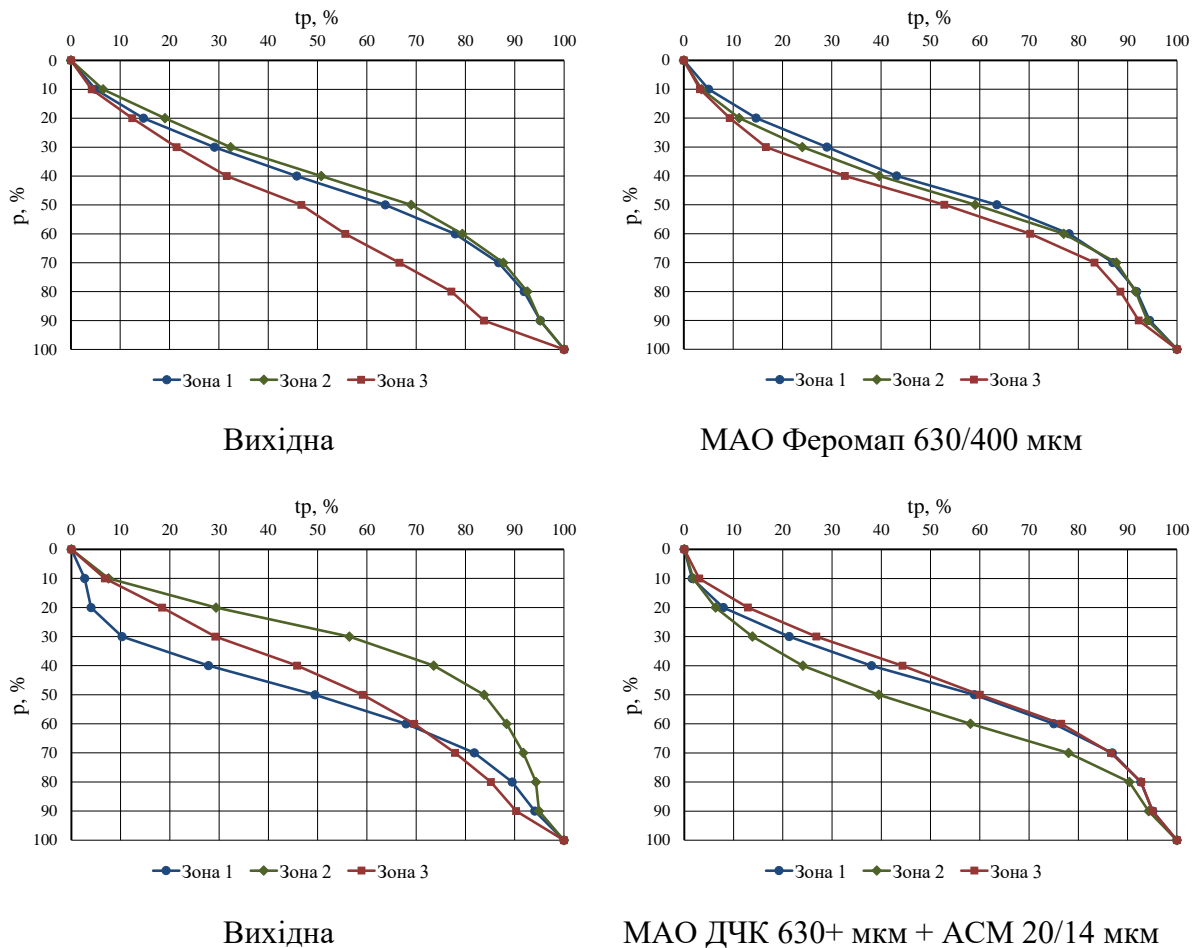


Рисунок 4.14 – Відносна опорна величина профілю сталейних оправок

Для порошку ДЧК 630+ мкм + АСМ 20/14 мкм найбільша зміна відносної опорної величини профілю відбулась в зоні 2.

Зовнішній вигляд поверхонь оправок до та після MAO представлено на рисунку 4.15. При використанні порошку з алмазною пастою відбулось розполірування поверхні за рахунок зрізування піків шорсткості, тоді як для

Феромап текстура поверхні практично не змінилась, але з'явився блиск, якого для ДЧК немає, оскільки на поверхні присутні мікроцарапини від абразивної складової магнітно-абразивного порошку. Для досягнення блиску, очевидно, необхідно виконати ще другий етап оброблення з алмазною пастою меншої зернистості.



Рисунок 4.15 – Зовнішній вигляд поверхонь сталейних оправок в зонах 1, 3.

а – Феромап 630/400 мкм; б – ДЧК630+ АСМ20/14 мкм

4.1.5. Вплив МАО на шорсткість сталюї профільної труби

Оброблення профільної труби, виготовленої з нержавіючої сталі AISI 316L, виконували за допомогою головки з постійними магнітами (рис. 4.16), яка оберталась зі швидкістю 900 об/хв, переміщалась паралельно поверхні з подачею 5 мм/хв в напрямку друку по осі Z. Магнітно–абразивне оброблення виконували порошками: Феромап 630/400 мкм та ДЧК 630+ мкм + АСМ 20/14 мкм.



Рисунок 4.16 – Схема оброблення профільної труби за допомогою головки на основі постійних магнітів

В результаті оброблення відбулось незначне зниження шорсткості з R_a 10,3 мкм до 8,9–9,1 мкм (рис. 4.14). Проте відбулось очищення поверхні та з'явився металевий блиск на противагу матовій поверхні для необробленої ділянки. В процесі оброблення відбулось зрізання вершинок шорсткості. Оскільки величина вихідної шорсткості дуже велика, то при обробленні магнітно–абразивний інструмент повторював текстуру поверхні. Для ефективного оброблення таких поверхонь необхідно виконати дослідження з іншим складом магнітно–абразивного порошку.



Рисунок 4.17 – Зовнішній вигляд поверхні профільної труби до та після оброблення

4.2. Вплив МАО на шорсткість механічно оброблених поверхонь деталей отриманих за допомогою селективного лазерного плавлення

Для отримання поверхонь з високою точністю надрукованих деталей необхідно виконувати їх механічне оброблення, наприклад на верстатах з ЧПК. Тому виконано дослідження формування мікроструктури поверхні надрукованих деталей після їх механічного оброблення. Виконано точіння зовнішньої поверхні оправки з нержавіючої сталі AISI 316L. Після чого її було оброблено на установці для магнітно–абразивного оброблення кільцевого типу. Оброблення виконано порошком Феромап 630/400 мкм в режимі "натікання" при швидкості лінійного переміщення деталі вдовж робочої зони 3 м/с. Величина магнітно індукції в робочій зоні складала 0,244 Тл. Загальний час оброблення склав 5 хв, з яких 2,5 хв деталь оберталась зі швидкістю 600 об/хв за годинниковою стрілкою і 2,5 хв – проти.

В результаті оброблення за 5 хв шорсткість поверхні зменшилась з величини Ra 0,43 мкм до 0,11 мкм. А з поверхні практично видалені сліди попереднього механічного оброблення (рис. 4.18).

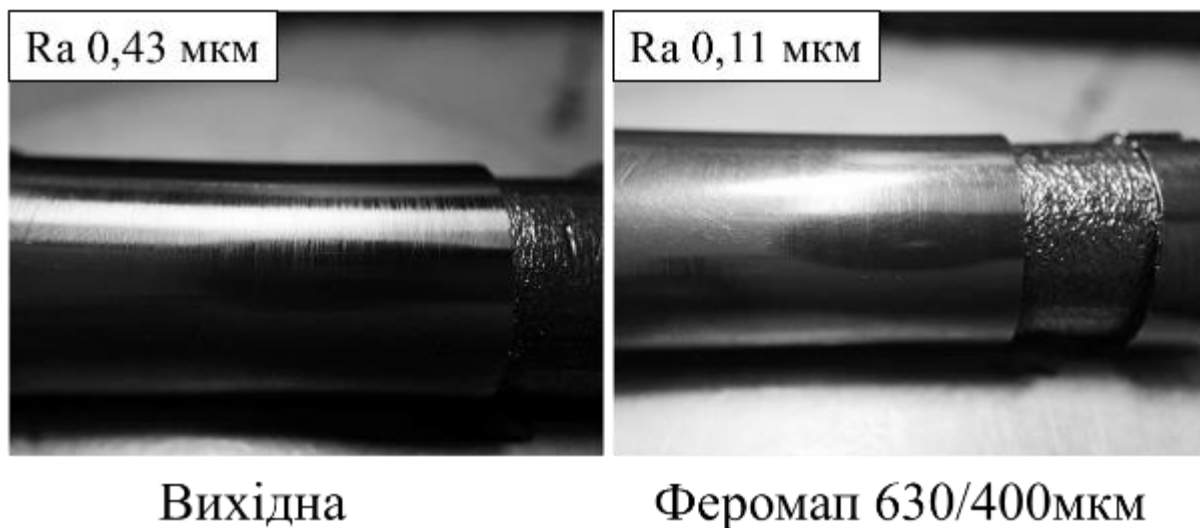


Рисунок 4.18 – Зовнішній вигляд поверхні після токарного оброблення та після МАО порошком Феромап 630/400 мкм

4.3. Вплив МАО на твердість поверхневого шару оброблюваних деталей.

В процесі магнітно–абразивного оброблення відбувається не тільки зміна мікрогеометрії оброблюваних поверхонь, а і зміна фізико–механічних властивостей поверхневого шару. Для визначення впливу МАО на ці параметри визначимо мікротвердість поверхонь зразка зі сплаву титану Ti6Al4V і та нержавіючої сталі AISI 316L з розділів 4.1.3 та 4.2. Вказані зразки було оброблено порошком Феромап 630/400 мкм. Вимірювання виконували на мікротвердомірі ПМТ–3 при навантаженні 100 грам, для чого вимірювали довжину діагоналі відбитка (рис. 4.19) і розраховували величину мікротвердості.

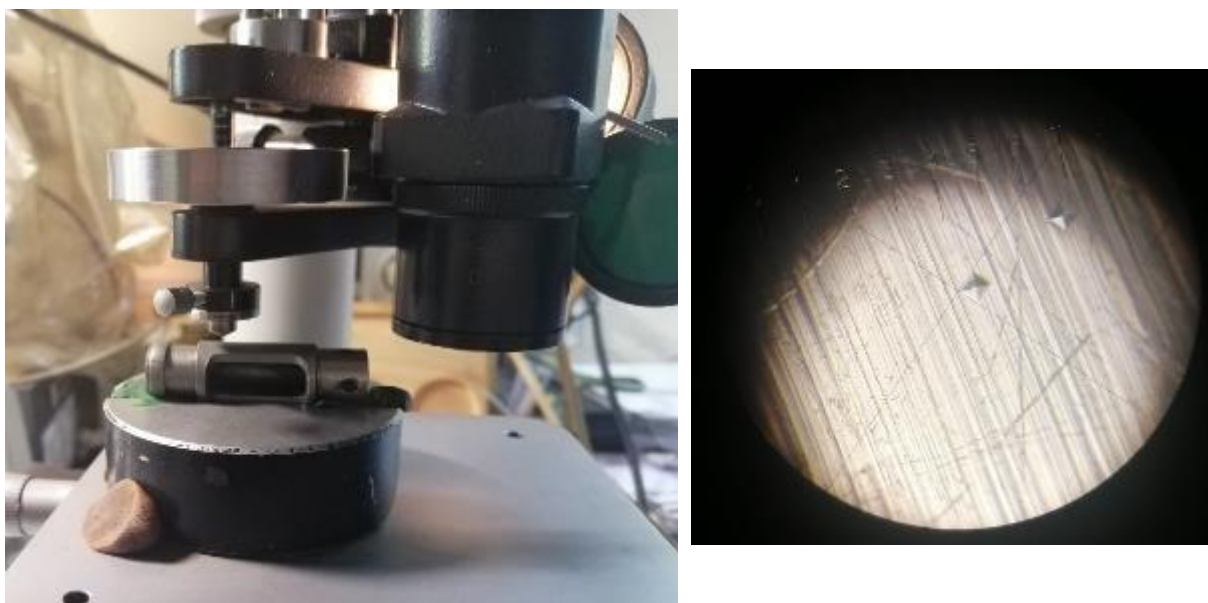


Рисунок 4.19 – Вимірювання мікротвердості

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що мікротвердість поверхонь зразків з обох матеріалів збільшується на 4,6 – 7,6 % (рис. 4.20). Відзначимо, що основною метою роботи не було визначення впливу процесу MAO на зміну фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталей отриманих методом селективного лазерного спікання. Проте в результаті дослідження встановлено, що це можливо, а для ефективного підвищення мікротвердості необхідно виконати дослідження по визначенню оптимальних параметрів процесу.

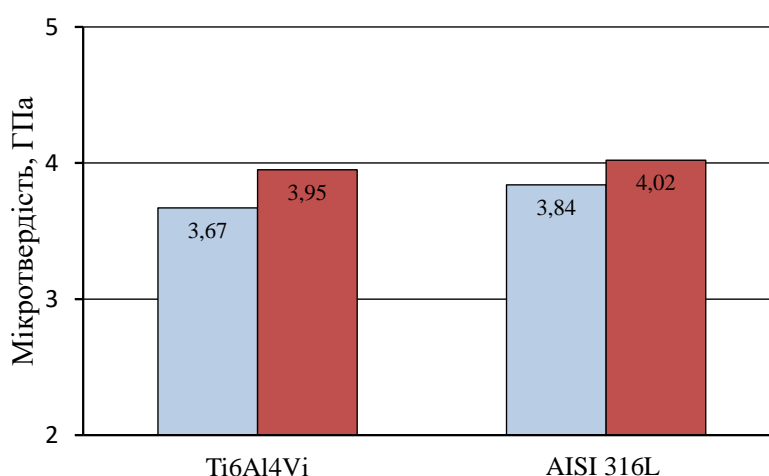


Рисунок 4.20 – Мікротвердість поверхонь до та після MAO

4.4. Висновки до розділу

В результаті експериментальних досліджень встановлено:

При обробці крильчатки витратоміра з матеріалу AISI 316L MAI Феромап 630/400 мкм відбулося зменшення шорсткості в зоні 1 з 13,93 до 10,8 мкм та в зоні 2 з 18,4 до 20,17.

При обробці Лопатки турбіни з матеріалу Inconel 625 MAI ДЧК зернистістю 630+ мкм з алмазною пастою АСМ 20/14 мкм відбулося зменшення шорсткості на 32%.

При обробці титанових зразків марки Ti6Al4Vi для розриву MAI Феромап зернистістю 630/400 мкм та Царамам з зернистістю 630/400 мкм для обох застосованих при магнітно абразивній обробці вдалось зменшити більш ніж на 20%.

При обробці оправки з нержавіючої сталі марки AISI 316L найкращий результат був досягнутий MAI ДЧК630+ АСМ20/14 мкм вдалось зменшити шорсткість з 7.25 до 2 мкм.

При обробці сталюї профільної труби з нержавіючої сталі марки AISI 316L вдалось зменшити шорсткість з 10.3мкм до 8.9 мкм.

При обробці механічно оброблених поверхонь деталей отриманих за допомогою селективного лазерного плавлення вдалось зменшити шорсткість з 0.43мкм до 0.11мкм.

Після обробки деталей було проведене вимірювання мікротвердості поверхонь зразків Ti6Al4Vi та AISI 316L та визначено що мікротвердість по зразків з обох матеріалів збільшується на 4,6 – 7,6 %.

Після проведення експериментальних досліджень доведено, що використовуючи метод MAO можливе покращення шорсткості деталей але для досягнення значного покращення результатів необхідно підбирати параметри оброблення а для досягнення фінішної обробки необхідно використовувати механічну обробку в кооперації за MAO.

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Опис ідеї-проекту

Зміст ідеї. Останніми роками темпи розвитку сучасного виробництва та нових технологій потребують прискоренні технологічної підготовки виробництва, оскільки від цього значною мірою залежить термін випуску нового товару на ринок. Значна більшість високотехнологічних виробництв, таких як машинобудування, будівництво, автомобілебудування, гірничодобувна промисловість, медицина, ювелірна справа та ін., значною мірою використовують 3Д друк, тому на виробництвах виконують певні види пост обробки деталей після друку. В даний час пост обробку деталей виконують традиційними методами (фрезерування, полірування, шліфування). На сьогоднішній день метод магнітно-абразивної обробки набирає обертів у використанні. За допомогою МАО можна отримати високу якість та чистоту обробленої поверхні. Такий спосіб доцільно використовувати при обробці таких поверхонь як: циліндричних зовнішніх та внутрішніх, плоских, тіл обертання з криволінійною твірною т.д.

5.2 Основні вигоди, що може отримати користувач товару

У роботі наведено деякі особливості використання цього виду обробки, які є досить дорогими при застосуванні. Тому вдосконалення методу магнітно-абразивної обробки направлені на підвищення продуктивності технологічної підготовки виробництва, надійність прийняття технологічних рішень та продуктивність реалізації обробки актуальним та необхідним на ринку інструментом, а зміст ідеї представлено у таблиці 5.1.

Таблиця. 5.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Суть ідеї полягає в тому, що за допомогою МАО забезпечити максимальне покращення поверхні яка в свою чергу покращить працездатність та зменшить час на пост обробку	Для пост обробки деталей після друку	Економія часу та коштів на пост обробку деталей традиційним методом
	покращення поверхні	Підвищення терміну експлуатації деталі

5.3 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.

Всі компанії, які виготовляють обладнання для пост обробки деталей після 3Д друку, надають інформацію лише по окремих способів та обробки деталей після 3Д друку. Основними конкурентами по виготовленню на сьогоднішній день попередньо є фірми: HAAS, Авенор

Всі компанії, що виробляють обладнання для обробки деталей після 3Д друку, надають інформацію лише на окремі способи та обробки деталей після 3Д друку. Основними конкурентами по виготовленню на сьогоднішній день є фірми: HAAS, Авенор

У табл.5.2. наведено визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту, де F-слабка сторона, N - нейтральна сторона, А-сильна сторона

Таблиця 5.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні концепції конкурентів		
	Мій проект	HAAS	Авенор
Технологічне підготовлення виробництва	A	A	F
Розроблення стратегій оброблення.	A	N	F
Розроблення стратегій оброблення.	A	F	F
Формування необхідної якості	A	A	N
Вибір технологічного обладнання.	A	N	F

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї товару є основою для формування його конкуренто спроможності.

5.4 Технологічний аудит ідеї проекту

Виконуємо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Здійснити максимального покращення поверхні деталі, за допомогою МАО	Технологія 1 : В спеціальне пристосування встановлюється Деталь, закріплюється у шпиндель магнітно - абразивного обладнання та виконується обробка.	Технологія наявна	Повністю доступна.
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Технологія 1			

В результаті аналізу технологічної здійсненності ідеї проекту встановлено технологію вимірювання, що дозволяє вирішити поставлені завдання.

5.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначаємо ринкові можливості, які можливо використовувати при ринковому впровадженні проекту. Це дозволяє спланувати напрями покращення проекту з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Виконуємо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4).

Показники стану ринку	Характеристика
Кількість головних гравців, од	1..2
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1500000 / 55000
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Особливі соціально – економічні умови.
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30-40%

Таким чином, можна зробити висновок, що на ринку не так багато наявних гравців, що пропонують продукцію з не високою додатковою вартістю.

Визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 5.5. -Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Устаткування не великих габаритів	Стоматологічні, ювелірні підприємства, які знаходяться в невеликих містах	Акцент на зменшенні витрат за рахунок малих габаритів. Мала собівартості операції.	- до продукції: устаткування повинно мати належну міцність - до компанії-постачальника: можливість швидкої доставки
Малі затрати у часі	Стоматологічні, ювелірні, автомобілебудування, машинобудування.	Акцент на високій швидкості оброблення інструменту.	- до продукції: висока точність та якість - до компанії-постачальника: можливість забезпечити устаткуванням належної точності

5.6 Аналіз ринкового середовища

Проводимо аналіз ринкового середовища: складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.6. та 5.7).

Таблиця 5.6. -Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Загальний спад попиту на оброблену продукцію	Новий, тільки виготовлений інструмент буде коштувати дешевше або так само як і переточений.	Розробка нового устаткування для обробки або нової технології виготовлення інструменту.
Залежність від постачальників деталей для устаткування	Невелика кількість постачальників деталей регулюють ринок, володіють значною переговорною силою.	Довгострокова співпраця з постачальниками, створення взаємовигідних умов співпраці
Нове устаткування	Поява нової установки, яка буде коштувати дешевше.	Перегляд технології виготовлення та вдосконалення обладнання

Таблиця 5.7. -Фактори можливостей

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Вдосконалення спеціальної установки	Можливість оброблення більшої кількості інструментів, технології їх виготовлення, підвищення показників ефективності	Постійний розвиток технологій
Вихід на нові ринки	Збільшення об'єму продажів, співпраця з новими підприємствами та країнами..	Пошук нових ринків збуту та партнерів
Впровадження франшиз, філіалів та відділів в різних регіонах	Створення власних центрів сервісу, обслуговування та виготовлення продукції, розвиток об'ємів виробництва	Своєчасне проведення аудиторських та маркетингових досліджень

Виконуємо аналіз пропозиції: визначаємо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції олігополія	На ринку представлені переважно великі міжнародні компанії, їх кількість невелика. Практично відсутні	Боротьба за галузі на які завжди буде попит там де великі компанії мають дуже високу ціну.

	малі підприємства.	
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Компанії виробники представлені в різних країнах світу.	Розвиток логістичних і транспортних систем.
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Переважно виробники спеціалізуються на виготовленні установки. В меншій мірі присутня міжгалузева конкуренція.	Концентрація над конкретними ідеями.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Найбільшого значення має призначення товару.	Представлення на ринку різних видів установки.
5. За характером конкурентних переваг - цінова/нецінова	Конкуренція як за рахунок перспективних технологій так і за рахунок зниження цін	Забезпечити компромісне рішення
6. За інтенсивністю - марочна	На ринку висока роль бренду	Приділити увагу маркетинговій кампанії для реалізації на ринку.

Перелік факторів конкурентоспроможності наведено в табл. 5.9.

Таблиця 5.9. - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
Оригінальна ідея створення технології вимірювання силових параметрів	Розглянута технологія дає можливість в подальшому створити установку для МАО для будь яких деталей після 3Д друку.
Режими різання при обробці	Даний метод дозволяє обробити інструмент за 3-5 хв, чого не

	можливо сказати про інші.
Відсутність конкурентів всередині країни	Мінімальна залежність цін на внутрішньому ринку від курсу валют, витрат на транспортування тощо.
Використання ефективного методу обробки інструментів	МАО комплексно покращує якісні характеристики інструменту, тоді як інші методи покращують тільки один або декілька показників

Висновок. З огляду на конкурентну ситуацію вихід ідеї на ринок можливий, проте слід розраховувати на ті галузі, де конкуренти мають найменший вплив.

5.7 SWOT-аналіз

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.10) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.9).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 5.10. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: - позитивне ціноутворення на внутрішньому ринку; - прогресивна конструкція установки - ефективний технологічний процес; - малий час обробки; - мала вартість роботи устаткування та переточеного інструменту.	Слабкі сторони: - висока частка імпорту для забезпечення виробництва; - складність виходу на нові ринки;
Можливості: - Вдосконалення власної науково-технічної бази; - Вихід на нові ринки;	Загрози: - Загальний спад попиту на вироблену продукцію; - можливість створення нового обладнання;

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуємо з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.11).

Таблиця.5.11 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Забезпечення надійних і незалежних постачальників продукції	Невелика кількість виробників, що спеціалізуються на випуску деталей, не складають конкуренції на ринку інструменту (Китай). Логістичні системи та об'єми продукції розвинуті на високому рівні.	2..3 місяці.
Освоєння власного заготівельного виробництва.	Велика кількість виробників деталей, на внутрішньому ринку також	Для досягнення конкурентної точності необхідно 2..3 роки
Вихід на нові ринки збуту (міжнародні)	Можливо за умов розвитку об'ємів виробництва та маркетингу.	2..5 років

Висновок. В результаті аналізу можна зробити висновок, що освоєння власного заготівельного виробництва є перспективним і дало б змогу бути незалежними в питанні заготовок.

5.8 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл.5.12).

Визначаємо стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл.5.12).

Таблиця 5.12 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачі в сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Машинобудування, будівництво, автомобілебудування, гірничодобувна промисловість, медицина, ювелірна справа.	Більша частина готова прийняти інструмент	Прихований попит (потенційний). Багато споживачів можуть мати велику потребу, яке не може бути задоволене наявними на ринку інструментами.	Інтенсивна конкуренція.	Має великий потенціал, збільшення конкурентних переваг.
Які цільові групи обрано: Підприємства машинобудівної та медичинської галузей, що часто запускають у виробництво нові високотехнологічні деталі з підвищеними вимогами до якості та надійності				

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обираємо цільову групу, до якої входять підприємства машинобудівної та

для медичинських галузей, та стратегію охоплення ринку - стратегію диференційованого маркетингу.

5.9 Стратегія конкурентної поведінки

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.13).

Таблиця 5.13 - Визначення базової стратегії розвитку

Чи є проект «першопроходець» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Проект пропонує один із способів вирішення відомих проблем, дуже близький до вже відомих.	Пошук і розвиток клієнтської бази є одним з основних аспектів розвитку компанії.	Спільні характеристики товару продиктовані чинними стандартами та нормами підприємств.	заняття конкурентної ніші

Висновок. Стратегія заняття конкурентної ніші є найбільш актуальною, оскільки при наведених технологіях та конструкції інструменту знижується його собівартість. Це відкриває нові можливості для клієнтів, які раніше не користувалися цим різновидом обробки (дозволяє застосовувати нові матеріали, оптимізувати технологічні процеси, зменшити витрати тощо). Такі ніші не освоєні конкурентами і це дозволяє зарекомендувати себе над ринком.

5.10 Розроблення маркетингової стратегії проекту

Формування маркетингової концепції товару наведено в табл. 5.14.

Таблиця 5.14 -Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
реальні значення покращених деталей після друку	Простий та якісний пристрій малих розмірів	Відсутність додаткової вартості товару; - Низькі логістичні витрати
якість поверхні	3 – 5 хв та отримання необхідної поверхні	Якісний деталі без сколів та мікронерівностей

5.11 Визначення цінових меж товару

Наступним кроком є визначення цінових кордонів, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар (залишкове визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), що передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів.

Для порівняння за одиницю ціни прийнято вартість устаткування компаній конкурентів – 40000 грн., а за обробку – 1500 грн.

Таблиця 5.15. Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
0.05..0.8	0.9..1.5		0,65..0,95

Висновок. Межі ціни встановлено таким чином, щоб запропонований товар міг охоплювати як конкурентні галузі, так і нові, де використовують товари-замінники.

5.12 Визначення оптимальної системи збуту

Визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.16).

Таблиця 5.16. Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Надають вибір постачальникам з широким асортиментом продукції та логістичною доступністю	Забезпечення в необхідних об'ємах різних підприємств-клієнтів.	В межах регіону, країни	Власна система збуту

5.13 Висновки:

1. Рентабельність проекту яка сягає 20-40% також присутність попиту на ринку який є постійно зростаючим

2. Проект є перспективним оскільки потенційні користувачі це весь спектр виробництва де присутнє фінішне оброблення, можливість широкого впровадження в будь-яку галузь машинобудування.

3. Проект є конкурентоспроможним, проте можуть виникнути проблеми на початкових етапах розвитку через те, що метод та послуга мало відома, що насторожить клієнтів.

4. Для впровадження проекту для виходу на ринок доцільно залучення інвесторів, щоб надати більших обертів проекту. Строк реалізації 2..3 місяці.

5. Розвиток проекту є доцільним оскільки ринок збуду постійно зростає за рахунок відкриття нових підприємств по обробленні металу.

ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу науково технічного матеріалу було встановлено, що одним з можливих перспективних методів покращення якості поверхні 3-Д друківаних деталей методом селективного лазерного плавлення є магніто-абразивне оброблення. Даний метод надає деталям такі характеристики як:

- Рівномірне зменшення шорсткості робочих поверхонь;
- Підвищення твердості поверхневого шару матеріалу (додатковий наклеп).

Доцільність проведення МАО для деталей після 3-Д друку пояснюється необхідністю пост обробки після друку.

2. В результаті аналізу сучасних методів пост-оброблення деталей після друку було визначено що перспективним є метод магнітно-абразивне оброблення. Метод забезпечує :

- Швидкість обробки;
- Комплексне покращення зовнішнього шару деталей;
- зміцнення поверхневого шару.

Раціональність використання МАО для пост-оброблення деталей в умовах великих магнітних щілин пояснюється необхідністю покращення шорсткості поверхневого шару деталей після друку.

3. Був виконаний аналіз потоку лопатки витрато міра який показав, що найкращий діапазон обробки деталі діапазон від 40-50 градусів він є досить продуктивним тому що за результатами експерименту видно, що деталь оброблювалась рівномірно.

Для лопатки газотурбінного двигуна було вирішено що розташування під кутом 5 градусів найоптимальніше, тому щ йде максимальне обтікання деталей що означає що деталі буде оброблюватись рівномірно, а для більш ефективного їх оброблення необхідно змінювати положення лопатки в робочі зоні.

4. Результати експериментальних досліджень встановили:

Результати експериментальних досліджень встановили:

При обробці крильчатки витратоміра з матеріалу AISI 316L MAI Феромап 630/400 мкм відбулося зменшення шорсткості в зоні 1 з 13.93 до 10.8 мкм та в зоні 2 з 18.4 до 20.17.

При обробці Лопатки турбіни з матеріалу Inconel 625 MAI ДЧК зернистістю 630+ мкм з алмазною пастою АСМ 20/14 мкм відбулося зменшення шорсткості на 32%.

При обробці титанових зразків марки Ti6Al4Vi для розриву MAI Феромап зернистістю 630/400 мкм та Царамам з зернистістю 630/400 мкм для обох застосованих при магнітно абразивній обробці вдалось зменшити більш ніж на 20%.

При обробці оправки з нержавіючої сталі марки AISI 316L найкращий результат був досягнутий MAI ДЧК630+ АСМ20/14 мкм вдалось зменшити шорсткість з 7.25 до 2 мкм.

При обробці сталюї профільної труби з нержавіючої сталі марки AISI 316L вдалось зменшити шорсткість з 10.3мкм до 8.9 мкм.

При обробці механічно оброблених поверхонь деталей отриманих за допомогою селективного лазерного плавлення вдалось зменшити шорсткість з 0.43мкм до 0.11мкм.

Експериментально встановлено, що для зразків Ti6Al4Vi та AISI 316L мікротвердість на поверхнях деталей з обох матеріалів збільшується на 4,6 – 7,6 %.

Після проведення експериментальних досліджень доведено, що використовуючи метод MAO можливе покращення шорсткості деталей але для досягнення значного покращення результатів необхідно підбирати параметри оброблення а для досягнення фінішної обробки необхідно використовувати механічну обробку в кооперації за MAO.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. LPBF(SLM) (Selective Laser Melting) — технологія 3D-печати [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/LPBF\(SLM\)-tech/](https://3d.globatek.ru/3d_printing_technologies/LPBF(SLM)-tech/)
2. Застосування 3D-друку в авіакосмічній та оборонній промисловості. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://i3d.ru/blog/dlya_mozayki/3d_printery/aviatsionno-kosmicheskaya-otrasl/
3. A.M. Awad, E.A. Ghazy, S.A. Abo El-Enin, M.G. Mahmoud, Electropolishing of AISI-304 stainless steel for protection against SRB biofilm, Surf. Coatings Technol. 206 (2012) 3165–3172.
4. Шлифовка и полировка металла [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.starki.com.ua/shlifovka-i-polirovka-metalla-plyusy-i-minusy-ego-obrabotki-shlifovalnymi-lentami/>
5. Евстифеев, В.В. Е 17 Обработка материалов резанием: методы, станки, инструменты: Учебное пособие / В.В. Евстифеев, М.С. Корытов. – Омск: СибАДИ, 2012. – 76 с.
6. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://kuznya-lviv.com.ua/piskostrujna-obrobka-metalu/>
7. Magnetic abrasive polishing of additively manufactured 316L stainless steel parts [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/325771269_Magnetic_abrasive_polishing_of_additively_manufactured_316L_stainless_steel_parts
8. АТО technology [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://metalatomizer.com/#features>
9. Характеристики 3D-принтера Alfa-150D [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://alt-print.com/uk/alfa-150d>

10. Характеристики 3D-принтера Alfa-150D [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [Alfa-150D[https://alt-print.com/docs/Alfa-150D_ds_ru.pdf]
11. Характеристики сплаву AlSi10Mg [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://alt-print.com/docs/Al_ds_ru.pdf
12. Характеристики сплаву Inconel625 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://alt-print.com/docs/In625_ds_ru.pdf
13. Характеристики сплаву AISI 316L [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://alt-print.com/docs/316L_ds_ru.pdf
14. Характеристики сплаву Ti6Al4V [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://alt-print.com/docs/Ti_ds_ru.pdf]
15. Вимірювання шорсткості поверхні [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://stankotec.ru/raznoe-2/izmerenie-sherokhovatosti-poverxnosti.html>
16. Ткачук І.В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу : дис. канд. техн. н аук: 05.03.01 /Ткачук І.В. – Київ, 2015. – 163 с
17. SolidWorks Flow Simulati [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation>.
18. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода В. С. – Київ, 2001. – 404 с.
19. Ефремов В.Д. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей / В.Д. Ефремов, П.И. Ящерицын. – Мн.: БАТУ, 1997. – 251 с.
20. Майборода В.С. Застосування магнітно-абразивної обробки для зміцнення різального інструменту / В.С. Майборода, Н.В. Ульяненко, Л.Г.

Дюбнер, О.А. Івановський // Вісник ЖДТУ. – Житомир: ЖДТУ, 2003. – №3(27). – С. 22 – 31

21. Cheung F.Y. Cutting edge preparation using magnetic polishing and its influence on the performance of high-speed steel drills / F.Y. Cheung, Z.F. Zhou, A. Geddam, K.Y. Li // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 208 (1-3). – P. 196 – 204

22. Джулій Д.Ю. Підвищення якості багатогранних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні : дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Джулій Д.Ю. – Київ, 2014. – 175 с.

ДОДАТКИ

Додаток-А

Затверджую:

Директор ТОВ "Технологічний парк
"Українські інформаційно-
телекомунікаційні технології"



(Дудченко Д.О.)

"18" жовтня 2021 р.

М. П.

Технічне завдання

на науково-дослідну роботу

«Підвищення якості 3-D друкованих деталей методом магнітно-абразивного оброблення»

Замовник:

Начальник виробництва

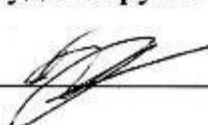
 Чінбай С.І.

Виконавець:

Завідувач кафедрою КМ

_____ Данильченко Ю.М.

Студент групи МІ-01мп

 Кучерук Д.В.

Київ 2021

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Повна назва розробки та її умовне позначення

«Підвищення якості 3-D друківаних деталей методом магнітно-абразивного оброблення»

1.2 Назви підприємств розробника та замовника системи та їх реквізити

Замовник:

ТОВ "Технологічний парк "Українські ін-
формаційно-телекомунікаційні технології "
юр.адр.: м. Київ, вул. Сім'ї Ідзківських, буд.3

Виконавець:

Кафедра конструювання машин
ММІ КПІ ім. Ігоря Сікорського

1.3 Порядок оформлення та пред'явлення замовникові результатів робіт

По закінченню роботи подається:

- зразки після обробки,
- результати шорсткості та твердості.

2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ

2.1 Мета створення розробки

Провести дослідження по вивченню можливості обробки SLM друківаних деталей методом магнітно-абразивного оброблення та визначення його впливу на параметри якості оброблюваних поверхонь.

2.2. Вихідні дані

– Надруковані деталі методом SLM друку з титанового сплаву Ti6Al4V, нержавіючої сталі AISI 316L, Inconel 625

3. ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.1 Середовище розробки 3D моделей та креслень – Autodesk Inventor та Fusion 360.

4. ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Етап та його зміст	Термін виконання	Результат
1. Обробка деталей на верстаті MAO	19.11.2021р	Деталі після Обробки на верстаті MAO
2. Проведення вимірювань та аналіз отриманих результатів.	03.12.2021р	Результати аналізу

5. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

5.1 Зниження шорсткості оброблених поверхонь, підвищення їх твердості.

6. МАТЕРІАЛИ, ЩО НАДАЮТЬСЯ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ

6.1 Результати аналізу отриманих параметрів якості поверхонь.

6.2 Рекомендації по обробленню вказаних типів деталей.

7. ПОРЯДОК РОЗГЛЯДУ ТА ПРИЙМАННЯ РОБОТИ

7.1 Результати роботи передаються по акту приймання робіт.

Затверджую:

Директор ТОВ "Технологічний парк
"Українські інформаційно-
телекомунікаційні технології
(Дудченко Д.О.)

"06" грудня 2021 р.

М. П.

Акт
приймання робіт
науково-дослідної роботи

«Підвищення якості 3-D друкованих деталей методом магнітно-абразивного оброблення»

В результаті виконання робіт з обробки деталей на верстаті для магнітно-абразивного оброблення, виконавець надав:

- Деталі після обробки.
- Аналіз отриманих результатів по шорсткості та твердості.
- Технологічні рекомендації по обробленню наданих деталей для підвищення параметрів якості поверхонь.

Результати роботи планується реалізувати при обробці деталей після SLM друку.

Замовник:
Начальник виробництва

 Чінбай С.І.,

Виконавець:
Завідувач кафедрою КМ

Данильченко Ю.М.

Студент групи МІ-01мп

 Кучерук Д.В.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на проведення вимірювань в навчально-науковій лабораторії вимірювальної техніки
навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту Національного технічного
університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис) *(завідувач кафедри)*

(дата)

* 1. Підстава для проведення роботи

Підстава та місце для проведення роботи

Термін виконання: 09.11.2021 - 30.11.2021

(початок – закінчення)

Підрозділ, виконавець кафедра конструювання машин

* 2. Призначення проведених робіт

Магістерська робота.

(вид роботи, зміст роботи, вид звітності)

* 3. Вимоги до проведених робіт

Вимірювання шорсткості на поверхні та кривизни лопатки.

(вид роботи, точність, кількість, надійність, зберігання, транспортування)

та лопатки розширюється.

* 4. Вимоги до отриманих результатів

Вимірювання шорсткості та профілограм.

18 вимірювань до з'ясування та 18-річчя.

(форма звітності)

5. Умови проведення робіт: температура навколишнього повітря 20° (±4°); відносна вологість при температурі навколишнього повітря 20° - до 80%; атмосферний тиск від 700 до 820 мм.рт.ст.

6. Етапи виконання роботи

Етап та його зміст	Термін виконання	Результат та форма його подання
Вимірювання шорсткості	30.11.2021	Результат та форма його подання <i>(сформулювати конкретні результати, які передбачаються отримати при виконанні даного етапу)</i> <i>Не переписувати назву етапу!</i>

7. Очікувані результати

Параметри шорсткості та профілограм.

(креслення, реалізація результатів)

8. Матеріали та пристосування

(креслення, підрозділ, виконавець)

(підпис)

(дата)

(виконавець)

9. Додаткові умови

Від виконавця:

Юрій АДАМЕНКО

(науковий керівник лабораторії)

(підпис)

(дата)

Олександр ПЛІВАК

(завідувач лабораторії)

(підпис)

(дата)

Виконавець

(виконавець)

(підпис)

(дата)

Від замовника:

Виктор Дмитрій

(науковий керівник)

(підпис)

(дата)

Контактна особа:

Виктор

Курдюк

(підпис)

(дата)

тел.:

e-mail:

- * - Пункти, обов'язкові для заповнення.



ADDITIVE LASER TECHNOLOGY

Высокоточный 3D-принтер для печати металлических изделий **ALFA-150D**

- Интуитивно понятный интерфейс пользователя
- Подогрев платформы до 200°C
- Габариты камеры построения 150 x 150 x 180 мм
- Сверхкомпактные габаритные размеры
- Продвинутый мониторинг процесса печати
- Производительность до 25 см³/час
- Точность печати до 50 мкм
- Система автоматической очистки фильтров
- Открытая платформа для неограниченных экспериментов
- Низкие эксплуатационные затраты



www.alt-print.com



3D-ПРИНТЕР ALFA-150D

Размеры рабочего поля (Ш x Г x В)	150 x 150 x 180 мм
Конфигурация оптической системы	одиночная
Тип лазера	волоконный (итербиевый) с воздушным охлаждением
Оптическая мощность лазера	200 Вт
Фокусный диаметр лазерного луча	45 мкм
Длина волны лазерного излучения	1070±2 нм
Толщина слоя	20 - 100 мкм
Максимальная скорость сканирования оптической системы	10 м/с
Точность повторения положения лазерного луча	0,15 мкм
Расход инертного газа в рабочем режиме	≤ 3 л/мин
Электропитание	~230 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	2,2 кВт
Габаритные размеры (Ш x Г x В)	730 x 700 x 1818 мм
Вес (без порошка)	450 кг

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Вакуумный транспортировщик металлического порошка APR-041

Производительность	50 - 150 кг/ч
Потребление сжатого воздуха	180 л/мин
Рабочее давление сжатого воздуха	6 атм
Электропитание	~230 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	20 Вт
Габаритные размеры (Ш x Г x В)	450 x 370 x 1100 мм
Вес (без порошка)	18,5 кг

Устройство предназначено для сбора отработанного металлического неактивного порошка из рабочей зоны 3D-принтера.



Автоматизированная станция просеивания металлического порошка APS-051

Режим работы	ультразвуковой
Производительность	≤ 20 кг/ч
Электропитание	~230 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	200 Вт
Габаритные размеры (Ш x Г x В)	435 x 500 x 1330 мм
Вес (без порошка)	35 кг

Устройство предназначено для просеивания, перемешивания и гомогенизации неактивного металлического порошка для повторного использования.



Откройте новую главу в своих исследованиях и разработках с ATO LAB.

Создайте свой сплав и быстро произведите металлический сферический порошок с высокой текучестью, идеально подходящие для аддитивного производства и порошковой металлургии.

КОНСТРУКЦИЯ ПОРОШКОВОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

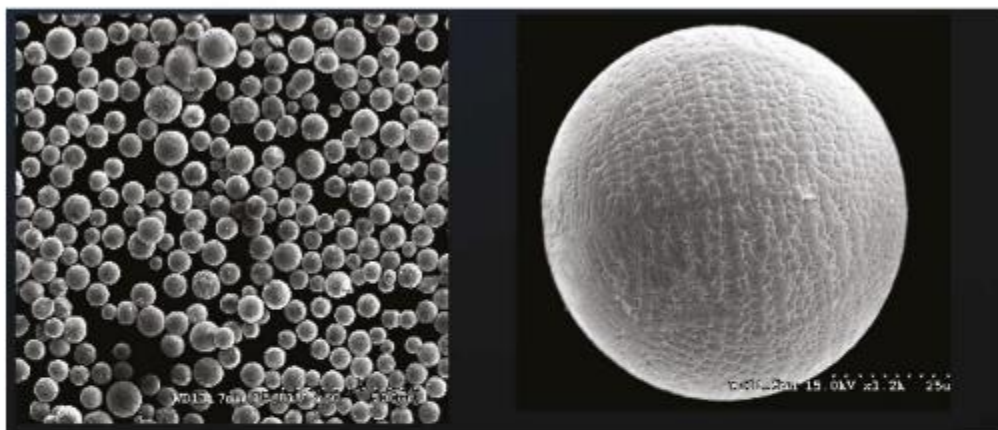
Наша разработка направлена на оптимизацию процесса распыления в лабораторных условиях. Это привело к успешному производству как реакционноспособных, так и нереакционноспособных порошков в меньшем, но все же полностью самостоятельном масштабе. Мы разработали стабильные процессы для металлов и их сплавов, таких как: алюминий, титан, нержавеющая сталь, благородные металлы



Пропускная способность ATO LAB достигает нескольких сотен граммов металлического порошка с размером частиц от 20 до 100 мкм. с необязательными последующими процедурами разделения по фракциям порошка.

Готовый атомайзер в вашей лаборатории

ATO LAB был разработан отраслевым предприятием, стремящимся преодолеть традиционные ограничения в сфере атомизации. ATO LAB имеет компактные габариты, позволяющие эффективно использовать установку даже в условиях небольших исследовательских лабораторий. Наряду с инновационными технологиями отсутствуют какие-либо требования к вспомогательному оборудованию, это обеспечивает исключительно низкие эксплуатационные расходы и быстрый возврат инвестиций.



не просеянный сырой порошок ATO LAB, обратите внимание на однородный размер и сферическую форму частиц

Сферическая частица порошка стали 316L, произведенная в ATO LAB

АТОМАЙЗЕР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ATO LAB - это уникальная компактная установка для производства металлических порошков с использованием новейшей технологии ультразвукового распыления. Это революционное решение позволяет быстро производить металлические порошки с узким распределением частиц по размерам.

ключевые особенности

- порошки высочайшего качества
- Гибкость процесса
- Нет ограничений в минимальном количестве порошка
- Широкий ассортимент сплавов
- Экономически эффективное производство
- доступная цена
- Масштабируемая структура системы

Программное обеспечение

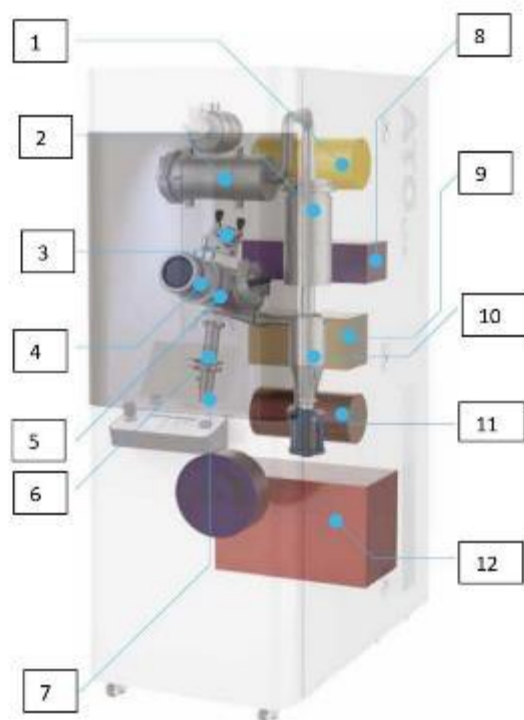
Качественное программное обеспечения лежит в основе стабильной работы любой установки. Наша команда знает об этом, поэтому мы оснастили ATO LAB нашим специализированным, универсальным и удобным для пользователя программным обеспечением. Оператор может выполнять процессы, используя удобно расположенный сенсорный экран.

Цель - создать удобную систему управления, позволяющую осуществлять независимое регулирование каждого параметра процесса, включая ультразвуковой и плавильный агрегаты.

СПЕЦИФИКАЦИЯ

Общая информация	
назначение	производство металлических порошков
технология распыления	ультразвуковое распыление металла
метод плавления	потоком плазмы
тип проводника	запатентованный-проводник из нано сплава
метод охлаждения	водяное
рабочие материалы	Fe, Al, Ti сплавы на их основе и другие
качественные характеристики	высокая текучесть, сферическая форма частиц
гранулометрический состав	d90<63мкм 316LSi, d50<63мкм TiGr2
система сбора порошка	циклон
сырьё	пруток, проволока
сертификация	CE mark. ATEX
параметры	
частота излучателя	40kHz
мощность излучателя	до 400W
уровень O2	<0.1%
ток плазмы	до 100A
пропускная способность системы	до 0,3 л/ч
вес установки	280кг
габариты (ШхГхВ)	707x1206x1957
требования	
сжатый воздух	4-8 бар
инертный газ	Аргон, Азот или Гелий
электропитание	400В 20кВА/ 3 фазы
расход газа	100л на продувку и 10л/мин на процесс
система переработки порошка	система сит
компоновка системы охлаждения	внешний охладитель

Схема установки



- 1- Циркуляционный насос-** газонепроницаемая конструкция сохраняет атмосферу без кислорода во время процесса
- 2- Фильтры-** дополнительный этап фильтрации твердых частиц предназначен для удаления избыточных паров и обеспечения возможности рециркуляции инертного газа.
- 3- Система подачи-** Подача стержня или проволоки в зависимости от используемого материала
- 4- Рабочая камера** предназначена для минимизации остатков порошка и сохранения компактных размеров машины
- 5- Плазменная горелка с системой внутреннего охлаждения-** разработана для самых длительных и сложных процессов
- 6- Волновод** - самое сердце машины, созданное с использованием запатентованной технологии и самых современных нано сплавов, обеспечивает уникальную гибкость процесса
- 7- Ультразвуковой преобразователь-** преобразовывает ультразвуковую энергию , необходимую для атомизации расплава.
- 8- Система управления-** Высококачественные электронные датчики и устройства управления электроникой, она позволяет осуществлять мониторинг и анализ процессов.

9- Ультразвуковой генератор -Включает преобразователь. усовершенствованная система управления позволяет контролировать весь процесс

10- Циклон -элемент, отвечающий за сбор порошка, он отделяет порошок от инертного газа

11- Вакуумный насос, удаляющий воздух в начале процесса, обеспечивает исключительно высокую чистоту - менее 0,01%

12- Плазменный генератор- надежный IGBT-инвертор минимизирует потери энергии

доступная цена

По сравнению с имеющимися в настоящее время распылительными установками. ATO LAB имеет значительно более низкое потребление носителя. Экономически эффективный процесс не только плавный и быстрый, но и привлекательный с экономической точки зрения.

Его компактный размер и уникальные технические решения позволили компании 3D LAB предложить очень конкурентоспособную цену для самого устройства - ATO LAB является исключительно привлекательным предложением для малых и средних компаний, производителей металлического порошка и исследовательских институтов.

Порошок Ато также можно использовать в следующих областях

- 1 • Пайка
- 2 • Порошковое распыление
- 3 • Фильтры и пены
- 4 • Обычная порошковая металлургия
- 5 • Лазерная оболочка
- 6 • Химический синтез
- 7 • Катализ

Додаток-Б



Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Підвищення якості 3D друкованих деталей методом магнітно-абразивного оброблення

Студент Кучерук Д.В.

Керівник Доцент, к.т.н

Джуні Д.Ю.



Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

1



Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мета роботи:

Покращення параметрів якості поверхонь деталей отриманих методом селективного лазерного плавлення за рахунок магнітно–абразивного оброблення.

Об'єкт дослідження:

Процес магнітно–абразивного оброблення деталей, надрукованих методом LPBF.

Предмет дослідження:

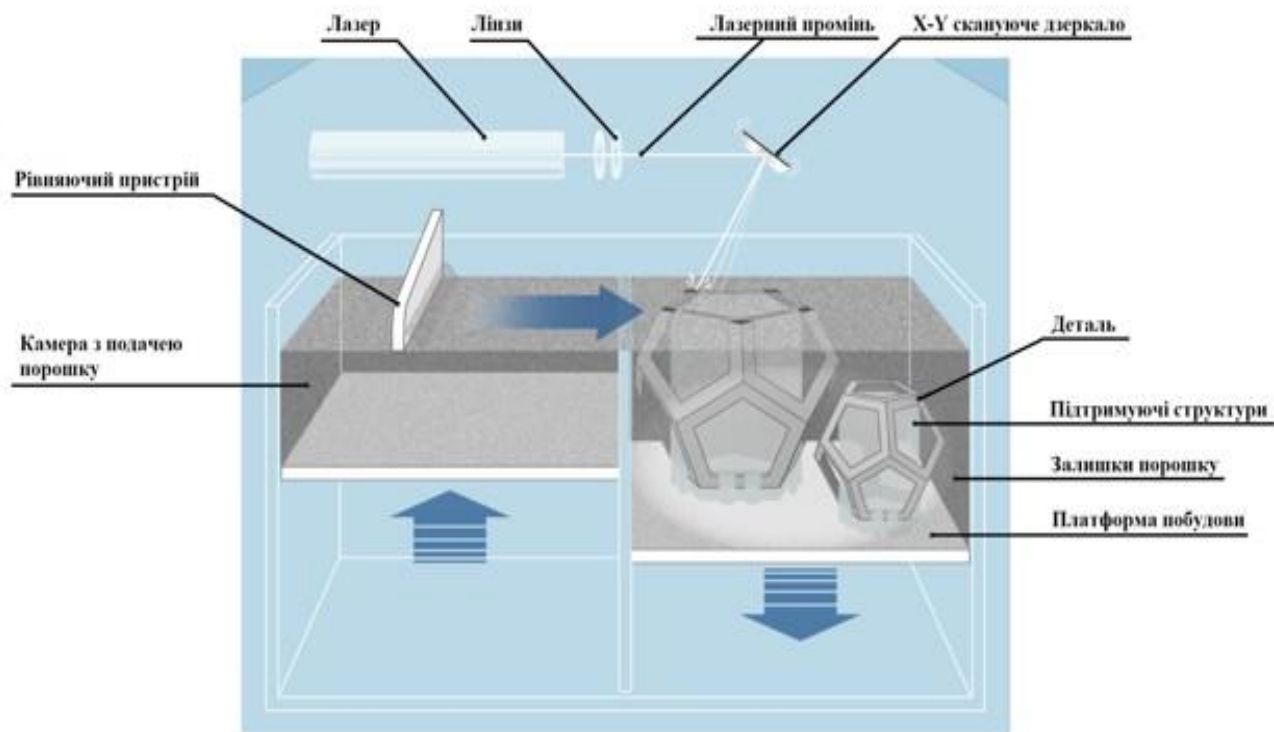
покращення поверхонь деталей після 3D друку.





Технологія LPBF (SLM) друку

Селективне лазерне плавлення матеріалу в порошковому шарі (LPBF) - метод адитивного виробництва, який для створення тривимірних фізичних об'єктів сплавляє металевий порошок за допомогою лазера високої потужності.

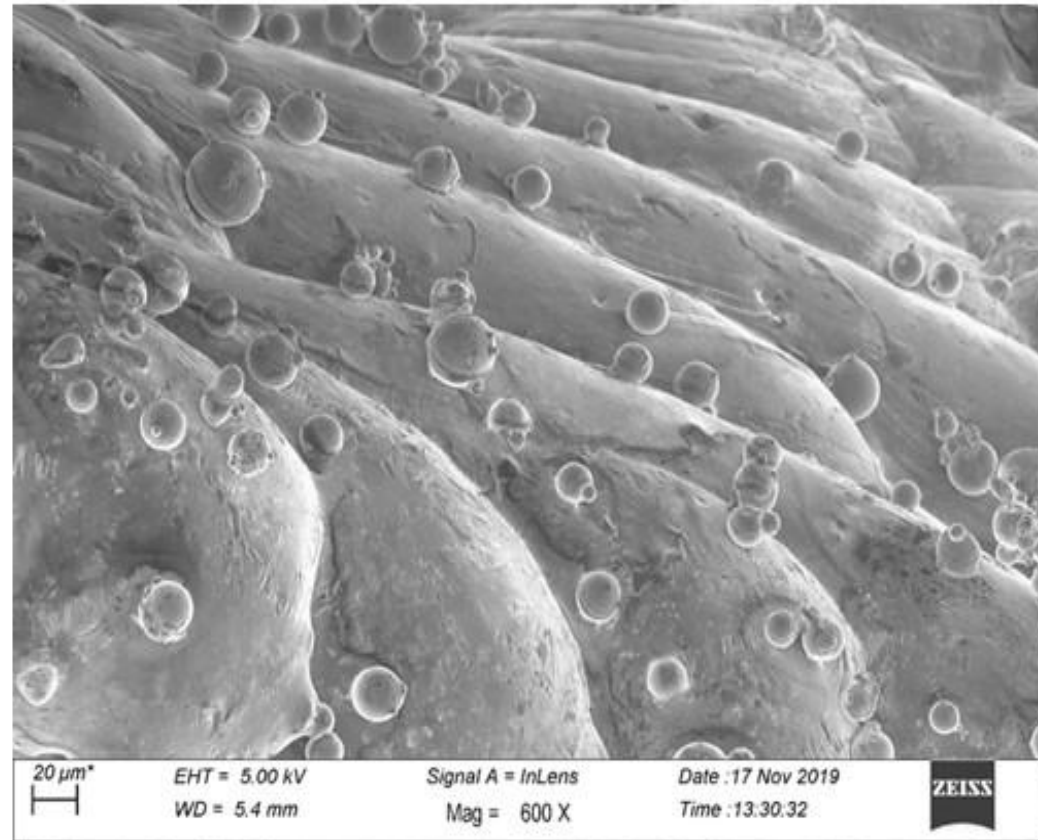




Проблеми що виникають при LPBF(SLM) друці

Основною проблемою LPBF(SLM) друку це велика шорсткість через специфіку друку та нависаючих елементів, традиційні методи покращення поверхні це:

- Методи механічна обробки
- Піскоструменева обробка
- Шліфування
- Полірування
- Методи хімічної обробки





Обладнання



Атомайзер для виробництва металевих порошків ATO LAB



Адитивна машина Alfa-150D від компанії ALT



Установка для MAO з робочою зоною типу «Кільцева ванна»





Магнітно- абразивне оброблення

Магнітно-абразивне оброблення
установці для МАО з робочою
зоною типу «Кільцева ванна»

Основні переваги методу це:

- Швидкість обробки;
- Покращення твердості
поверхневого шару за
рахунок мікро наклепу.





Матеріали



Ганталя для розтягу з порошку Ti6Al4V



Крильчатка витратоміра з порошку 316L



Оправка з порошку 316L



Профільна труба з порошку 316L

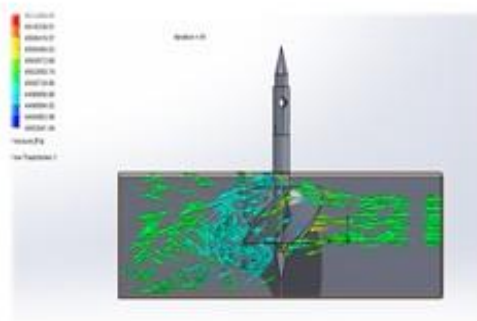


Лопатка турбіни з порошку Inconel 625

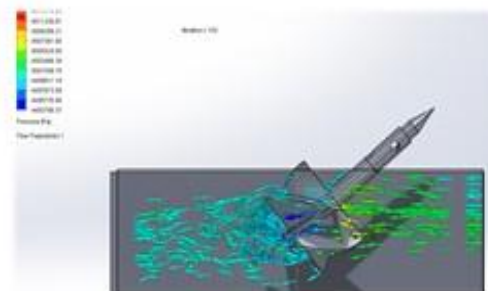




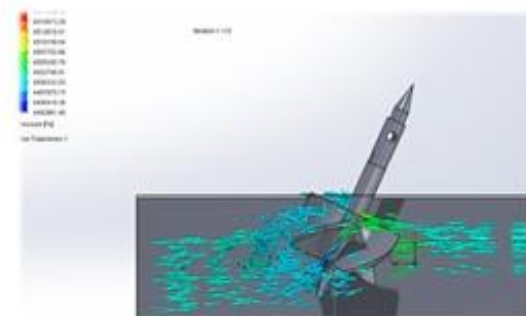
Аналіз розташування в робочій зоні МАО для крильчатки витратоміра



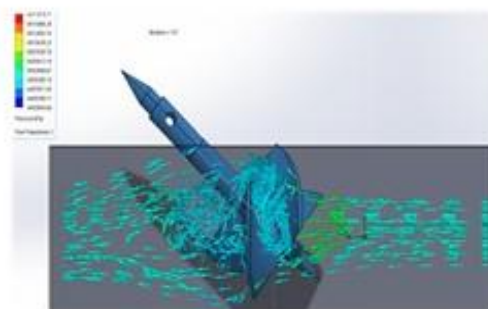
Симуляція потоку під кутом 90 градусів



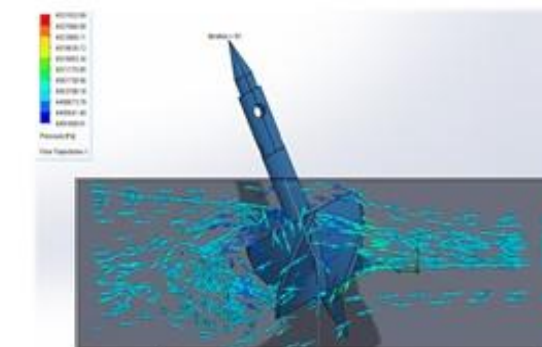
Симуляція потоку під кутом -50 градусів



Симуляція потоку під кутом -25 градусів



Симуляція потоку під кутом 50 градусів

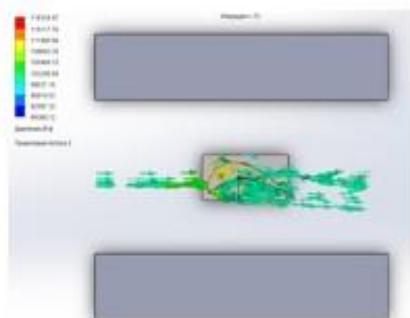


Симуляція потоку під кутом 25 градусів

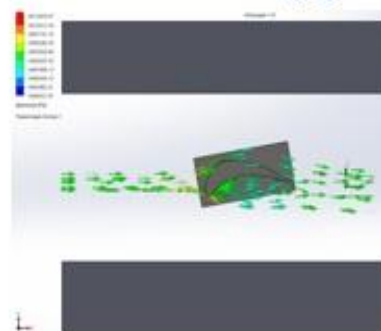




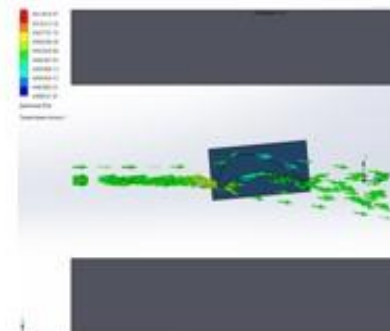
Аналіз розташування в робочій зоні МАО для лопатки турбіни



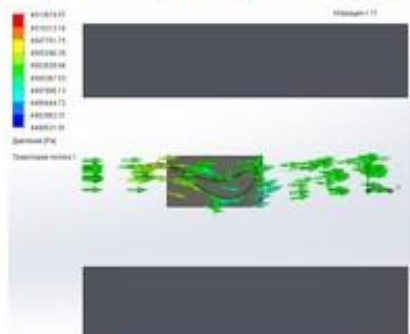
Симуляція потоку під кутом 0 градусів



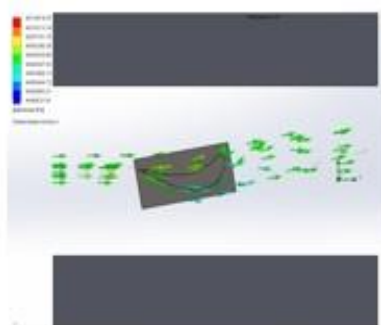
Симуляція потоку під кутом 10 градусів



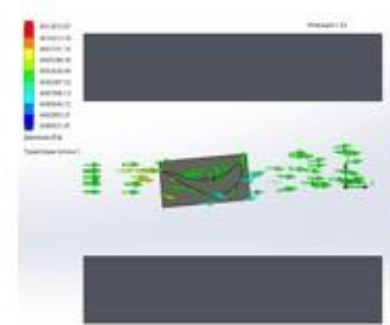
Симуляція потоку під кутом 5 градусів



Симуляція потоку під кутом 0 градусів



Симуляція потоку під кутом -10 градусів



Симуляція потоку під кутом -5 градусів





Вплив МАО на шорсткість сталюї крильчаткы витратоміра



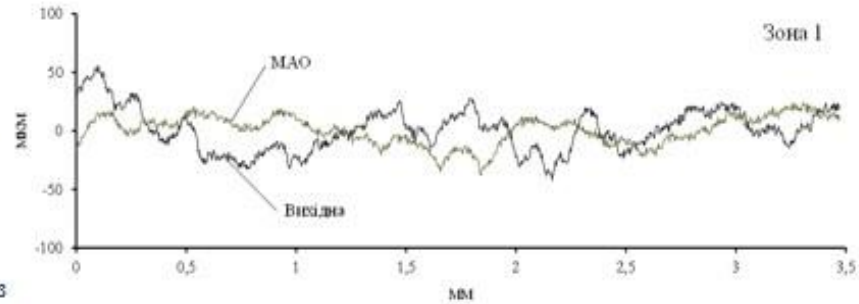
Вимірювання шорсткості на крильчатці витратоміра



Схема оброблення крильчаткы витратоміра



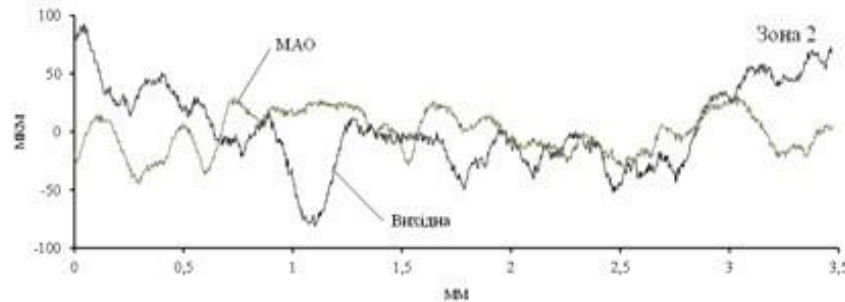
Зона 1 не контактувала з підтримками



До обробкы



Зона 2 контактувала з підтримками в процесі друку



Після обробкы





Вплив МАО на шорсткість лопатки турбіни



Схема оброблення лопатки турбіни

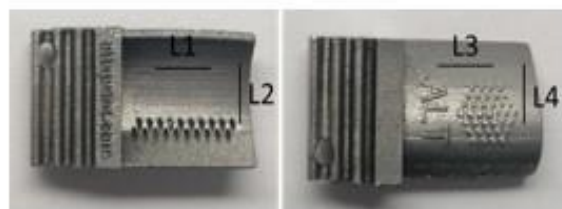
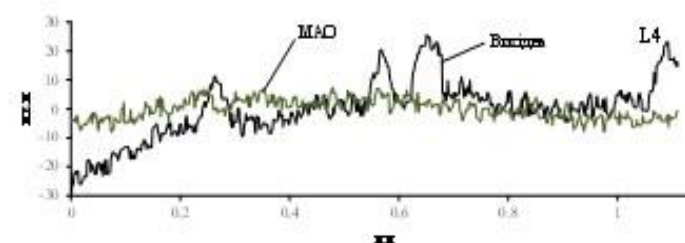
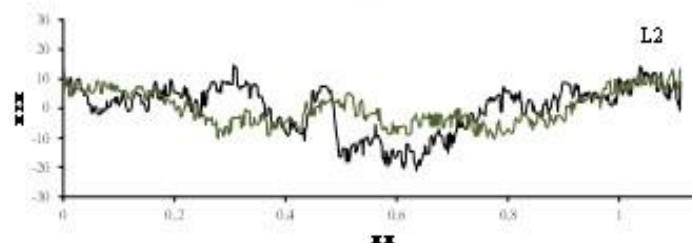
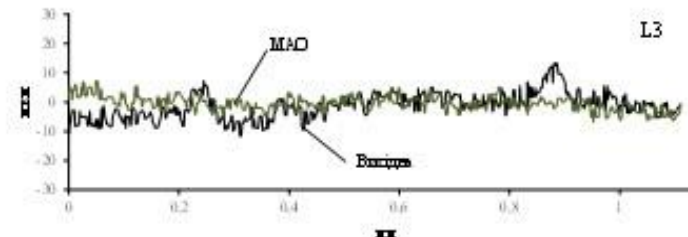
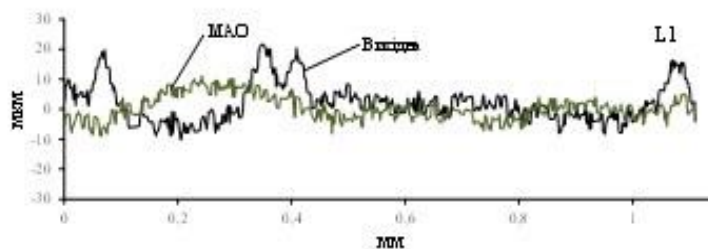
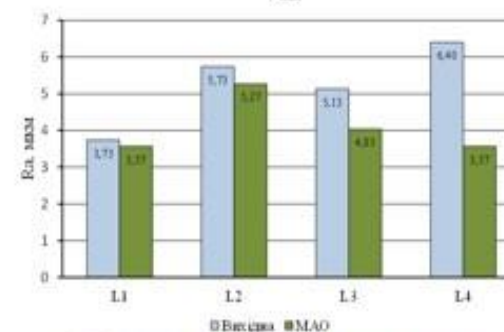


Схема вимірювання шорсткості на лопатці турбіни



Шорсткість поверхонь лопатки до та після оброблення

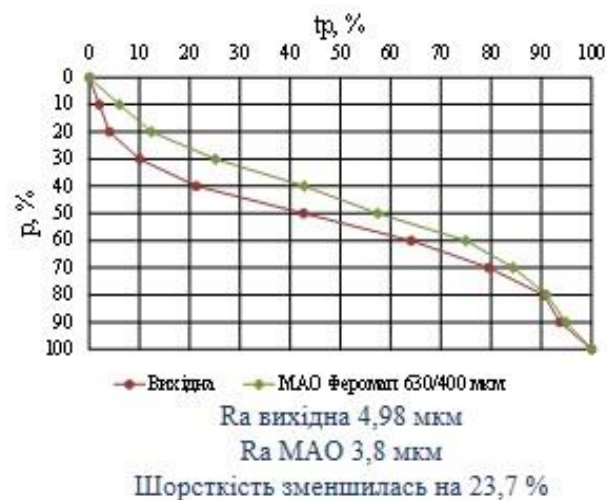




Вплив MAO на шорсткість титанових зразків для розриву



Схема оброблення титанового зразка для розриву



Без оброблення

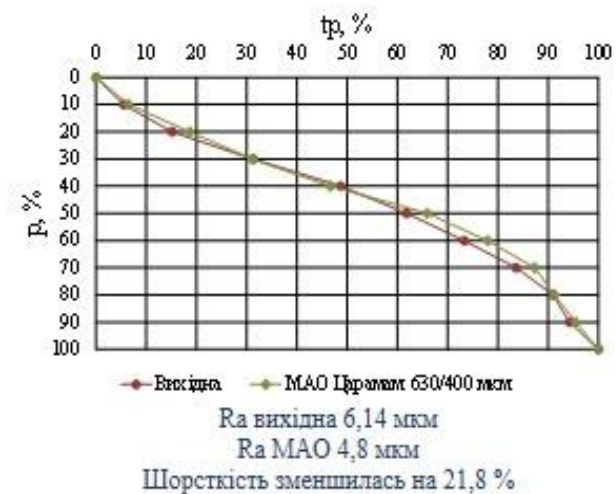


Феромап 630/400 мкм



Церамап 630/400 мкм

Зовнішній вигляд титанових зразків до та після оброблення

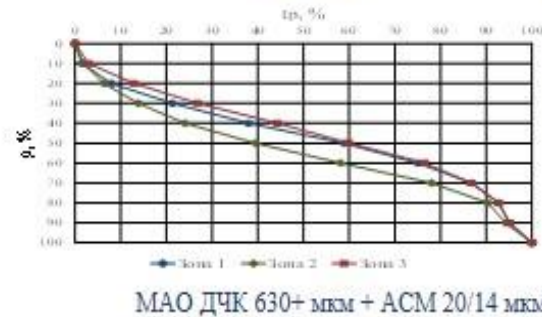
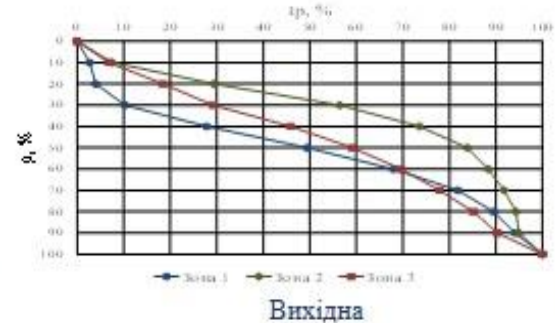
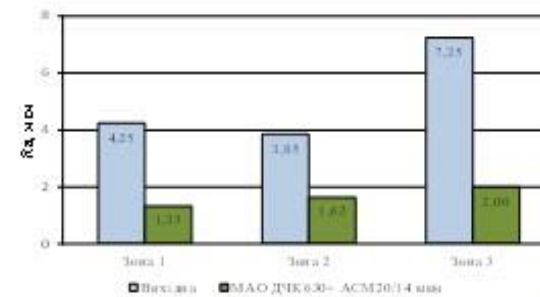
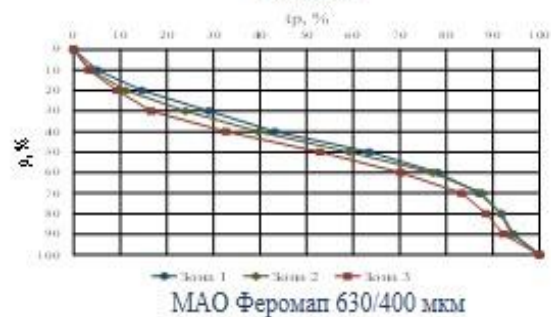
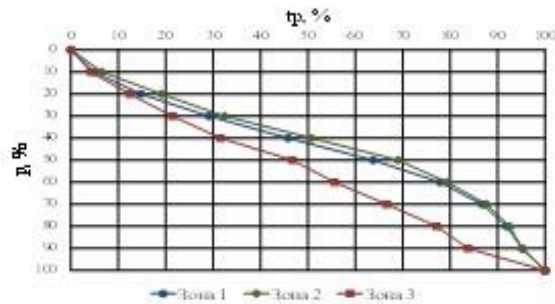
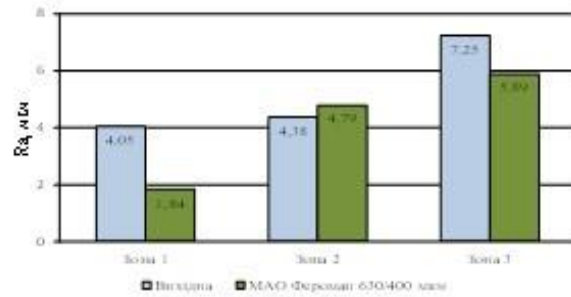




Вплив МАО на шорсткість оправки з нержавіючої сталі



Схема вимірювання шорсткості на оправці



Зовнішній вигляд поверхні сталіної оправки з МАІ Фероман 630/400 мкм

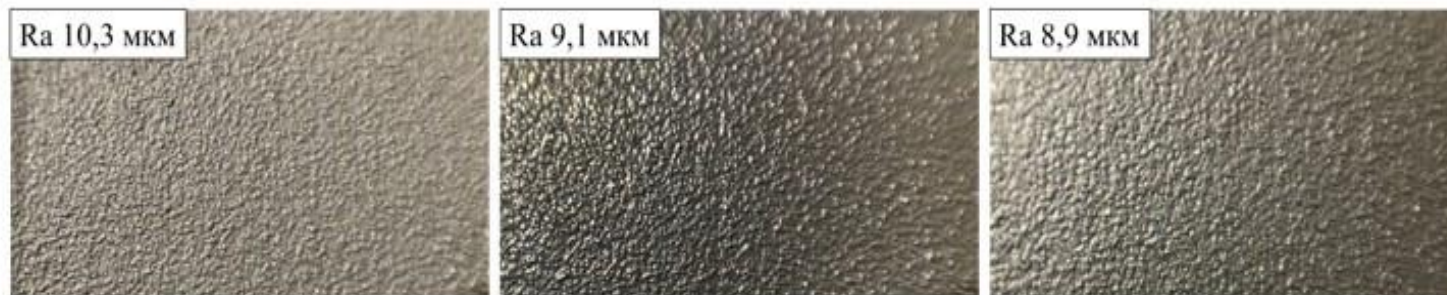


Зовнішній вигляд поверхні сталіної оправки з МАІ ДЧК630+ АСМ20/14 мкм





Вплив МАО на шорсткість сталюї профільної труби



Вихідна

Феромап 630/400мкм

ДЧК 630+мкм + АСМ 20/14мкм

Зовнішній вигляд поверхні профільної труби до та після оброблення



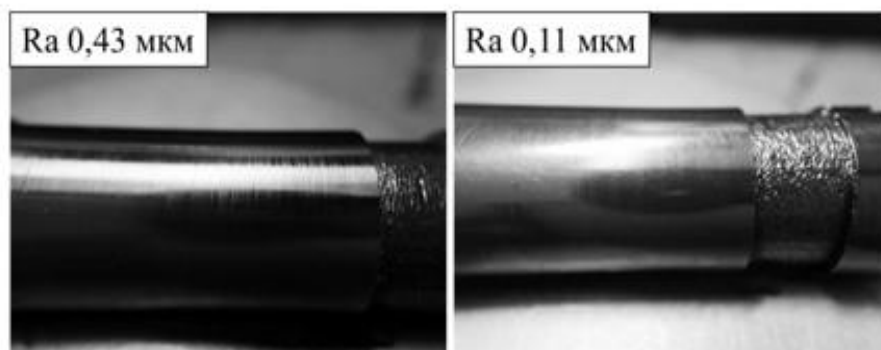
Схема оброблення профільної труби
за допомогою головки на основі
постійних магнітів

В результаті оброблення відбулось незначне зниження шорсткості з Ra 10,3 мкм до 8,9–9,1 мкм. Проте відбулось очищення поверхні та з'явився металевий блиск на противагу матовій поверхні для необробленої ділянки. В процесі оброблення відбулось зрізання вершинок шорсткості. Оскільки величина вихідної шорсткості дуже велика, то при обробленні магнітно-абразивний інструмент повторював текстуру поверхні. Для ефективного оброблення таких поверхонь необхідно виконати дослідження з іншим складом магнітно-абразивного порошку.





Вплив МАО на шорсткість механічно оброблених поверхонь деталей отриманих за допомогою селективного лазерного плавлення



Вихідна

Феромап 630/400мкм

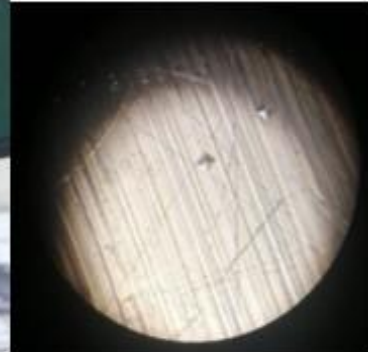
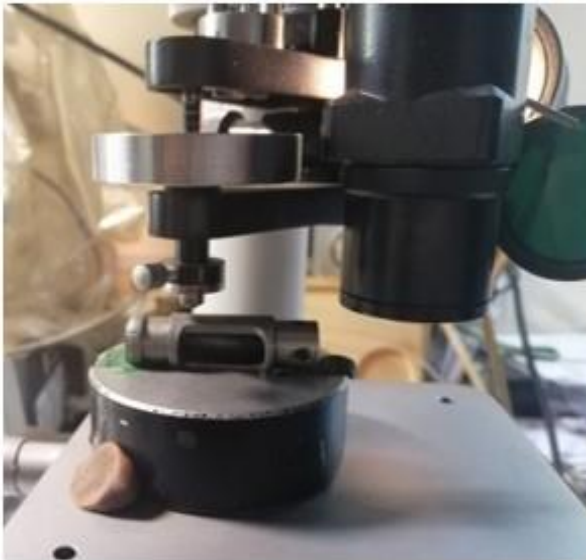
Зовнішній вигляд поверхні після токарного
оброблення та після МАО порошком Феромап 630/400
мкм

Для отримання поверхонь з високою точністю надрукованих деталей необхідно виконувати їх механічне оброблення, наприклад на верстатах з ЧПК. Тому виконано дослідження формування мікроструктури поверхні надрукованих деталей після їх механічного оброблення. Виконано точіння зовнішньої поверхні оправки з нержавіючої сталі AISI 316L. Після чого її було оброблено на установці для магнітно-абразивного оброблення кільцевого типу.

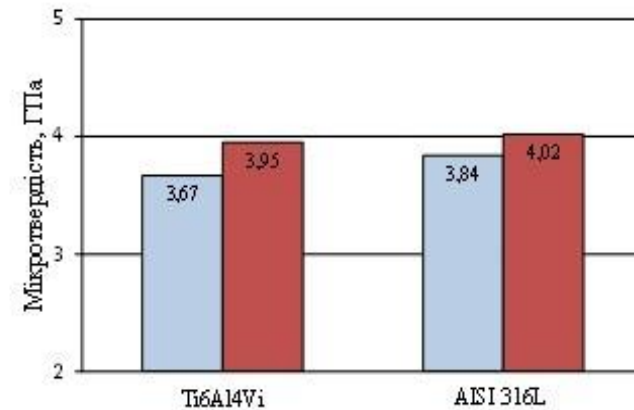




Вплив MAO на твердість поверхневого шару оброблюваних деталей



Вимірювання мікротвердості



В результаті експериментальних досліджень встановлено, що мікротвердість поверхонь зразків з обох матеріалів збільшується на 4,6 – 7,6 %. Хоча, основною метою роботи не було визначення впливу процесу MAO на зміну фізико-механічних властивостей поверхневого шару деталей отриманих методом селективного лазерного спікання. Проте в результаті дослідження встановлено, що це можливо, а для ефективного підвищення мікротвердості необхідно виконати дослідження по визначенню оптимальних параметрів процесу.





SWOT-аналіз

Сильні сторони:

- позитивне ціноутворення на внутрішньому ринку;
- прогресивна конструкція установки
- ефективний технологічний процес;
- малий час обробки;
- мала вартість роботи устаткування та переточеного інструменту.

Слабкі сторони:

- висока частка імпорту для забезпечення виробництва;
- складність виходу на нові ринки;

Можливості:

- Вдосконалення власної науково-технічної бази;
- Вихід на нові ринки;

Загрози:

- Загальний спад попиту на вироблену продукцію;
- можливість створення нового обладнання;





Висновки

В результаті аналізу сучасних методів пост-оброблення деталей після друку було визначено що перспективним є метод магнітно-абразивне оброблення. Метод забезпечує :

- Швидкість обробки;
- Комплексне покращення зовнішнього шару деталей;
- зміцнення поверхневого шару.

Рациональність використання МАО для пост-оброблення деталей після в умовах великих магнітних щілин пояснюється необхідністю покращення шорсткості поверхневого шару деталей після друку.

Результати експериментальних досліджень встановили:

- При обробці крильчатки витратоміра МАІ Феромап 630/400 мкм відбулося зменшення шорсткості в зоні 1 з 13.93 до 10.8 мкм та в зоні 2 з 18.4 до 20.17.
- При обробці Лопатки турбіни МАІ ДЧК зернистістю 630+ мкм з алмазною пастою АСМ 20/14 мкм відбулося зменшення шорсткості на 32%.
- При обробці титанових зразків для розриву МАІ Феромап зернистістю 630/400 мкм та Царамам з зернистістю 630/400 мкм для обох застосованих при магнітно абразивній обробці вдалось зменшити більш ніж на 20%.
- При обробці оправки з нержавіючої сталі найкращий результат був досягнутий МАІ ДЧК630+ АСМ20/14 мкм вдалось зменшити шорсткість з 7.25 до 2 мкм.
- При обробці сталюї профільної труби з нержавіючої сталі вдалось зменшити шорсткість з 10.3мкм до 8.9 мкм.
- При обробці механічно оброблених поверхонь деталей отриманих за допомогою селективного лазерного плавлення вдалось зменшити шорстккоть з 0.43мкм до 0.11мкм.

Після проведення експериментальних досліджень доведено, що використовуючи метод МАО можливе покращення шорсткості деталей але для досягнення значного покращення результатів необхідно підбирати параметри оброблення а для досягнення фінішної обробки необхідно використовувати механічну обробку в кооперації за МАО.





Дякую за увагу !

