

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

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона

Кафедра «Лазерної техніки та фізико-технічних технологій»

До захисту допущено:

В.о. завідувач кафедри

_____ О.Д. Кагляк

“01” червня 2023 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки матеріалів»

спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Відновлення поршнів двигунів з використанням технологій лазерної наплавки»

Виконав: студент 4 курсу, групи МЛ-91

Мілінчук Олександр Сергійович _____

Керівник:

ст. виклалач кафедри ЛТФТТ

Жук Руслан Олегович _____

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студента _____

Київ – 2023 р.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

Інститут/факультет: Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона

Кафедра: Лазерна техніка та фізико-технічні технології

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (освітня програма): Прикладна механіка (Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки матеріалів)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувач кафедри

_____ Кагляк О.Д.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«_» червня 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект (роботу) студенту

Мілінчуку Олександрю Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): Відновлення поршнів двигунів з використанням технологій лазерної наплавки

керівник проекту (роботи) Жук Руслан Олегович, старший викладач.

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

затверджені наказом по університету від «01» червня 2023 р. № 2122-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи)

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) _____

					МЛІ91000.00.000.ПЗ	Арк. 2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових плакатів, презентацій тощо) _____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект освітнього рівня «Бакалавр» спеціальності 131 Прикладна механіка за освітньою програмою «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки матеріалів». Мілінчук Олександр Сергійович. Керівник Жук Руслан Олегович. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, кафедра «Лазерної техніки та фізико-технічних технологій». Група МЛ-91. 2023. –72 с.

Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновку, переліку посилань із 32 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 72 с. основного тексту, 18 рисунків, 9 таблиць.

Метою даного проекту є проведення досліджень та розроблення операцій для відновлення деталей, зокрема поршнів двигунів, у виробничій галузі. Існує декілька проблем, що виникають під час виконання процесу відновлення цих деталей, такі як витрата часу, витрати ресурсів та необхідність високотехнологічного обладнання, що призводить до збільшення витрат, як фінансових, так і фізичних.

На сьогоднішній день однією з перспективних ідей є використання лазерного газо-порошкового наплавлення для відновлення деталей. У цій дипломній роботі проводиться дослідження причин пошкоджень поршнів двигунів, розглядаються різні способи сучасного ремонту та пропонується метод відновлення деталей за допомогою лазерного газо-порошкового наплавлення. Також розробляється схема лазерної технологічної установки та окремих її елементів, проводиться аналіз їх відповідності вимогам охорони праці.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTRACT

Bachelor's degree project in the specialty 131 Applied Mechanics under the educational program "Laser technology and computerized processes of physical and technical processing of materials". Milinchuk Oleksandr Sergiyovych. Head of the department Ruslan Olehovych Zhuk. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Educational and Research Institute of Materials Science and Welding named after E.O. Paton, Department of Laser Engineering and Physical and Technical Technologies. ML-91 group. 2023. -72 c.

The explanatory note consists of an introduction, 4 chapters, conclusion, and a list of references of 32 titles. The total volume of the work is 72 pages of the main text, 18 figures, 9 tables.

The purpose of this project is to conduct research and develop operations for the restoration of parts, in particular engine pistons, in the manufacturing industry. There are several problems that arise during the process of restoring these parts, such as time consumption, resource consumption, and the need for high-tech equipment, which leads to increased costs, both financial and physical.

Today, one of the most promising ideas is the use of laser gas-powder surfacing for the restoration of parts. This thesis investigates the causes of damage to engine pistons, considers various methods of modern repair, and proposes a method for restoring parts using laser gas-powder surfacing. A diagram of the laser technological installation and its individual elements is also developed, and their compliance with labor protection requirements is analyzed.

					МЛІ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	5
ВСТУП	9
1 ОПИС ПРОБЛЕМИ І МЕТОДИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ	11
1.1 Проблеми.....	13
1.2 Можливі методи ремонту	14
1.3 Методи лазерного наплавлення	16
1.4 Лазерне наплавлення.....	17
1.5 Матеріал	21
Висновки	24
2. ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ	26
2.1 Особливості лазерного наплавлення	26
2.2 Основи лазерного наплавлення.....	28
2.3 Типи джерел лазерного випромінювання	28
2.4 Параметри лазера та їх вплив	28
2.5 Процес лазерного наплавлення для відновлення поршнів	29
2.5.1 Підготовка поверхні поршня.....	29
2.5.2 Оптимізація параметрів процесу.....	29
2.5.3 Системи моніторингу та контролю.....	29
2.5.4 Пост-обробка та фінішна обробка	30
2.6 Властивості та експлуатаційні характеристики поршнів з лазерним покриттям	30
2.6.1 Аналіз мікроструктури.....	30
2.6.2 Механічні властивості.....	30
2.6.3 Зносостійкість і поведінка при терті	31
2.6.4 Теплові характеристики.....	31
2.6.5 Оцінка продуктивності поршня	31
2.7 Переваги та обмеження поршнів з лазерним покриттям.....	31
2.7.1 Переваги	32
2.7.2 Обмеження	32
2.8 Обладнання	34
2.9 Переваги впровадження.....	37
2.10 Недоліки лазерного наплавлення.....	39
Висновки	41

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	42
3.1 Попередній розрахунок оптичної системи	42
3.2 Розрахунок параметрів лінз.....	44
3.3 Опис розробленої системи для газопорошкового лазерного наплавлення.....	52
3.3.1 Вибір засобів транспортування порошкової суміші в зону обробки.....	52
Висновки	60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ	61
4.1 Загальні відомості	61
4.2 Електробезпека	63
4.3 Освітлення приміщення.....	64
4.4 Виробнича санітарія.....	65
4.5 Пожежна безпека.....	67
Висновки	68
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

T - абсолютна температура газу на вході в сопло;

R - універсальна газова стала;

M - молярна маса газу (кг/моль);

k - показник адіабати;

c^v - питома теплоємність при постійному об'єму (Дж / (моль·К));

c^p - питома теплоємність при постійному тиску (Дж / (моль·К));

p^a - абсолютний тиск газу на вході в сопло (Па);

p^e - абсолютний тиск газу на виході з сопла (Па);

ρ - питома щільність газу (кг/м³);

p - питома тиск газу (Па);

M - число Маха;

C - локальна швидкість звуку(343 м/с);

v - локальна швидкість потоку (м/с);

A - площа місцевого перетину сопла (м²);

d_{fiber} – діаметр оптичного волокна

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Поршні двигунів є життєво важливими компонентами двигунів внутрішнього згоряння, які відповідають за перетворення енергії, що генерується в процесі згоряння, в механічну енергію. Через екстремальні умови, в яких вони працюють, такі як високі температури, тиск і механічні навантаження, поршні з часом схильні до зносу, деформації та пошкодження поверхні. Такий знос може призвести до зниження ефективності роботи двигуна, збільшення витрати палива та погіршення загальної продуктивності.

Традиційні методи відновлення поршнів, такі як шліфування або механічна обробка, мають обмеження з точки зору точності, витрат часу та потенційної втрати цілісності матеріалу.

Сучасна виробнича галузь потребує передових технологій для ефективного відновлення зношених або пошкоджених поршнів, зберігаючи їх структурну цілісність та робочі характеристики. Наразі існує кілька методів відновлення, при чому основним є аргонно-дугове наплавлення, яке вимагає складного та тривалого процесу відновлення деталі, а також механічної обробки після наплавлення. Найбільш перспективним методом є лазерне газопорошкове наплавлення.

У технології газопорошкового наплавлення, порошок подається через сопло, співвісно з випромінюванням, і розплавляється безпосередньо на поверхні деталі. Цей процес дозволяє досягати високої точності і формувати шари матеріалу товщиною від 0,1 мм до декількох сантиметрів. Між наплавленим матеріалом і деталлю виникає металургійний зв'язок. Лазерне наплавлення може використовуватися як для пошарового створення нових деталей, так і для відновлення або виправлення дефектів на існуючих деталях.

Стрімкий розвиток адитивних технологій відкриває нові можливості у виробництві функціональних деталей та вузлів. Кожного року збільшується асортимент матеріалів, які можна використовувати, покращується точність та

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

якість виготовлених деталей, що відкриває нові перспективи для конструкторів та виробників.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докцм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ОПИС ПРОБЛЕМИ І МЕТОДИ ЇЇ ВИРШЕННЯ

Функції та компоненти поршня двигуна

Поршні двигуна (рис.1.1) [1] є важливими компонентами, які перетворюють енергію, що утворюється в процесі згоряння палива, в механічну роботу. Вони працюють у камері згоряння, ущільненій поршневими кільцями, і з'єднані з шатуном, який передає зворотно-поступальний рух колінчастому валу. Поршні, як правило, виготовляються з алюмінієвого сплаву через його легкість, високу теплопровідність і хорошу оброблюваність. Головка поршня, спідниця і кільцеві канавки є основними областями, що представляють інтерес для відновлення.



Рис. 1.1 – Поршень двигуна.

Механізми зношування поршнів

Знос поршня (рис. 1.2) [2] може відбуватися за різними механізмами, включаючи адгезійний знос, абразивний знос, ерозійний знос і корозійний знос.

Адгезійний знос спричинений контактом металу з металом між поршнем і стінкою циліндра, що призводить до перенесення матеріалу і пошкодження поверхні.

Абразивний знос пов'язаний з наявністю твердих частинок або забруднень в камері згоряння, що призводить до стирання поверхні.

Ерозійний знос викликаний впливом високошвидкісного газу або твердих частинок на поверхню поршня.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Корозійний знос відбувається через хімічні реакції між побічними продуктами згоряння і поверхнею поршня, що призводить до деградації матеріалу.



Рис. 1.2 – Зношений поршень.

Наслідки зносу поршня

Знос поршнів може мати негативний вплив на продуктивність та ефективність двигуна. Це може призвести до збільшення об'єму, зниження компресії та споживання оливи. Надмірний знос може призвести до ударів поршня, підвищеного шуму та зниження потужності.

Крім того, спричинені зносом зміни розмірів можуть вплинути на зазор між поршнем і циліндром, що призведе до збільшення витрати оливи, погіршення ущільнення та зниження теплової ефективності.

Необхідність відновлення поршнів

Реставація поршнів необхідна для зменшення негативних наслідків зносу і продовження терміну служби двигуна. Традиційні методи відновлення, такі як шліфування або механічна обробка, мають обмеження в точності, видалення матеріалу і потенційної зміни структурної цілісності поршня.

Технологія лазерного наплавлення пропонує інноваційний підхід до відновлення поршнів шляхом нанесення зносостійких покриттів, тим самим підвищуючи їх довговічність, зменшуючи тертя та покращуючи теплові характеристики.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

1.1 Проблеми

Коли поршень двигуна зношується, може виникнути кілька проблем, зокрема:

Зниження компресії: Зношений поршень може призвести до зниження компресії в циліндрах двигуна. Це призводить до зниження вихідної потужності та загальної продуктивності двигуна.

Підвищене споживання оливи: Зношені поршні можуть допускати витік оливи в камеру згоряння, що призводить до підвищеного споживання оливи. Це може призвести до зниження рівня оливи та потенційно викликати пошкодження двигуна, якщо не вирішити проблему.

Низька паливна ефективність: Зношений поршень може погано ущільнюватися в циліндрі, що призводить до витіку палива і неефективного згоряння. Це призводить до зниження паливної ефективності, збільшення витрати палива та підвищення експлуатаційних витрат.

Вихід з ладу двигуна: Коли поршень зношується, на його поверхні можуть з'явитися нерівності або він може втратити правильну форму. Це може призвести до виникнення помилок у роботі двигуна, що спричиняє нерівномірну роботу на холостому ході, зниження потужності та збільшення викидів вихлопних газів.

Надмірний шум і вібрація: Зношені поршні можуть сприяти підвищеному шуму та вібрації двигуна. Це може негативно впливати на загальний досвід водіння і вказувати на основні проблеми з двигуном.

Ризик пошкодження двигуна: Якщо не усунути проблему, сильно зношений поршень може призвести до більш серйозних пошкоджень двигуна. Це може призвести до утворення задирів на стінках циліндрів, ударів поршня або навіть його заклинювання, що може вимагати дорогого ремонту або заміни двигуна.

Дуже важливо відстежувати і своєчасно вирішувати проблеми зносу поршнів, щоб підтримувати продуктивність двигуна, паливну ефективність і загальну

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійність. Регулярне технічне обслуговування, таке як заміна оливи, належне змащування та своєчасний ремонт, може допомогти запобігти цим проблемам або звести їх до мінімуму.

1.2 Можливі методи ремонту

Існує кілька методів ремонту поршнів двигуна, в залежності від ступеня пошкодження і можливості виконання ремонту.

Заміна поршневих кілець: Якщо поршневі кільця зношені або пошкоджені, їх можна замінити без заміни всього поршня. Це відносно простий і економічно вигідний ремонт.

Зміна розміру поршня: якщо поршень зносився понад встановлений допуск, його можна змінити, видаливши невелику кількість матеріалу з його окружності.

Ремонт юбки поршня: Якщо юбка поршня пошкоджена або має тріщини, її іноді можна відремонтувати за допомогою зварювання або адитивних методів ремонту. Однак доцільність застосування цього методу залежить від ступеня та місця пошкодження.

Термічне напилення: Термічне напилення передбачає нанесення шару матеріалу, наприклад, металевого або керамічного покриття, на поверхню поршня. Це може відновити зношені або пошкоджені ділянки та покращити продуктивність і довговічність поршня.

Заміна поршня: У разі серйозного пошкодження або зносу поршня може знадобитися його повна заміна. Зазвичай для цього потрібно зняти блок двигуна, розібрати шатун і встановити новий поршень.

Традиційні методи, такі як заміна поршневих кілець, зміна розміру і хонінгування, ефективні для усунення незначного зносу і пошкоджень. Однак, коли виникають більш серйозні проблеми з поршнями, необхідні передові методи ремонту. Лазерні технології обробки поверхонь, такі як лазерне наплавлення і

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лазерне плавлення, пропонують перспективні рішення для ремонту поршнів двигунів.

Лазерне напавлення (рис. 1.3) [3] передбачає нанесення матеріалу на зношені або пошкоджені ділянки поршня. У цьому процесі використовується високоенергетичний лазерний промінь для розплавлення матеріалу покриття, який зливається з основним металом поршня. Лазерне напавлення має ряд переваг, включаючи точний контроль над товщиною покриття, відмінне металургійне з'єднання і можливість використання спеціальних матеріалів для підвищення зносостійкості і продуктивності.



Рис. 1.3 – Приклад ремонту деталі методом лазерної напавки.

Лазерне плавлення, з іншого боку, передбачає вибіркове плавлення і затвердіння поверхневого шару поршня для створення нової, бездефектної структури матеріалу. Цей процес можна використовувати для ремонту тріщин, пористості або інших форм пошкоджень. Лазерне плавлення забезпечує виняткову точність, оскільки зона термічного впливу мінімальна, що призводить до мінімальних викривлень і збереження початкової геометрії поршня.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Методи лазерного наплавлення і лазерного плавлення пропонують унікальні переваги для ремонту поршнів, такі як поліпшена зносостійкість, підвищена довговічність і можливість відновлення складної геометрії. Ці методи також мають перевагу в тому, що зменшують відходи матеріалу і дозволяють проводити локальний ремонт, тим самим зводячи до мінімуму необхідність повної заміни поршня.

Однак, важливо враховувати специфічні вимоги двигуна і сумісність відремонтованого поршня з навколишніми компонентами. Крім того, успішне застосування технологій лазерної обробки поверхонь для ремонту поршнів вимагає знання параметрів лазерного променя, вибору матеріалу наплавлення і методів наступної обробки.

1.3 Методи лазерного наплавлення

Для відновлення поршнів можна використовувати кілька методів лазерного наплавлення, залежно від конкретних вимог і цілей. Ці методи включають:

Пряме лазерне наплавлення

Пряме лазерне наплавлення передбачає нанесення шару покривного матеріалу безпосередньо на поверхню поршня. Лазерний промінь плавить основу і матеріал покриття одночасно, забезпечуючи металургійне з'єднання. Ця технологія забезпечує гнучкість у контролі товщини, складу та геометрії покриття.

Лазерне осадження металу

Лазерне осадження металу (ЛОМ) передбачає одночасну подачу металевого порошку або дроту у фокус лазерного променя. Порошок або дріт плавиться і сплавається з підкладкою, утворюючи шар покриття. ЛОМ пропонує точний контроль над товщиною, складом і локалізацією покриття.

Лазерне легування

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Лазерне легування передбачає розплавлення поверхні поршня з одночасним введенням легуючого елемента в розплавлену ванну. Легуючий елемент розчиняється в підкладці, утворюючи модифікований поверхневий шар з поліпшеними властивостями. Лазерне легування можна використовувати для підвищення зносостійкості, твердості та корозійної стійкості.

1.4 Лазерне наплавлення

Метод лазерного наплавлення має особливості, такі як мінімальна зона впливу і висока швидкість, що дозволяють знизити нагрівання деталі і практично уникнути деформації та розтягнення металу навколо зони обробки. Щоб запобігти окисленню розплавленого металу, зону наплавлення захищають інертними газами, наприклад, аргоном. У випадку ручного лазерного наплавлення, присадний матеріал подається оператором вручну. Зазвичай для цього методу використовується дріт діаметром від 0,15 до 0,8 мм, вибір якого залежить від поставленої задачі. Наплавлений матеріал може мати такі ж властивості, як і основний матеріал, або відрізнитися від нього, створюючи функціональний шар з покращеною твердістю.

Ручне лазерне наплавлення є оптимальним для усунення невеликих місцевих дефектів, таких як пори, відколи, задири та інші. Залежно від конфігурації, лазерні верстати для ручного наплавлення можуть працювати як з невеликими деталями, ремонт яких здійснюється безпосередньо на верстаті, так і з великими деталями, для обробки яких використовуються мобільні верстати.

Автоматизоване лазерне наплавлення характеризується механізованою подачею присадного матеріалу. Це може бути дріт (рис. 1.3) [3], який автоматично підводиться до зони обробки, або металевий порошок (рис. 1.4) [4], який подається в зону розплавлення через спеціальне сопло. Другий метод є більш продуктивним і

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

частіше застосовується для виконання робіт з наплавлення великого обсягу матеріалу, наприклад, при відновленні повітряних гвинтів.

Однак, час виконання операцій на основі порошку може бути високим через обмеження швидкості подачі, швидкості сканування та низької товщини шару. Навпаки, д्रोкове наплавлення забезпечує велику швидкість осадження і частіше застосовується для виготовлення великих деталей, зазвичай вагою понад 10 кг.

Процеси на основі порошку відрізняються високою якістю лазерної обробки поверхні і можливістю створювати складні елементи за рахунок малих розмірів частинок. Використання лазерного або електронного променя дозволяє контролювати процеси плавлення та затвердіння при роботі з порошковим матеріалом, що забезпечує високу точність розмірів.

Якість поверхні в порошкових системах залежить від типу сплаву, форми порошку, розміру та морфології, а також від параметрів процесу та конструкції сопла. Д्रोкове наплавлення характеризується великими швидкостями осадження і здатністю виготовляти великі компоненти, що мають шорсткі поверхні з великими розплавленими ваннами та шаровими краплями. Форми, створені за допомогою дротяної сировини, часто потребують механічної обробки, тоді як процеси на основі порошку забезпечують бажану форму без додаткової обробки. Обидва методи дозволяють формувати не тільки шари з аналогічними властивостями, але і складні покриття, які покращують тривалість служби та змінюють технічні характеристики деталей. Лазерне наплавлення має ряд переваг порівняно з традиційними методами, таких як висока енергетична концентрація, що дозволяє працювати з вищими швидкостями, і мінімізація розплавленого обсягу завдяки малому діаметру сфокусованого променя. Це сприяє зниженню деформації деталей під час обробки і збереженню їх геометричних розмірів у встановленому допуску, що може бути на рівні одиниць мікрометрів.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

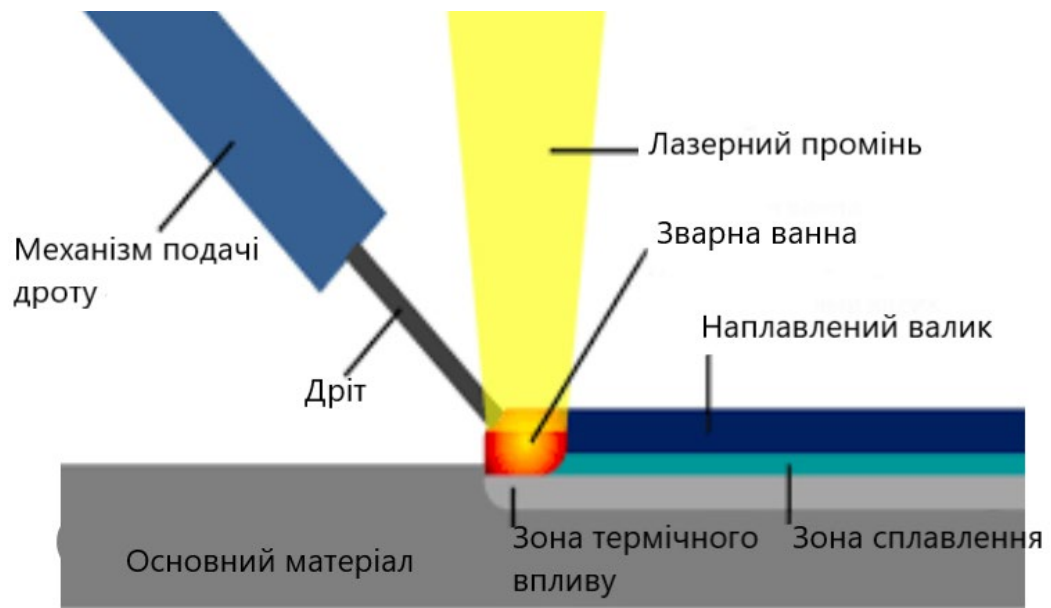


Рис. 1.4 - Схема процесу лазерного наплавлення з подачею дроту в якості присадного матеріалу.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

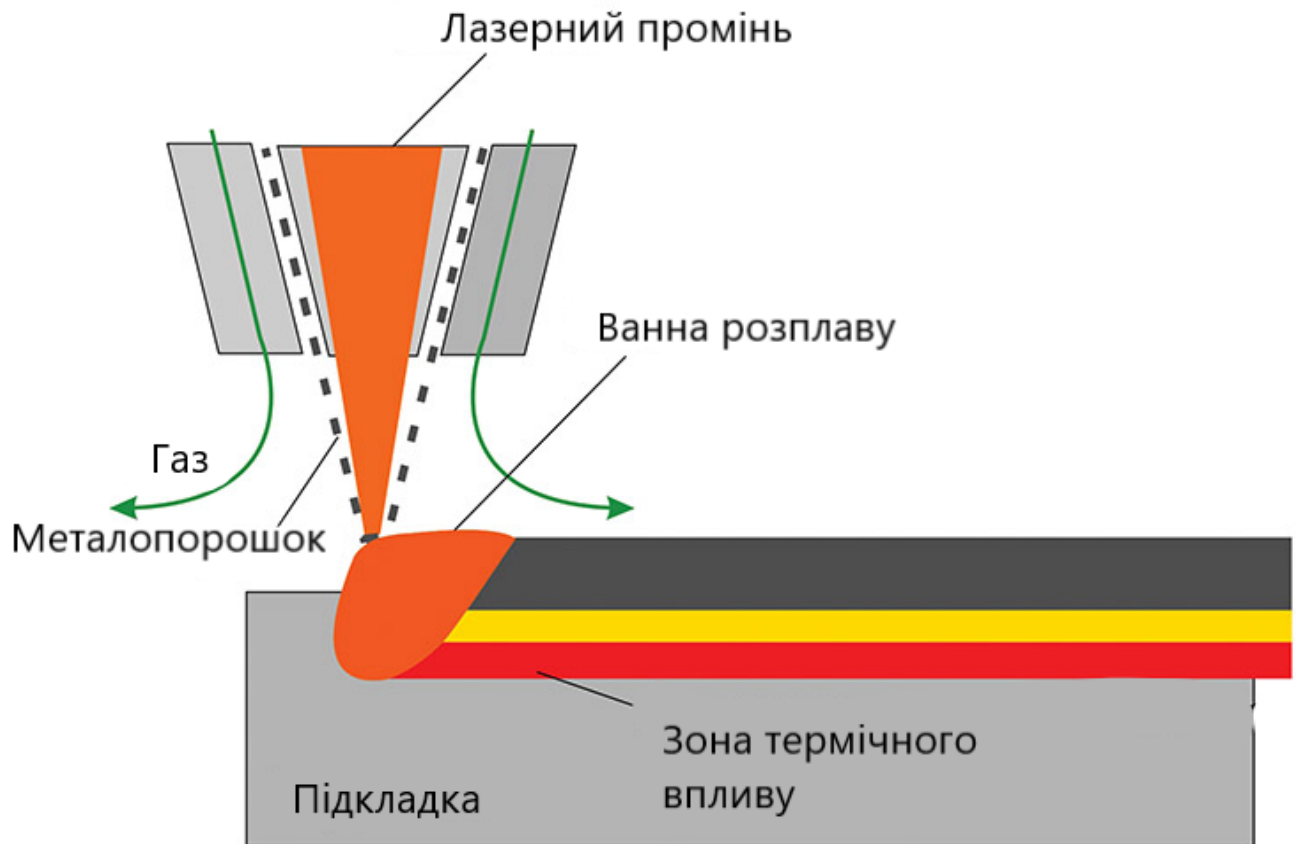


Рис. 1.5 - Схема процесу лазерного наплавлення з подачею порошку в якості присадного матеріалу.

Метод імпульсного лазерного наплавлення з використанням коротких мілісекундних імпульсів дозволяє досягти мінімальних зон термічного впливу і відповідно, зони відпуску, що не перевищують кілька десятків мікрометрів. Завдяки цьому, підкладка залишається майже холодною, а швидкість охолодження розплавленого металу може досягати значень від $10^3 \dots 10^4$ градусів за секунду, що сприяє формуванню дрібнодисперсної структури.

Під час ремонту за допомогою імпульсного лазерного наплавлення, важливим є правильний вибір присадкового матеріалу, який дозволяє досягти твердості наплавленого шару, що відповідає твердості основного металу. У поєднанні з

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

мінімальною зоною термічного впливу, це зазвичай уникає необхідності подальшої термічної обробки після наплавлення.

1.5 Матеріал

Матеріали для лазерного наплавлення

Вибір матеріалу покриття має вирішальне значення для досягнення бажаних властивостей і продуктивності поршня з лазерним покриттям. Вибір залежить від таких факторів, як зносостійкість, термостійкість, хімічна сумісність і вартість.

Найчастіше використовуються такі матеріали, як сплави на основі нікелю, кобальту, заліза, сплави на основі заліза, карбіди та кераміка. Композитні матеріали та функціональні покриття також можуть бути використані для пристосування властивостей до конкретних застосувань поршнів.

Матеріали покриття для відновлення поршнів

Для відновлення поршнів матеріали покриттів повинні мати відмінну зносостійкість, термічну стабільність і сумісність з матеріалом поршня і умовами експлуатації. Сплави на основі нікелю, такі як NiCrBSi і NiCrBSiFe, широко використовуються завдяки їх високій твердості, корозійній стійкості і сумісності з алюмінієвими поршнями. Покриття, армовані керамікою, такі як WC-Co, можуть забезпечити підвищену зносостійкість. Вибір матеріалу покриття повинен ґрунтуватися на глибокому розумінні механізмів зношування та умов експлуатації.

У цьому дослідженні рекомендується використовувати порошковий матеріал під назвою Stellite 1 (рис. 1.6) [6]. Цей сплав, що містить кобальт і хром з додаванням вольфраму або молібдену, має властивості високої зносостійкості, ударостійкості, жаростійкості та корозійної стійкості.

Використання порошку Stellite 1 в металургії має кілька переваг. Він дозволяє виробляти покриття і ремонтні роботи, які мають твердість і властивості, порівнянні з основним металом. Це усуває потребу в обширній постобробці та

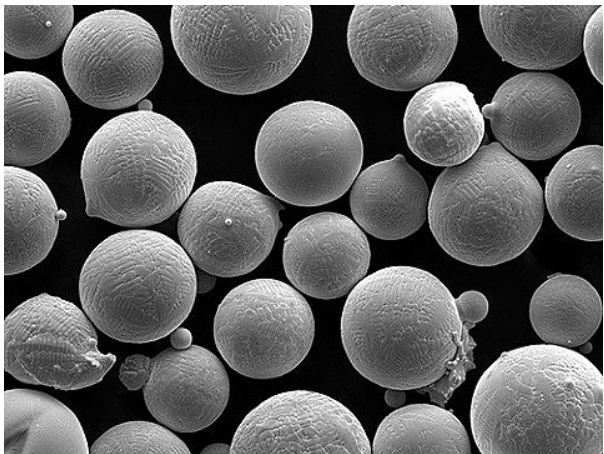
					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

скорочує загальний час і витрати на виробництво. Крім того, виняткова зносостійкість сплаву забезпечує подовження терміну служби і підвищену міцність компонентів, що призводить до підвищення експлуатаційної ефективності та зменшення потреби в технічному обслуговуванні.

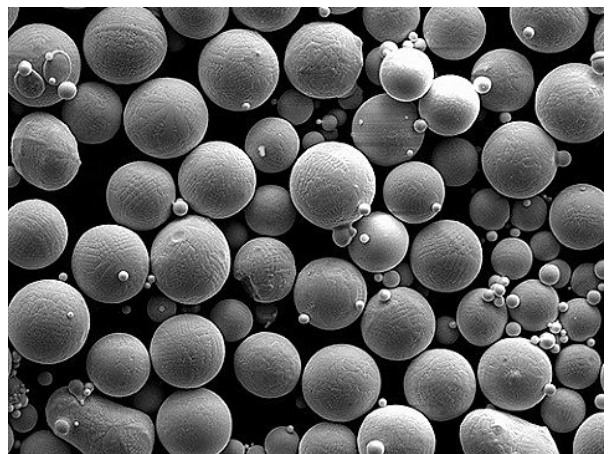
Загалом, порошок Stellite 1 є твердим сплавом для литва, універсальним і цінним матеріалом в галузі металургії, що забезпечує виняткові властивості, які сприяють довговічності і продуктивності критично важливих компонентів в різних промислових застосуваннях.

Однак, через високу вартість кобальту та хрому, які входять до складу цього сплаву, у виробництві раціонально використовувати методи, які дозволяють уникнути втрати матеріалу. Використання лазерного наплавлення значно економить матеріал і скорочує кількість кроків механічної обробки.

Порошок має сферичну форму розмір частинок в межах 15-45 мкм.



а)



б)

Рис. 1.6 - Форма порошку Stellite 1 а)200 мкм, б)100 мкм. [6]

Стеллітові сплави проявляють видатні характеристики твердості, міцності та корозійної стійкості. Ці сплави відомі своєю високою твердістю, що часто призводить до обмеженого використання процесів різання при їх обробці. Замість

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

цього, вони частіше піддаються шліфуванню, оскільки це менш зносостійкий процес для інструменту порівняно з різанням, особливо для сплавів, що містять карбідні вставки.

Окрім високої твердості, стелітові сплави також відзначаються дуже високою температурою плавлення, завдяки наявності кобальту та хрому в їх складі. Це означає, що такі сплави здатні витримувати високі температури без пошкоджень або деформацій, що робить їх особливо корисними в умовах високих температур та агресивного середовища.

Стелітові деталі, завдяки своїм властивостям, зазвичай не потребують значної механічної обробки. Це пов'язано з їх високою твердістю, яка забезпечує необхідну міцність та зносостійкість. Таким чином, замість складних операцій різання, шліфування є більш популярним методом обробки стелітових деталей.

Узагальнюючи, стелітові сплави є надзвичайно міцними, зносостійкими та стійкими до корозії матеріалами. Вони забезпечують низьку потребу в обробці та демонструють стійкість до високих температур, що робить їх незамінними у вимогливих умовах експлуатації.

Хімічний склад

Таблиця 1.1 Хімічний склад сталі Stellite 1

Хімічний склад	Co	Cr	C	W	Mo	Ni	Si	Fe	Mn
Stellite 1	Все інше	29,5	2,5	12,5	1	3	1,2	3	1

Stellite 1 (рис. 1.6) [6] вміщає високий процент твердих, зносостійких первинних карбідів. Вони роблять сплав підходящим для областей, зв'язаних з високою ерозійною стійкістю і сильним тертям, при деякій втраті у в'язкості.

Механічні властивості

Таблиця 1.2 Механічні та фізичні властивості сталі Stellite 1

Назва сплаву	Щільність г/см ³	σ_t , Мпа	σ_b , Мпа	Температура плавлення, °С	Твердість, HRC	ϕ , %	λ , Вт/м × К
Stellite 1	9,16	-	618	1255-1290	55	1	-

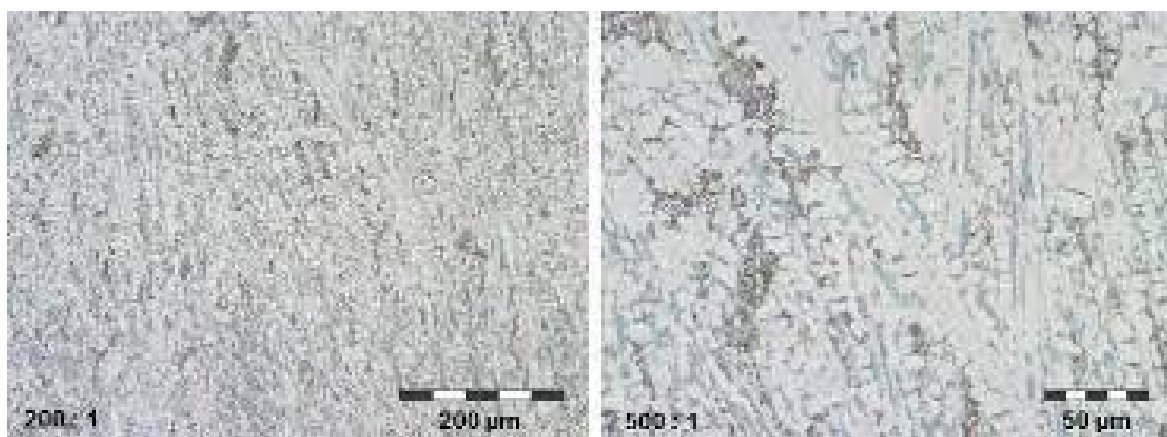


Рис. 1.7 - Мікроструктура наплавленого порошку Stellite 1.

Висновки

Поршні двигунів є життєво важливими компонентами двигунів внутрішнього згоряння, які відповідають за перетворення енергії, що генерується в процесі згоряння, в механічну енергію. Через екстремальні умови, в яких вони працюють, такі як високі температури, тиск і механічні навантаження, поршні з часом схильні до зносу, деформації та пошкодження поверхні. Такий знос може призвести до зниження ефективності роботи двигуна, збільшення витрати палива та погіршення загальної продуктивності.

Традиційні методи відновлення поршнів, такі як шліфування або механічна обробка, мають обмеження з точки зору точності, витрат часу та потенційної втрати цілісності матеріалу.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Таким чином, існує потреба в передових технологіях, які можуть ефективно відновлювати зношені або пошкоджені поршні, зберігаючи їх структурну цілісність і робочі характеристики.

Важливо зауважити, що процеси лазерного наплавлення порошками не дають шорсткість поверхневого покриття нижчу, ніж середній розмір частинок порошку вихідного матеріалу за рахунок супутникових частинок, прикріплених до поверхні.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

2. ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

2.1 Особливості лазерного наплавлення

Запит на нові методи ремонту, технологічні розробки, та інноваційні матеріали у виробничій галузі зростає через збільшений попит. Одним з напрямків виробництва деталей є впровадження аддитивних технологій, які полягають у додаванні матеріалу під час процесу виготовлення. Це відмінно від традиційних методів, таких як токарні або фрезерні, які базуються на відніманні матеріалу. Аддитивні технології спрощують виробничі процеси в енергетиці, приладобудуванні та інших галузях, де потрібні складні вироби і "вирощування" металевих деталей.

Особливо перспективним є використання технології лазерного наплавлення для виготовлення деталей. Ця технологія використовує висококонцентроване лазерне випромінювання для відновлення деталей з порошків. Механічні характеристики матеріалів, отриманих за допомогою лазерного наплавлення, часто перевищують властивості матеріалів, отриманих традиційними методами. Вона особливо підходить для важкооброблюваних матеріалів, таких як жароміцний нікель, нержавіюча сталь і титанові сплави.

Технологія лазерного наплавлення дозволяє виготовляти складні деталі без необхідності в додатковому обладнанні або налаштуванні. Однак, для отримання надійних деталей без дефектів необхідно розуміти технологічні процеси, фізичні основи та властивості матеріалів, а також методи управління процесом і виявлення дефектів. Параметри процесу лазерного наплавлення включають потужність лазера, тип сопла, швидкість переміщення лазерного променя та подачі порошку, діаметр зони опромінення, товщину нанесеного шару, розмір фракції порошку, траєкторію нанесення та перекриття шарів. Окрім цього, технологічні параметри повинні враховувати фізичні показники, такі як тиск навколишнього середовища.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний успіх процесу лазерного наплавлення залежить від досконалого розуміння теплофізичних і технологічних властивостей порошкових сплавів. Оптимальний вибір параметрів процесу дозволяє отримати структурно міцні деталі без дефектів. Ця технологія є перспективною для виробництва складних деталей з високолегованих і важкооброблюваних матеріалів, зокрема жароміцного нікелю, нержавіючої сталі і титанових сплавів.

Усвідомлення параметрів технологічного процесу лазерного наплавлення (таблиця 2.1) і їх правильне керування важливі для досягнення якісних результатів, забезпечення надійності та ефективності виробництва деталей.

Таблиця 2.1 Параметри процесів лазерного наплавлення

Параметри процесу	Продуктивність	Стабільність процесу	Коефіцієнт використання	Шорсткість	Глибина проплавлення
Потужність лазерного променя	Не основний	Не основний	Основний	Не основний	Основний
Розмір зони опромінення	Основний	Не основний	Основний	Не основний	Основний
Швидкість переходу	Основний	Основний	Основний	Не основний	Основний
Витрати порошку	Основний	Основний	Не основний	Основний	Основний
Висота шару	Не основний	Основний	Не основний	Не основний	Не основний
Подача газу			Основний	Основний	
Фракція порошку	Не основний		Основний		

Технологія вирішує низку проблем сучасної інженерії, підвищує ефективність технологічних процесів у 10 разів та знижує вартість виготовлення деталей у 3–5 разів.

2.2 Основи лазерного наплавлення

Лазерне наплавлення – це термічний процес, який передбачає осадження контрольованої кількості матеріалу на поверхню підкладки. Високоенергетичний лазерний промінь фокусується на цільовій ділянці, швидко нагріваючи поверхню і викликаючи локальне плавлення. Розплавлений матеріал або попередньо наноситься, або подається у вигляді порошку чи дроту, який плавиться і сплавляється з підкладкою, утворюючи при охолодженні затверділий шар покриття. Процес характеризується високою щільністю енергії, швидкою швидкістю затвердіння і мінімальними зонами термічного впливу.

2.3 Типи джерел лазерного випромінювання

Для лазерного наплавлення можуть використовуватися різні типи лазерів, включаючи CO₂-лазери, Nd:YAG-лазери, волоконні лазери та діодні лазери. Кожен тип має специфічні характеристики з точки зору довжини хвилі, потужності, тривалості імпульсу, якості променя та енергоефективності. Вибір джерела лазерного випромінювання залежить від бажаних властивостей покриття, технологічних вимог і сумісності матеріалів.

2.4 Параметри лазера та їх вплив

Параметри генерації лазера, такі як потужність, тривалість імпульсу, швидкість сканування, розмір плями і форма променя значно впливають на процес лазерного наплавлення.

Потужність визначає тепловіддачу і впливає на розплавлення покриття та металургійне зчеплення.

Тривалість імпульсу впливає на розподіл енергії та теплопередачу.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Швидкість сканування і розмір зони опромінення визначають швидкість нагрівання і охолодження, в той час як форма променя впливає на покриття і рівномірність нанесеного покриття.

2.5 Процес лазерного наплавлення для відновлення поршнів

2.5.1 Підготовка поверхні поршня

Перед процесом лазерного наплавлення поверхню поршня потрібно підготувати, очистивши, знежиривши і видаливши будь-які існуючі покриття або поверхневі забруднення. Для покращення адгезії покриття та механічного зчеплення може знадобитися необхідна шорсткість поверхні або попередня механічна обробка.

Ретельна підготовка поверхні має вирішальне значення для забезпечення якості та цілісності нанесеного покриття.

2.5.2 Оптимізація параметрів процесу

Оптимізація параметрів процесу лазерного наплавлення має вирішальне значення для досягнення бажаної якості покриття, металургійного зчеплення і мінімальних термічних спотворень.

Такі параметри, як потужність лазера, швидкість сканування, швидкість подачі порошку, умови концентрації променя і коефіцієнт перекриття перекриття, повинні бути ретельно підібрані і оптимізовані шляхом експериментальних випробувань. Для забезпечення узгодженості та повторюваності можна використовувати системи моніторингу та керування процесом.

2.5.3 Системи моніторингу та контролю

Для забезпечення якості та послідовності процесу лазерного наплавлення можна використовувати різні системи моніторингу та контролю. Вони можуть включати моніторинг температури за допомогою пірометрів або тепловізорів, моніторинг параметрів процесу на місці, системи управління зі зворотним зв'язком

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

у реальному часі та методи забезпечення якості, такі як методи неруйнівного контролю (NDT). Ці системи допомагають виявляти дефекти, забезпечувати належну товщину та однорідність покриття, а також підтримувати стабільність процесу.

2.5.4 Пост-обробка та фінішна обробка

Після процесу лазерного наплавлення може знадобитися подальша обробка, наприклад, механічна обробка, шліфування або полірування, щоб досягти бажаних розмірів, якості поверхні та геометрії. Пост-обробка забезпечує цілісність кінцевого покриття, усуває будь-які поверхневі дефекти і забезпечує необхідні характеристики поверхні для оптимальної роботи поршня.

2.6 Властивості та експлуатаційні характеристики поршнів з лазерним покриттям

2.6.1 Аналіз мікроструктури

Мікроструктурний аналіз має важливе значення для розуміння металургійних характеристик і фазових перетворень в покриттях, нанесених лазером. Такі методи, як оптична мікроскопія, растрова електронна мікроскопія (РЕМ) і просвічуюча електронна мікроскопія (ПЕМ) можуть бути використані для дослідження мікроструктури покриття, включаючи розмір зерен морфологію, міжфазні зв'язки та наявність будь-яких дефектів або включень.

2.6.2 Механічні властивості

Механічні властивості поршнів з лазерним покриттям, включаючи твердість, міцність, в'язкість і адгезійну міцність, є критично важливими для їх роботи. Для оцінки цих властивостей можна провести випробування на мікротвердість, випробування на розтяг і випробування на адгезію. Порівняльний аналіз з традиційними методами відновлення може дати уявлення про перевагу покриттів, нанесених лазером.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

2.6.3 Зносостійкість і поведінка при терті

Зносостійкість і характеристики тертя є ключовими факторами продуктивності при відновленні поршнів. Для оцінки зносостійкості, коефіцієнта тертя і змащувальних властивостей покриттів, нанесених лазером, можна провести трибологічні випробування, такі як випробування "штифт на диску" або "кулька на диску".

Механізми зносу, такі як абразивний знос, адгезійний знос або ерозійний знос, можуть бути вивчені для визначення ефективності покриттів у пом'якшенні цих процесів зносу.

2.6.4 Теплові характеристики

Оцінка теплових характеристик має вирішальне значення для оцінки здатності поршнів з лазерним покриттям витримувати високотемпературні умови. Вимірювання теплопровідності, випробування на термоциклічність і тепловізійні методи можуть бути використані для аналізу здатності розсіювання тепла і стійкості до теплової втоми і термічних напружень. Належне управління тепловим режимом має важливе значення для збереження цілісності поршня і запобігання теплової деградації.

2.6.5 Оцінка продуктивності поршня

Загальну продуктивність поршнів з лазерним покриттям можна оцінити за допомогою випробувань двигуна, випробувань на витривалість або випробувань на динамометрі. Ці випробування оцінюють такі параметри, як вихідна потужність, витрата палива, викиди, шум і довговічність. Порівняльні дослідження з традиційними методами відновлення можуть дати уявлення про покращення експлуатаційних характеристик, досягнуте завдяки лазерному наплавленню.

2.7 Переваги та обмеження використання поршнів з лазерним покриттям

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

2.7.1 Переваги

Поршні з лазерним наплавленням мають ряд переваг у порівнянні з традиційними методами відновлення:

Підвищена зносостійкість

Покриття, що наносяться, забезпечують підвищену зносостійкість, зменшують тертя і подовжують термін служби поршнів. Зносостійкі матеріали та оптимізована товщина покриття допомагають протистояти суворим умовам експлуатації, абразивним частинкам та високотемпературному середовищу.

Покращене відведення тепла

Покриття, нанесені лазером, можуть підвищити теплопровідність поршня, покращуючи розсіювання тепла і зменшуючи ризик теплової втоми або деформації. Це призводить до підвищення продуктивності, ефективності та надійності двигуна.

Зменшення тертя

Гладка і точно контрольована обробка поверхні, досягнута за допомогою лазерного наплавлення, зменшує тертя між поршнем і стінкою циліндра, що призводить до зменшення втрат енергії, підвищення паливної ефективності та зменшення зносу двигуна.

Збільшення терміну служби поршня

Відновлюючи зношені або пошкоджені поршні, лазерне наплавлення може значно подовжити термін їх служби, зменшуючи потребу в частій заміні та пов'язані з цим витрати.

Індивідуальний склад покриття

Лазерне наплавлення дозволяє наносити спеціально розроблені покриття зі специфічним складом і властивостями, пристосованими до вимог різних типів двигунів, умов експлуатації та цілей продуктивності.

2.7.2 Обмеження

Незважаючи на те, що поршні з лазерним покриттям мають значні переваги, слід враховувати й обмеження:

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Вартість та вимоги до обладнання

Обладнання для лазерного наплавлення може бути дорогим у придбанні та обслуговуванні, що робить його менш доступним для деяких застосувань або дрібномасштабних операцій. Також слід враховувати вартість матеріалів для покриття та етапів постобробки.

Контроль процесу та відтворюваність

Досягнення послідовних і відтворюваних результатів при лазерному наплавленні вимагає ретельного контролю і оптимізації параметрів процесу. Варіації товщини, складу та мікроструктури покриття можуть виникати, якщо процес не контролюється належним чином, що призводить до невідповідностей у продуктивності.

Товщина і рівномірність покриття

Забезпечення рівномірної товщини покриття та його покриття по всій поверхні поршня може бути складним завданням особливо в складних геометричних формах або в місцях з обмеженим доступом. Досягнення рівномірного покриття з мінімальною варіацією товщини має важливе значення для оптимальної роботи.

Сумісність матеріалів і зчеплення

Сумісність між матеріалом покриття і основою поршня має вирішальне значення для досягнення міцного металургійного з'єднання і запобігання розшаруванню або відшаруванню під час експлуатації. Вибір матеріалу та підготовка поверхні відіграють важливу роль у забезпеченні якісної адгезії та довговічності покриття.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

2.8 Обладнання

Для здійснення процесу можливо використовувати наступну серію технологічного обладнання: Установки (рис. 2.1 (а, б)) [8], що використовують лінійний привід, робот для переміщення робочого інструменту та ротатора, розташованих у екрануючій камері для управління рухом підкладки; Обладнання виготовляється на базі систем ЧПУ для обробки, із заміною робочого інструменту на спеціальний для прямого лазерного осадження та з можливістю наповнення робочої камери інертним газом;



а)

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		



б)

Рис. 2.1(а,б) – Устаткування для лазерної наплавки.

Лазерне наплавлення - це адитивний метод виробництва для металів і метало-керамічних сумішей. З його допомогою можна створювати або змінювати 3D-геометрії. Крім того, цей метод виробництва дає змогу ремонтувати або наносити шари лазерним променем. Так, адитивне виробництво використовується для ремонту лопатей турбін в аерокосмічній промисловості. В інструментальному виробництві та виготовленні пресформ виконується ремонт обламаних або зношених крайок і формотворчих функціональних поверхонь або навіть місцеве наплавлення твердого сплаву на них. Для захисту від зносу і корозії в енерготехніці або нафтовій хімії наносять покриття на місця встановлення підшипників, ролики або гідравлічні компоненти. Адитивне виробництво знаходить застосування і в автомобілебудуванні.

Лазерне наплавлення - це технологія, яка використовує лазерний промінь для часткового плавлення металевої підкладки і порошку, що транспортується до неї. Під час процесу утворюється розплавлений басейн мінімальної глибини, в якому частини порошку розплавляються. Твердий продукт формується шаруванням

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

розплавленого матеріалу, а геометрія виробу визначається рухом лазерної головки. Під час процесу можна змінювати склад порошкової суміші, що дозволяє отримувати вироби з різними властивостями. Ця технологія може використовуватися в захисній атмосфері, що запобігає окисленню металу. Обладнання для лазерного наплавлення складається з лазерної оптичної головки і насадки для порошку, які розміщені на промисловому роботі, що дозволяє виготовляти вироби різних розмірів.

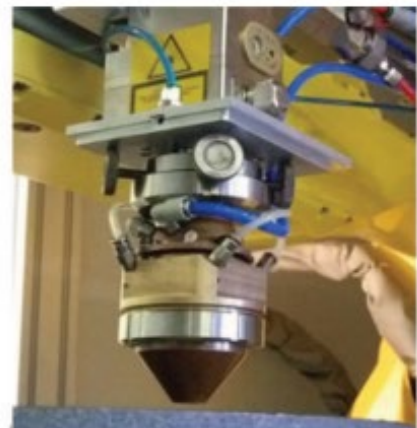
Особлива увага приділялася конструкції насадки (рис. 2.2 (а, б, в)) [9]. Вона утворює газо порошковий струмінь і, таким чином, має визначальний вплив на процес. При дослідженні використовували два типи насадок: коаксіальні та аксіально-асиметричні. Основним недоліком бічної насадки є сталість осадженого шару лише в одному напрямку, наприклад, пряма лінія з рухомою головкою лазера або тіло обертання з обертовою підкладкою. Тому, незважаючи на високу продуктивність, він майже невикористовується у виробництві обладнання. Для розробленого обладнання використовували чотирьох струмінні та кільцеві порошкові форсунки.



а)



б)



в)

Рис.2.2 Лазерні насадки: а) бічна насадка; б) коаксіальна чотирьох-струменева; в) коаксіальна з кільцевим зазором.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

Технологічні головки, оснащені коаксіальними насадками, характеризуються незалежністю технологічних параметрів від напрямку руху інструменту. Коли потік порошку коаксіально транспортується до лазерного променя, всі напрямки руху підкладки знаходяться в площині, перпендикулярній напрямку потоку порошку, тому насадка з коаксіальним подачею не залежить від напрямку руху . У цьому випадку можливе створення виробів з більш складною геометрією. Геометрія газового порошкового струменя залежить не тільки від конструкції насадки, але і від геометрії її сопла.

Основний вплив на продуктивність та стабільність процесу за допомогою коаксіальної насадки мають: кут конвергенції, ширина звуження струменя, рівномірність розподілу порошку щодо осі лазерного променя. В результаті досліджень основним фактором, що визначає ширину газоподібного струменя на виході з сопла, є ширина прорізу форсунки. Кілька струменеві форсунки мають від трьох до шести окремих каналів, які утворюють порошкові струмені.

Його конструкція є більш складною, але забезпечує більшу гнучкість для управління струменем порошку. Під час обробки зона стику струменів розташована поблизу розплавленого басейну, який утворюється лазерним променем, що проходить через центральний отвір насадки. Форсунки з кільцевим зазором є ще більш технологічними. Газопорошковий струмінь подається через зазор між двома конічними поверхнями, які спрямовують і фокусують його. Завдяки рівномірному розподілу порошку по окружності кільцевої щілини досягається високий ступінь симетрії та ізотропії щодо напрямку руху.

2.9 Переваги впровадження

Адитивне виробництво, відоме також як 3D-друкування, є процесом створення тривимірних деталей шляхом пошарового додавання матеріалу за допомогою цифрової моделі. Ця унікальна технологія дозволяє виготовляти складні

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталі на замовлення без необхідності в дорогому спеціалізованому обладнанні або формах, а також зменшує потребу в багатьох традиційних обробних операціях.

Деталі, які відповідають їхній конструкції, можуть бути відновлені за один крок, без необхідності в складних обробних операціях, таких як свердління отворів або фрезерування пазів. Також ця технологія дозволяє економити запасні частини та скорочує час, необхідний для виготовлення критичних або застарілих запасних частин.

Застосування адитивного виробництва включає прототипування та швидкий ремонт промислового обладнання, таких як штампи та спеціальні інструменти. За останні двадцять років відбувся значний прогрес у компонентах цієї технології, включаючи доступні і надійні промислові лазери, ефективне обчислювальне обладнання та програмне забезпечення, а також розвиток металевих порошкових матеріалів, що дозволяє адитивному виробництву залишатися передовою технологією.

Основні переваги технології лазерного наплавлення можуть бути виділені наступним чином:

- Можливість широкого контролю фізико-механічних властивостей наплавленого шару шляхом налаштування параметрів процесу.
- Точне дозування енергії лазерного проміню, локальний вплив і мінімальний тепловий вплив на матеріал, що забезпечує збереження геометричних розмірів і мінімізує теплове впливання.
- Висока якість з'єднання наплавленого шару з підкладкою завдяки металургійному процесу сплавлення.
- Отримання наплавленого шару високої якості без дефектів і з необхідними властивостями, такими як твердість, ударна в'язкість, теплостійкість і корозійна стійкість.
- Зменшення необхідності в подальшій механічній обробці.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

2.10 Недоліки лазерного наплавлення

- **Висока вартість:** Лазерне наплавлення вимагає використання дорогих обладнання та спеціалізованих матеріалів. Це може зробити процес виготовлення виробів за допомогою цієї технології дорожчим порівняно з іншими методами виробництва.
- **Обмежені розміри:** Розміри виробів, які можуть бути виготовлені за допомогою лазерного наплавлення, обмежені розмірами робочої області лазерного обладнання. Великі або масивні деталі можуть виявитися складними або навіть неможливими для виготовлення.
- **Тепловий вплив:** Під час процесу лазерного наплавлення відбувається значний тепловий вплив на матеріал. Це може призводити до деформації деталі, зміни властивостей матеріалу або появи тріщин та дефектів. Контроль теплового впливу важливий аспект, який потребує уваги та налагодження.
- **Обмежені матеріали:** Не всі матеріали підходять для лазерного наплавлення. Деякі матеріали можуть бути складними або неможливими для обробки цією технологією через їх хімічну структуру або високу температуру плавлення.
- **Вимоги до підготовки поверхні:** Лазерне наплавлення вимагає детальної підготовки поверхні перед процесом. Це може включати чищення, шліфування та видалення окисних плівок. Дотримання правильної підготовки поверхні є важливим для досягнення якісного наплавлення.
- **Відсутність стандартів:** У порівнянні з традиційними методами виробництва, стандарти для якості та властивостей виробів, виготовлених за допомогою лазерного наплавлення, можуть бути менш розробленими або

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відсутніми. Це може створювати виклики щодо сертифікації та прийняття таких виробів на ринку.

- Утворення тріщин у наплавлених шарах заготовки. При виникненні тріщини в покриттях знижується втомна міцність яка може зменшуватися навіть в 10-15 раз, що призводить до виходу виробу з ладу. Використання оптимальних параметрів процесу DLD дозволяє готувати зразки без таких макродефектів, як тріщини.

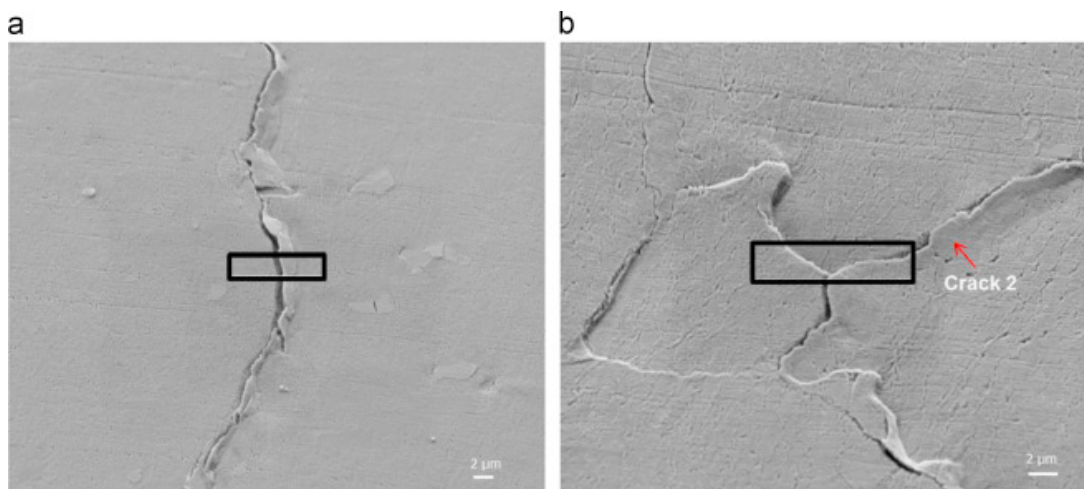


Рис. 2.3 - Тріщини.

Висновки

1. Використання сталевого порошку Stellite 1 як присадного матеріалу для лазерного наплавлення демонструє великий потенціал у сфері відновлення деталей.
2. Ця технологія пропонує значні переваги, серед яких зниження витрат матеріалу і часу на виробництво, можливість створення складних геометричних форм і гнучкість, що дозволяє швидко адаптуватися до нових вимог без перебудови всього виробничого циклу.
3. Шляхом точного налаштування параметрів можна досягти дрібнопористої дендритної структури або литої структури зі значними дендритними осями.
4. Отримані поверхні зберігають характеристики міцності і твердості традиційної сталі Stellite 1, але з вищою продуктивністю, що призводить до значної економії витрат на виробництво.
5. Цей процес можна синергетично поєднувати з іншими технологіями, що ще більше зменшує виробничі витрати, скорочує час виконання замовлення і дозволяє виробляти продукцію, яка була б недосяжною виключно за допомогою цього методу.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Попередній розрахунок оптичної системи

Таблиця 3.1 Початкові дані

Призначення оптичної системи	n_1 Оптичний матеріал	f_1 мм	D_1 мм	r_{11} мм	n_2 Оптичний матеріал	f_2 мм	r_{21} мм	L мм
Коліматор	1,5203 (КФ4)	290	90	∞	1,7617 (ТФ5)	155	140	165

Побудова проходження проміння через оптичну систему

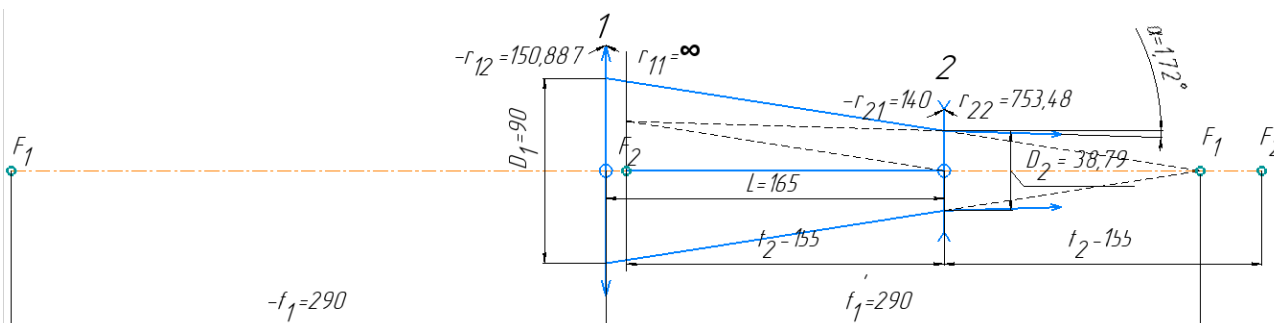


Рис. 3.1 – Проходження променя.

Перевірочний розрахунок оптичної системи

За заданим показником заломлення n_1 лінзи 1, фокусною відстанню f_1 та радіусом кривизни передньої поверхні заломлення r_{11} , визначаємо радіус кривизни задньої поверхні заломлення r_{12} .

$r_{11} = \infty$, тоді необхідно використовувати формулу:

$$r_{12} = f_1(n_1 - 1)$$

$$r_{12} = 290(1,5203 - 1) = 150,887$$

$$r_{22} = \frac{f_2 r_{21}(n_2 - 1)}{r_{21} - f_2(n_2 - 1)} = 753,48$$

Діаметр світлового пучка на лінзі 2 визначається з подібності трикутників

									Арк.
									42
Змн.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата	МЛ91000.00.000.ПЗ				

$$D_2 = \frac{D_1(f_1 - L)}{f_1}$$

$$D_2 = \frac{90(290 - 165)}{290} = 38,79$$

Кут нахилу променів на виході з оптичної системи визначаємо за формулою:

$$a = \arctg \frac{D_1(L + f_2 - f_1)}{2f_1f_2}$$

$$a = \arctg \frac{90(165 + 155 - 290)}{2 \cdot 290 \cdot 155} = 1,72^\circ$$

					МЛІ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

3.2 Розрахунок параметрів лінз

Розрахунок позитивної лінзи

Розрахувати оптичну систему згідно даних таблиці 3.1.:

1. Виходячи зі значення світлового діаметру $D_1 = 90$ мм, вибираємо за табл. 3.2.

Таблиця 3.2 Залежність діаметру лінзи від її світлового діаметра

Світловий діаметр D_1 , мм	Найменший діаметр лінзи D , мм при кріпленні	
	Завальцюванням	Різьбовим кільцем
$D_1 < 6$	$D_1 + 0,6$	-
$6 \leq D_1 < 10$	$D_1 + 0,8$	$D_1 + 1,0$
$10 \leq D_1 < 18$	$D_1 + 1,0$	$D_1 + 1,5$
$18 \leq D_1 < 30$	$D_1 + 1,2$	$D_1 + 1,8$
$30 \leq D_1 < 50$	$D_1 + 1,5$	$D_1 + 2,0$
$50 \leq D_1 < 80$	$D_1 + 2,0$	$D_1 + 2,5$
$80 \leq D_1 < 120$	-	$D_1 + 3,0$
$120 \leq D_1 < 180$	-	$D_1 + 4,0$
$180 \leq D_1 < 260$	-	$D_1 + 5,0$
$260 \leq D_1 < 360$	-	$D_1 + 6,0$
$360 \leq D_1 < 500$	-	$D_1 + 7,0$

$$D_{L1} = D_1 + 3,0 = 90 + 3,0 = 93 \text{ мм},$$

Приймаємо його рівним 95 мм за ГОСТ 6636-69.

2. Для колімаційних систем точність центрування – знижена, вище 0,05 мм.
Допуск на діаметр оптичної деталі d_1 , на внутрішній діаметр оправы – Н11.

3. Товщина по крайці $t_1 = 3$ мм.

4. Товщина лінзи по оптичній вісі

$$d_1 \geq \frac{D_{L1} - 10t_1}{4} = \frac{95 - 10 \cdot 3}{4} = 16,25 \text{ мм}.$$

Приймаємо $d_1 = 17$ мм.

5. Допуск на товщину лінзи приймаємо рівним $\pm 0,5$ мм.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Виконуємо розрахунок параметрів лінзи:

6.1. Відрізок від вершини першої поверхні заломлення до передньої головної площини:

$$S_H = -f_1' \frac{n_1 - 1}{n_1 r_{12}} d_1 = f_1 \frac{n_1 - 1}{n_1 r_{12}} d_1 = 290 \frac{1,5203 - 1}{1,5203 \cdot 150,887} 17 = 11,182 \text{ мм.}$$

6.2. Радіус першої поверхні заломлення лінзи:

$$R_{11} = r_{11} = \infty.$$

6.3. Відрізок від вершини другої поверхні до задньої головної площини:

$$S'_{H'} = -f_1' \frac{n_1 - 1}{n_1 r_{11}} d_1 = f_1 \frac{n_1 - 1}{n_1 r_{11}} d_1 = 290 \frac{1,5203 - 1}{1,5203 \cdot \infty} 17 = 0 \text{ мм.}$$

6.4. Відстань від вершини лінзи до зображення:

$$s' = f' - S'_{H'} = 290 - \infty = 290 \text{ мм.}$$

6.5. Радіус другої сферичної поверхні заломлення лінзи:

$$R_{12} = r_{12} \left(1 + \frac{S'_{H'}}{f_1'}\right) = 150,887 \left(1 + \frac{0}{290}\right) = 150,887 \text{ мм.}$$

Відповідно до ГОСТ 1807–75 приймаємо та $R_{12} = 150,66$ мм.

7. Фокусна відстань лінзи:

$$f_1' = \left[(1,5203 - 1) \left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{150,66} \right) + \frac{(1,5203 - 1)^2}{1,5203 \cdot \infty \cdot 150,66} \cdot 17 \right]^{-1} = 289,56 \text{ мм}$$

Похибка становить:

$$\Delta = \frac{f_1' - f_1}{f_1} = \frac{289,56 - 290}{290} \cdot 100\% = -0,15\%.$$

Проведений розрахунок та вибір параметрів лінзи можна прийняти як вірні.

8. Проведемо ескізу побудову розрахованої лінзи. З ескізу видно, що товщина лінзи по крайці більше мінімально рекомендованої $t = 9 > 3$ мм.

9. Розмір технологічних фасок та допуски на них рівні на обох поверхнях заломлення $m_{11} = m_{22} = 0,4^{+0,5}$ мм. Кут нахилу фасок, виходячи з відношень D/R, вибираємо рівними 45 градусів.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

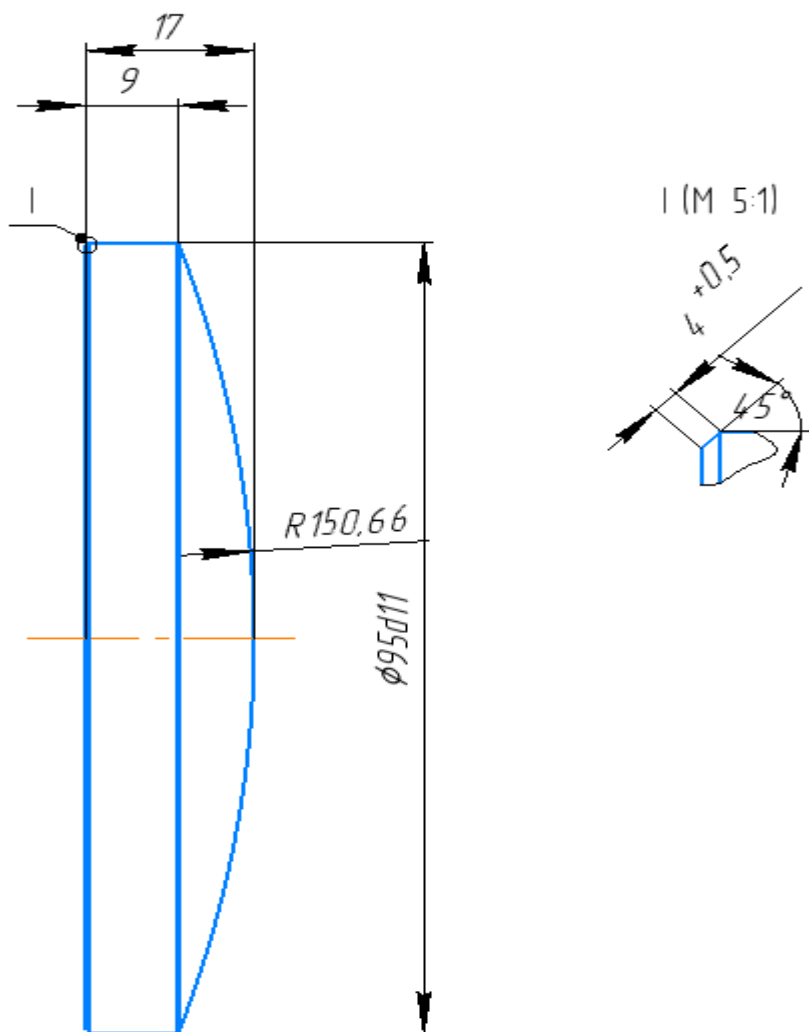


Рис. 3.2 - Параметри позитивної лінзи.

1. Виходячи зі значення світлового діаметру $D_2 = 38,79$ мм, вибираємо за табл. 2.1. для завальцювання:

$$D_{L2} = D_2 + 1,5 = 38,79 + 1,5 = 40,29 \text{ мм.}$$

Приймаємо його рівним 42 мм за ГОСТ 6636-69.

2. Для колімаційних систем точність центрування – знижена, вище 0,05 мм. Допуск на діаметр оптичної деталі $d11$, на внутрішній діаметр оправы – Н11.

3. Товщина лінзи по оптичній вісі

$$d_2 = (0,15 \dots 0,08) D_{L2} = 42(0,15 \dots 0,08) = 6,3 \dots 3,36 \text{ мм.}$$

Приймаємо $d_2 = 4,0$ мм.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

4. Допуск на товщину лінзи приймаємо рівним $\pm 0,5$ мм.

5. Виконуємо розрахунок параметрів лінзи:

5.1. Відрізок від вершини першої поверхні заломлення до передньої головної площини:

$$S_{2H} = -f_2' \frac{n_2 - 1}{n_2 r_{22}} d_2 = f_2 \frac{n_2 - 1}{n_2 r_{22}} d_2 = 155 \cdot \frac{1,7617 - 1}{1,7617 \cdot 753,48} \cdot 4 = 0,355 \text{ мм.}$$

5.2. Радіус першої поверхні заломлення лінзи:

$$R_{21} = r_{21} = 140.$$

Відповідно до ГОСТ 1807–75 приймаємо $R_{21} = 139,96$ мм.

5.3. Відрізок від вершини другої поверхні до задньої головної площини:

$$S_{2H'} = -f_2' \frac{n_2 - 1}{n_2 r_{21}} d_2 = f_2 \frac{n_2 - 1}{n_2 r_{21}} d_2 = 155 \cdot \frac{1,7617 - 1}{1,7617 \cdot 139,96} \cdot 4 = 1,9$$

5.4. Відстань від вершини лінзи до зображення:

$$s' = f_2' - S_{2H'} = 139,96 - 1,8 = 138,16 \text{ мм.}$$

5.5. Радіус другої сферичної поверхні заломлення лінзи:

$$R_{22} = r_{22} \left(1 + \frac{S_{2H'}}{f_2'}\right) = 753,48 \left(1 + \frac{1,9}{139,66}\right) = 763,73 \text{ мм.}$$

Відповідно до ГОСТ 1807–75 приймаємо $R_{12} = 139,96$ та $R_{22} = 763,8$ мм.

6. Фокусна відстань лінзи:

$$f_2' = \left[(1,7617 - 1) \left(\frac{1}{139,96} + \frac{1}{763,8} \right) + \frac{(1,7617 - 1)^2}{1,7617 \cdot 139,96 \cdot 763,8} \cdot 4 \right]^{-1}$$
$$= 154,99 \text{ мм}$$

Похибка становить:

$$\Delta = \frac{f_2' - f_2}{f_2} = \frac{154,99 - 155}{155} \cdot 100\% = -0,006\%.$$

Вирахуване значення фокусної відстані майже не відрізняється від заданого, тому, проведений розрахунок та вибір параметрів лінзи можна прийняти як вірні.

					МЛІ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок вузлів кріплення

Кріплення негативної лінзи завальцюванням

1. Вибираємо основні елементи оправы для кріплення завальцюванням негативної лінзи. Виходячи з того, що діаметр лінзи дорівнює 42 мм, приймаємо $S = 0,4$ мм; $l = 1,2$ мм; $l_1 = 2,5$ мм; $l_2 = 0,8$ мм.

2. Мінімальне значення діаметру центрального отвору оправы

$$d_2 = D_2 + 0,2 = 39,79 + 0,2 = 38,99 \text{ мм.}$$

3. Остаточну приймаємо діаметр центрального отвору $d_2 = 40$ мм.

Відповідно до обраних та розрахованих розмірів виконуємо ескізну побудову елементів оправы для кріплення завальцюванням. Остаточну конфігурацію оправы для закріплення негативної лінзи буде визначено після розробки юстирувального вузла проектованої оптичної системи.

Кріплення позитивної лінзи різьбовим кільцем

1. Приймаємо діаметр оправы під встановлення оптичної деталі:

$$d_{01} = D_{L1} = 95$$

2. Мінімальне значення діаметру центрального отвору оправы:

$$d_{02} = D_1 + 0,2 = 90 + 0,2 = 90,2$$

Приймаємо $d_{02} = 92$

3. Діаметр внутрішньої різьби (таб.5.2):

$$D_p = D_{L1} + 1,5 = 95 + 2,0 = 97 \text{ мм}$$

Приймаємо $D_p = 95$

4. Крок різьби дорівнює:

$$P_0 = 0,75$$

5. Перевіряємо умову, що діаметр внутрішньої різьби оправы має відповідати:

$$D_p \geq d_{01} + 0,2 + 2H_1 = 95 + 0,2 + 2 \cdot 0,54 \cdot 0,75 = 96,01 \text{ мм}$$

$$H_1 \approx 0,54 \cdot P_0 = 0,405$$

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Довжина ділянки нарізання внутрішньої різьби:

$$S_p = (6 \dots 10)P_0 = 8 \cdot 0,75 = 6 \text{ мм}$$

7. Визначаємо розміри проточки для виходу різьбоутворюючого інструменту при виготовленні внутрішньої метричної різьби (ГОСТ 10549-63).

Розміри проточки: $b_1 = 3,0$ $r = 1,0$ $r_1 = 0,5$ $d_4 = 97 + 0,4 = 97,4$

8. Визначаємо розміри різьбового кільця:

- мінімально допустимий діаметр отвору

$$d_{K1min} = D_p - 5,5 = 97 - 5,5 = 91,5$$

- мінімально допустима висота

$$h_{Kmin} = 6,0$$

- ширина та висота шліцевого пазу

$$t_{ш} = 2,0$$

$$h_{ш} = 2,5$$

Округляємо до найближчого більшого цілого значення та приймаємо діаметр отвору кільця $d_{K1} = 90$ що дорівнює діаметру отвору у оправі d_{02}

Висоту кільця приймаємо $h_K = 6,0$ Визначаємо кількість шліців під ключ.

$d_{K1} = 90 < 200$ мм тому кількість шліців – два.

9. Крок зовнішньої різьби для закріплення корпусу вузла у приладі приймаємо:

$$P' = 2P_0 = 2 \cdot 0,75 = 1,5 \text{ мм}$$

10. Приймаємо мінімальну товщину корпусу вузла рівною 2 мм та отримуємо діаметр зовнішньої різьби:

$$D'_p \geq d_4 + 2t + 2H'_1 = 97,4 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 0,54 \cdot 1,5 = 103,02 \text{ мм}$$

Приймаємо 104 мм

11. Мінімальний розмір зовнішнього діаметру оправы:

$$D_{02} = D'_p + (2 \dots 10) = 104 + 6 = 110$$

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

12. Довжина ділянки із зовнішньою різьбою:

$$l_p = (6 \dots 10)P' = 10 \cdot 1,5 = 15\text{мм}$$

13. Визначаємо розміри проточки для виходу різьбоутворюючого інструменту при виготовленні зовнішньої метричної різьби (ГОСТ 10549-63).

Розміри проточки: $b=4,0\text{мм}$ $r=1,0\text{мм}$ $r_1 = 0,5\text{мм}$ $d_3 = 104 - 2,2 = 101,8\text{мм}$

Після завершення вибору та розрахунку основних конструкційних елементів оправи для закріплення різьбовим кільцем позитивної лінзи, креслимо ескізи оправи (з виносками проточок для виходу різьбоутворюючого інструменту) та різьбового кільця.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Відомо, що багатоканальні сопла мають кращі характеристики в технологічних процесах газопорошкового лазерного наплавлення. Для цього використовуються сопла з різною кількістю каналів, формою внутрішньої порожнини сопла. При проектуванні сопла подачі газопорошкового матеріалу рекомендується:

- Кут між віссю симетрії газопорошкового потоку та віссю симетрії лазерного променя повинен бути якомога меншим;
- Контролюйте відстань між площиною виходу сопла і зоною обробки (або відстань від площини, де потоки порошку перетинають один одного і перетинають вісь симетрії лазерного променя).

Для подачі газопорошкової суміші в зону обробки (потік порошку подається по циліндричних трубах) використовуються трьох-, чотирьох- і шестиканальні сопла [3.3, 3.4]. основна відмінність сопел з різною кількістю каналів полягає в можливості:

- Одночасна подача порошків з різними фізичними властивостями в зону обробки;
- Налаштуйте кількість "робочих" каналів (для чотириканальної системи - два або чотири канали, для шестиканальної форсунки - два, чотири або шість каналів), таким чином контролюючи швидкість і витрату порошку.

Зменшення значень кута між осями симетрії газопорошкового потоку і лазерного променя сприяє збільшенню часу лазерного нагрівання (а також температури зони обробки) частинок порошку перед їх зіткненням з поверхнею заготовки. Якщо відстань між виходом сопла і поверхнею, що наплавається, зробити мінімальною, то можна підвищити ефективність лазерного наплавлення за рахунок зменшення відходів порошку. Так, для газопорошкового потоку (з середнім розміром частинок 10-20 мкм), що генерується соплом з внутрішнім діаметром каналу подачі порошку 1,5 мм, кут розбіжності становитиме 4° на

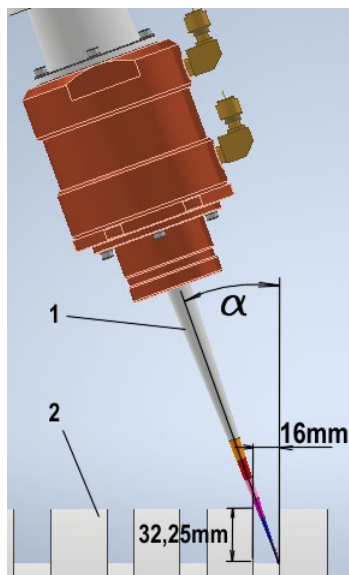
					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

відстані 20 мм від виходу сопла. В свою чергу діаметр поперечного перерізу порошкового потоку в цій зоні буде 4,3 мм, а на відстані 30 мм від виходу сопла - 5,7 мм відповідно. Захист газопорошкового потоку додатковим потоком інертного газу призведе до збільшення розмірів сопла подачі порошку та підвищеної витрати газів.

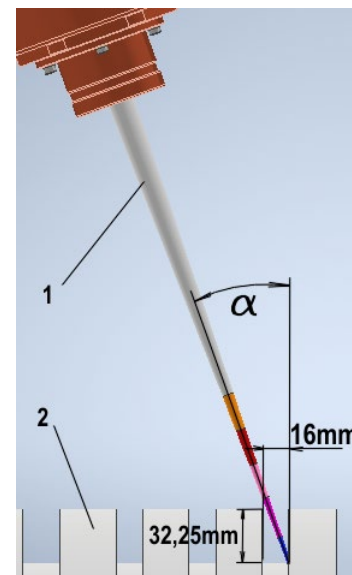
Існують деякі особливості лазерного наплавлення внутрішніх поверхонь канавок поршня (рис. 3.4):

- Простір для розташування сопла відносно поршня дуже обмежений;
- Фокусна пляма матиме більший діаметр порівняно зі звичайними умовами облицювання.

Останнє твердження можна пояснити тим, що лазерний промінь входить в канавку поршня під деяким кутом α (рис. 3.5). Враховуючи, що талія каустичної поверхні лазерного променя майже циліндрична, із середнім діаметром D_{LB} , можна зробити висновок, що на поверхні стінок канавки круговий переріз лазерного променя перетворюється на еліпс з великою віссю $D_{LB} / \sin(\alpha)$, а площа його спотвореної фокальної плями буде $\pi * D_{LB} * D_{LB} / \sin(\alpha)$. При цьому, чим менше значення кута падіння α , тим менше значення густини потужності лазерного пучка W_P (табл. 3.3, табл. 3.4).



a)



b)

Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

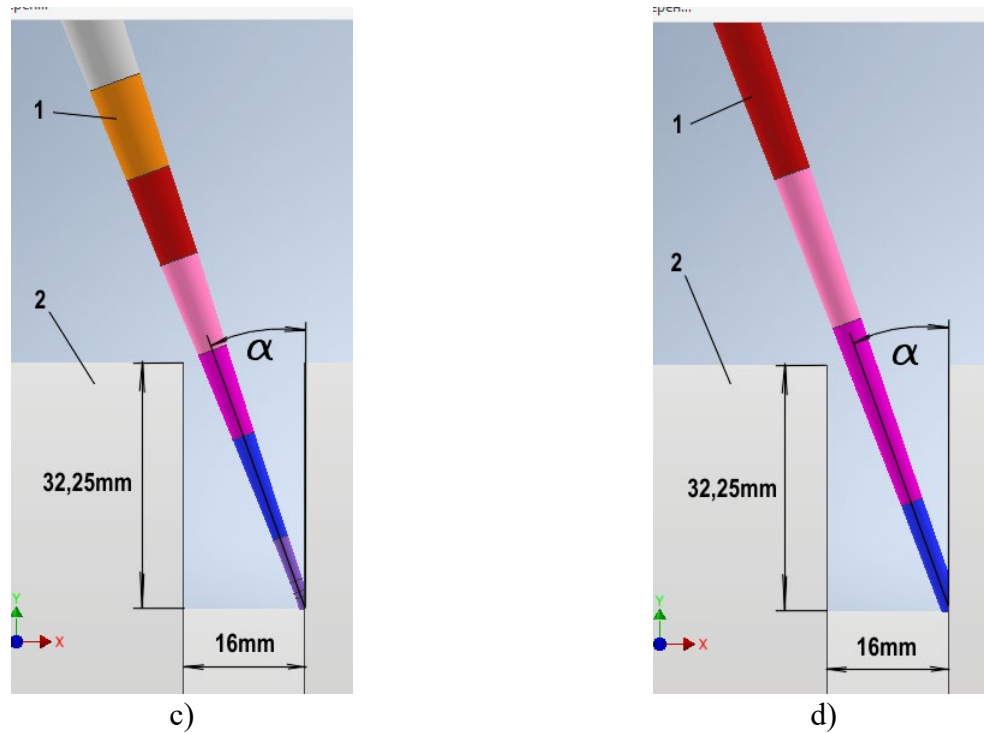


Рис. 3.5 - Фокусування лазерного променя ($d_{fiber} 0.6\text{мм}$, $NA=0.1$, $F1=50\text{мм}$ і $F2=250\text{мм}$) на бічній поверхні (кут падіння $\alpha = 20^0$) для різних відстаней між колімуючою лінзою і площиною виходу оптичного волокна Dz , де: а), в) - $Dz=98\text{мм}$; б), г) - $Dz=84\text{мм}$; дійсний розмір і збільшене зображення; 1 - розрахункова каустична поверхня лазерного променя, що виходить з оптичного волокна; 2- поршень.

Таблиця 3.3 Зміна густини потужності лазерного пучка ($P_m = 4000\text{ Вт}$) з гауссовим розподілом на поверхні заготовки від кута α між поверхнею заготовки та віссю симетрії лазерного пучка

#	R _{LB} (cm)	W _p Gaus (W/cm ²)				
		$\alpha=90^0$	$\alpha=30^0$	$\alpha=25^0$	$\alpha=20^0$	$\alpha=15^0$
1	0,1	2,55E+05	1,27E+05	1,08E+05	8,71E+04	6,59E+04
2	0,15	1,13E+05	5,66E+04	4,79E+04	3,87E+04	2,93E+04
3	0,2	6,37E+04	3,18E+04	2,69E+04	2,18E+04	1,65E+04
4	0,25	4,08E+04	2,04E+04	1,72E+04	1,39E+04	1,06E+04

5	0,3	2,83E+04	1,42E+04	1,20E+04	9,68E+03	7,33E+03
6	0,35	2,08E+04	1,04E+04	8,79E+03	7,11E+03	5,38E+03

Таблиця 3.4 Зміна розподілу густини потужності лазерного пучка ($P_m = 4000\text{Вт}$) на поверхні заготовки в залежності від кута α між віссю симетрії лазерного пучка та поверхнею заготовки

#	R_{LB} (cm)	$W_p \text{ Norm (W/cm}^2\text{)}$				
		$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 15^\circ$
1	0,1	1,27E+05	6,37E+04	5,38E+04	4,36E+04	3,30E+04
2	0,15	5,66E+04	2,83E+04	2,39E+04	1,94E+04	1,47E+04
3	0,2	3,18E+04	1,59E+04	1,35E+04	1,09E+04	8,24E+03
4	0,25	2,04E+04	1,02E+04	8,61E+03	6,97E+03	5,28E+03
5	0,3	1,42E+04	7,08E+03	5,98E+03	4,84E+03	3,66E+03
6	0,35	1,04E+04	5,20E+03	4,39E+03	3,56E+03	2,69E+03

З даних, наведених у табл. 3.3 і 3.4, можна зробити висновок, що коли кут α між віссю симетрії лазерного променя і поверхнею, що покривається, менший за 30° , то необхідна густина потужності W_p може бути досягнута при $R_{LB} < 2,5$ мм (табл. 2.1).

Для наплавлення всередині поршня канавок глибиною H_R і шириною S_R (рис. 1.1, рис. 2.2) за допомогою коаксіальних сопел для подачі газопорошкового потоку в зону обробки лазерним променем слід врахувати деякі моменти:

- основна частина сопла не торкається зовнішньої поверхні поршня;
- немає перешкод для вільного проходження газопорошкових потоків і лазерного променя;

Можна визначити відстань від виходу сопла до нижньої поверхні канавки F_{PS} (рис. 2.2), де зустрічаються лазерний промінь і газопорошкові потоки:

$$F_{PS} = (H_R + d) / \cos(\alpha) + 0,5D_{2n} * \text{tg}(\alpha)$$

Коли зазор δ між основною частиною сопла подачі порошку і та зовнішньою циліндричною поверхнею знаходиться в межах 1-3 мм (рис. 2.2), при цьому кінцевий діаметр сопла D_{2n} знаходиться в межах 10-20 мм (рис. 2.2), а глибина канавки $H_R = 32,25$ мм (рис. 1.1), то відстань від виходу сопла до нижньої поверхні канавки" F_{PS} буде більшою ніж 34 мм (табл. 2.3). У цьому випадку діаметр газопорошкового струменя буде більше 6 мм, що перевищує діаметр лазерного променя (табл. 2.1, табл. 2.2), і це призведе до надзвичайних втрат порошку. Тому необхідно, щоб відстань від виходу сопла до нижньої поверхні канавки була якомога меншою.

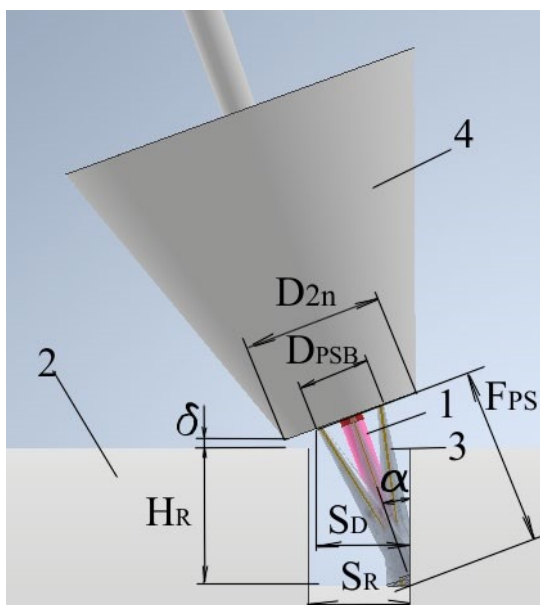


Рис. 3.6 - Розрахункова схема подачі газопорошкового потоку в зону обробки лазерним променем, де: 1 розрахункова каустична поверхня лазерного променя, що виходить з оптичного волокна (d_{fiber} 0,6мм і $NA=0,1$) і фокусується парою лінз з фокусними відстанями $F1=75$ мм і $F2=400$ мм ($dz=74$ мм); 2- поршень; 3 газопорошковий потік; 4 - основний корпус сопла .

Табл. 3.5 Приблизна відстань, яку проходить газопорошковий струмінь до стінок канавки F_{PS} ($d=1$ мм)

					МЛІ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

H_R	D_{2n}	F_{PS} ($\alpha=10^0$)	F_{PS} ($\alpha=15^0$)	F_{PS} ($\alpha=20^0$)	F_{PS} ($\alpha=25^0$)	F_{PS} ($\alpha=30^0$)
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
32,25	10	34,64457	35,76268	37,20376	39,01885	41,28054
32,25	15	35,08539	36,43255	38,11369	40,18462	42,72392
32,25	20	35,5262	37,10242	39,02361	41,35039	44,1673
32,25	25	35,96702	37,7723	39,93354	42,51616	45,61067
32,25	30	36,40784	38,44217	40,84346	43,68193	47,05405

Найпростішими рішеннями для подачі газопорошкового потоку в зону обробки лазерним променем є два окремі канали, які були розроблені спеціально для цієї мети (рис. 2.5)

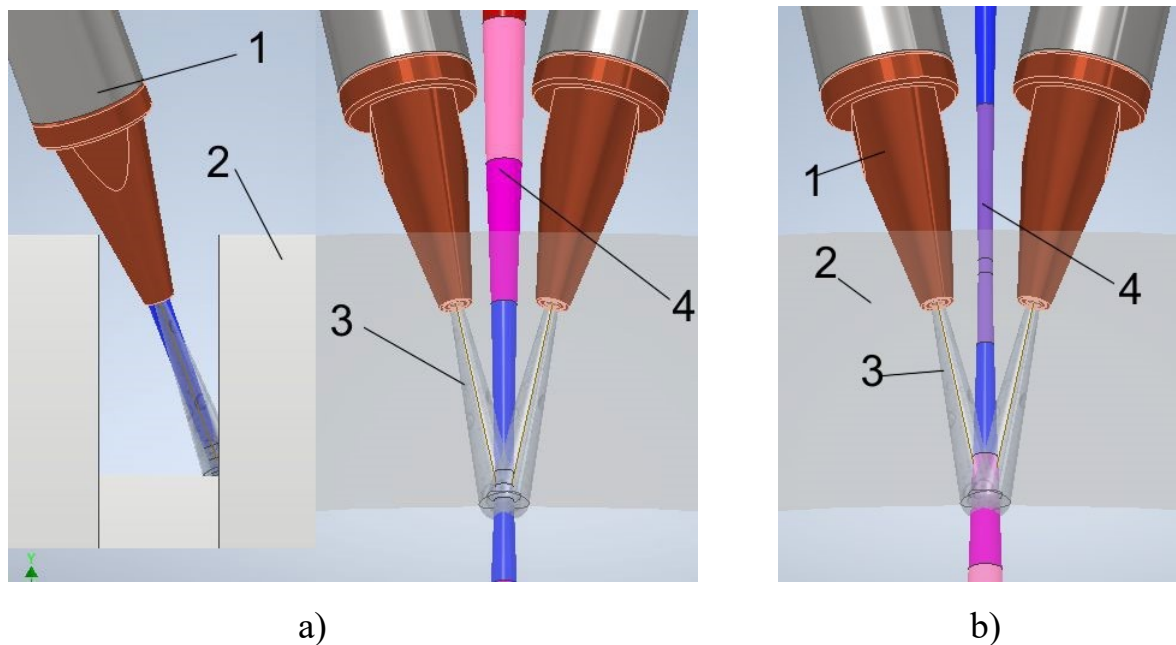


Рис. 3.7 - Схема наплавлення бічної стінки поршневого кільця ($\alpha = 20^0$) за допомогою 2-х незалежних сопел для подачі газопорошкового потоку ($d_{fiber} 0,6\text{мм}$, $NA=0.1$, $F1=100\text{мм}$ і $F2=250\text{мм}$) з урахуванням того, що порошкові потоки перетинаються на нижній поверхні канавки ($Dz=88\text{мм}$), де: а) - $Dz=88\text{мм}$; б) - $Dz=90\text{мм}$; 1 - основна частина сопла; 2 - поршень; 3 - ГАЗОПОРОШКОВИЙ ПОТОК; 4 - каустична поверхня.

Відповідно до вищезазначених припущень, ми можемо зробити висновок, що

- розроблені системи подачі газопорошкового потоку в зону обробки лазерним променем здатні здійснювати лазерне наплавлення і лазерне наплавлення плавильного шару
- Використання двох незалежних одинарних сопел гарантує ефективне використання порошкового матеріалу при наплавленні внутрішніх поверхонь поршневих канавок (відстань від виходу сопла до поверхонь канавок становить близько 22 мм).

Сопло для подачі газопорошкового потоку - це ноу-хау і оригінальна конструкція, яка складається з елементів, показаних на рис. 3.8.

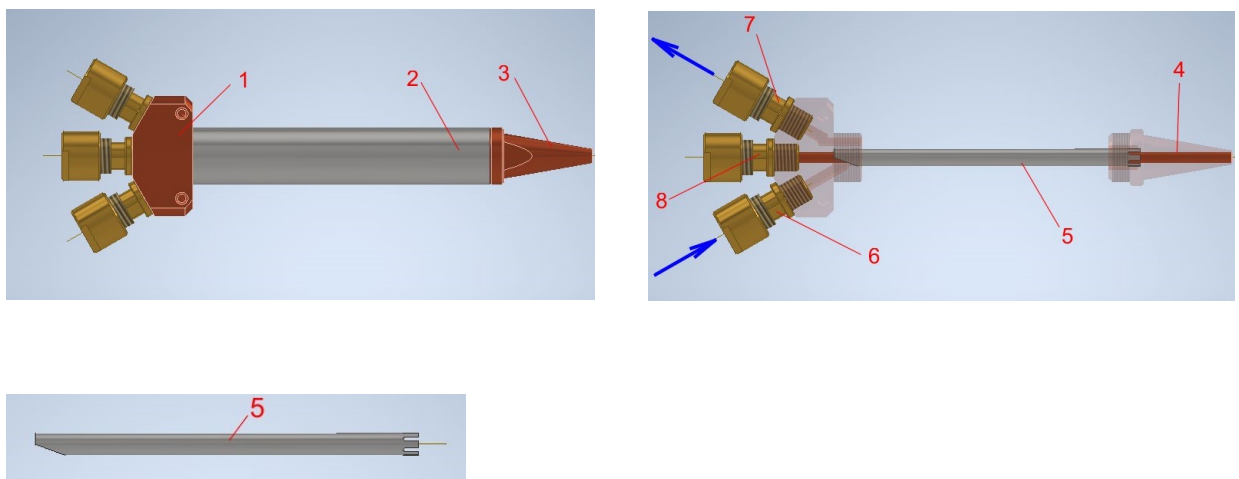


Рис. 3.8 - 3D модель одноканального сопла для подачі газопорошкового потоку, де: : 1- основний корпус; 2- циліндрична труба; 3- сопло; 4- циліндрична труба для подачі газопорошкового потоку; 5- циліндрична труба для підведення теплоносія; 6,7,8 - штуцери для каналів підведення води та підведення газопорошкового потоку.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Розроблено та виготовлено оригінальну систему фокусування та сопла для подачі газопорошкового потоку в зону обробки лазерним променем.
2. Одноканальна система подачі газопорошкового потоку є ноу-хау і може бути запатентована. Ключовими характеристиками цього сопла є
 - Газопорошковий струмінь подається під кутом 12° до осі симетрії лазерного променя,
 - Лазерне наплавлення можливо виконати всередині канавок поршня шириною 16 мм і глибиною 32 мм під кутом 20° , при цьому відстань від виходу сопла до поверхні, що наплавляється, не перевищує 25 мм.
3. Рекомендується підготувати кілька патентних заявок на способи наплавлення з використанням багатоканальних сопел
4. Подальші переговори необхідні для того, щоб розробити роз'єм, який допоможе приєднати оптичне волокно до блоку фокусування.
5. Подальше вдосконалення та спрощення конструкцій форсунок можливе за умови надання додаткових технічних даних.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ОБРОБЦІ

4.1 Загальні відомості

Цей звіт містить детальний огляд заходів безпеки та конкретних елементів захисту лазерного обладнання, що використовується для лазерного наплавлення. Лазерне наплавлення передбачає використання лазерної технології для покращення властивостей поверхні різних матеріалів. У наступних розділах викладено рекомендації з техніки безпеки та процедури поводження з обладнанням, що ґрунтуються на міжнародних стандартах.

Безпека лазерного обладнання:

Класифікація лазерів:

Лазерне обладнання повинно відповідати стандарту класифікації лазерів Міжнародної електротехнічної комісії (ІЕС) 60825. Система класифікації поділяє лазери на різні класи залежно від їхньої потенційної небезпеки. Дуже важливо розуміти класифікацію лазерного обладнання, яке використовується, щоб визначити відповідні заходи безпеки.

Навчання з лазерної безпеки:

Весь персонал, який бере участь в операціях лазерного наплавлення, повинен пройти комплексне навчання з лазерної безпеки. Програма навчання повинна охоплювати небезпеки, пов'язані з лазером, протоколи безпеки, аварійні процедури та правильне використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Навчання повинно відповідати міжнародним стандартам, таким як ANSI Z136.1 щодо безпечного використання лазерів.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

Для забезпечення безпеки персоналу під час операцій лазерного наплавлення необхідно носити відповідні ЗІЗ. ЗІЗ повинні включати лазерні захисні окуляри або захисні окуляри, які забезпечують адекватний захист для конкретної довжини хвилі

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

лазера, що використовується. Вибір ЗІЗ повинен відповідати міжнародним стандартам, таким як ANSI Z136.1 та EN 207/208.

Контрольований доступ:

Доступ до зон лазерного наплавлення повинен бути обмежений тільки для уповноваженого персоналу. Впровадження заходів контрольованого доступу запобігає впливу лазерних променів на сторонніх осіб і зводить до мінімуму ризик нещасних випадків або травм. Обмеження на вхід повинні бути чітко позначені та доведені до відома всього персоналу.

Блокування та функції безпеки:

Лазерне обладнання повинно бути оснащене блокуваннями та захисними функціями для забезпечення безпечної роботи. Ці функції можуть включати захисні вимикачі, які деактивують лазерний промінь, коли корпус лазера відкривається, кнопки аварійної зупинки та захист шляху променя. При встановленні блокувань і засобів безпеки слід враховувати відповідність міжнародним стандартам, таким як IEC 60825-1 і IEC 60601-2-22.

Поводження з лазерним обладнанням:

Встановлення та налаштування:

Встановлення та налаштування лазерного обладнання повинні відповідати рекомендаціям виробника та міжнародним стандартам. Для забезпечення безпечної та ефективної роботи необхідно дотримуватися належних процедур заземлення, вентиляції та вирівнювання. Процедури встановлення повинен виконувати лише кваліфікований персонал.

Калібрування та обслуговування:

Регулярне калібрування і технічне обслуговування лазерного обладнання необхідні для безпечної і точної роботи. Це включає перевірку вирівнювання, перевірку вихідної потужності та огляд компонентів. Дотримуйтесь рекомендацій виробника щодо інтервалів технічного обслуговування і ведіть докладні записи про

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

всі дії з технічного обслуговування. Калібрування має відповідати міжнародним стандартам, таким як ISO 9001 та ISO 17025.

Вирівнювання лазерного променя:

Правильне вирівнювання лазерного променя має вирішальне значення для безпечного та ефективного лазерного наплавлення. Регулярно перевіряйте та вирівнюйте траєкторію лазерного променя, використовуючи відповідні інструменти та методи вирівнювання. Дотримуйтеся інструкцій виробника і при необхідності проконсультуйтеся з експертами. При виконанні процедур вирівнювання променя слід враховувати відповідність міжнародним стандартам, таким як ISO 11146 та ISO 13694.

Аварійні процедури:

Встановіть чіткі та ефективні аварійні процедури для швидкого реагування на потенційні аварії або несправності. Весь задіяний персонал повинен бути ознайомлений з процедурами аварійного вимкнення, шляхами евакуації та розташуванням аварійного обладнання, такого як вогнегасники та аптечки першої допомоги. Аварійні процедури повинні відповідати міжнародним стандартам, таким як ISO 13485 та ISO 14971.

4.2 Електробезпека

1) Лазерний технологічний комплекс знаходиться в приміщенні без підвищеної небезпеки тобто в незапиленому сухому приміщенні.

2) Верстатне устаткування підключається до електричної мережі трифазного змінного струму, напругою 380 В з частотою 50 Гц та з заземленням.

Для правильної і безпечної роботи на цьому лазерному технологічному комплексі передбачений комплекс заходів щодо забезпечення електробезпеки.

Обслуговування лазерної установки, проводиться робітниками, що пройшли інструктаж з техніки безпеки поводження з установками з високою електричною

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

напругою ($U > 1000$ В), згідно з інструкціями ГОСТ 12.2.007.0-75. В аварійному режимі електробезпека забезпечується поєднанням відключення та захисту від нуля. Приміщення, в якому розташована лазерна система, має діелектричні рукавички та гумові килимки ГОСТ 4997-75, медичний комплект, плакати попередження.

Забезпечено недоступність частин які проводять струм за ГОСТ 12.2.009-80. Розташування електромережі на великій висоті (більш ніж 2,2 м), наявність обмежень у вигляді огорож, ховаючих дроти і вимикачі, подвійна ізоляція (яка складається з робочої і допоміжної). Наявність запобіжників, що оберігають людей від ураженням напруги, використання (якщо можливо) низької напруги (до 36 В).

4.3 Освітлення приміщення

Під час роботи з лазерною установкою використовується яскраве освітлення приміщення, яке досягає не менше 150 люкс. Освітлення складається з природного світла та штучних джерел. Люмінесцентні лампи низького тиску (тип РВ) встановлені на стелі приміщення, яке має висоту 6 метрів, згідно з вимогами СНіП П-4-79.

Устаткування та стіни приміщення фарбуються у світлі відтінки, що допомагає розподілити світло рівномірно по всьому полі зору. Під час лазерної обробки використовуються багато вимірювальних приладів та виконуються тривалі роботи третього розряду, для яких необхідна освітленість 310 лм згідно зі СНіП П-4-79.

Робоче місце, зокрема пульт управління, освітлюється люмінесцентними лампами низького тиску. На робочих поверхнях немає різких тіней, що можуть спотворити форму та розміри предметів та стомити очі. Робочі частини машини виготовлені з матових кольорів чавуну або сталі, які поглинають світло, а інші частини обладнання мають матово-зелений або сірий колір. Навколо робочого

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

місця немає блискучості від прямих або відбитих джерел світла. Освітлення приміщення максимально наближене до природного освітлення.

4.4 Виробнича санітарія

У приміщенні, де проводиться робота з лазерною установкою, не допускається надлишкове тепло. Проблемами, які можуть виникнути в зв'язку з метеоумовами та хімічним складом повітря, є:

Потрапляння технологічних газів з балонів газової станції ЛВК до приміщення.

Забруднення повітря робочої зони продуктами згоряння присадочного матеріалу внаслідок збоїв у роботі витяжних пристроїв.

Протікання запірних вентилів або негерметичність магістралей, через що можуть надходити гази з балонів.

Під час лазерної обробки використовуються речовини, такі як бензин, метиловий спирт, ацетон, які відносяться до помірковано небезпечних речовин 3-го класу. Для цих речовин гранично припустима концентрація (ПДК) становить від 1,0 до 10,0 мг/м³ згідно з ГОСТ 12.1.005-88/98.

Для забезпечення виробничої санітарії рекомендуються такі заходи:

Встановлення загальних витяжок, розташованих під стелею технологічної зони, для запобігання потраплянню технологічних газів у приміщення. Регулярна перевірка вентилів та газових магістралей, проведення профілактичних ремонтних робіт.

Використання світлової та звукової сигналізації на пульті управління газовою установкою для виявлення наявності газової суміші. Здійснення герметизації відповідних частин устаткування. Вентиляція та кондиціонування повітря здійснюються згідно з СНіП 2.04.05-84.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Заходи безпеки при експлуатації лазерного технологічного комплексу включають:

Обслуговування лазера відбувається відповідно до правил технічної експлуатації установок з елементами під електричною напругою понад 1000 В.

Монтаж, ремонт та налагодження лазера проводяться з дотриманням вимог правил техніки безпеки, прийнятих підприємством.

Експлуатація лазерного комплексу відбувається відповідно до відповідних нормативних документів.

Приміщення, де розташований лазер, оснащено протипожежним інвентарем, вуглекислотними вогнегасниками, ящиками з піском, попереджувальними плакатами, діелектричними рукавичками та медичною аптечкою.

Зона обробки деталей лазерним випромінюванням оснащена витяжною вентиляцією та захисними екранами або огороженнями, якщо це необхідно.

Транспортування лазерного випромінювання здійснюється по закритому світловоду.

Балони зі стисненим газом встановлюються на безпечній відстані від лазерного випромінювання і надійно закріплюються.

Ремонт, огляд, чищення та налагодження установки проводяться під час повної її зупинки і після відключення напруги.

У місцях обслуговування передбачені діелектричні килими.

Після перерви або завершення роботи електричний ланцюг установки вимикається, а вентиля редукторів робочих газів закриваються.

Робітники, що працюють з лазерним комплексом, проходять періодичний медичний огляд не рідше одного разу на рік.

Ці заходи допомагають забезпечити безпечність приміщення та персоналу, що працює з лазерним технологічним комплексом. Важливо дотримуватись цих вимог і забезпечувати регулярний технічний огляд та обслуговування обладнання, а також навчати персонал правилам безпеки при роботі з лазерами.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.5 Пожежна безпека

Щодо пожежної безпеки, в приміщенні з лазерним технологічним обладнанням встановлені наступні заходи:

Відсутність вибухонебезпечних речовин та горючих матеріалів, крім спеціального складу паливно-мастильних матеріалів. Для запобігання концентрації вибухонебезпечних газів і парів використовуються загальна та місцева витяжка.

Приміщення, де розміщено лазерне обладнання, відповідає категорії В за ОНТП 24-86 і відноситься до зони обладнання класу Р-Па, що відповідає твердим горючим речовинам. Конструкція приміщення відповідає четвертому ступеню горючості згідно з СНіП 2.01.02.-85 та ГОСТ 12.1.004-91.

Приміщення має цегляні перегородки товщиною 300 мм, які розділяють технологічну платформу від інших приміщень. Всі кімнати розташовані симетрично відносно центрального проходу, що сприяє одночасній евакуації людей.

У приміщенні є протипожежна сигналізація, а також засоби пожежогасіння, такі як пожежні гідранти, протипожежний водопровід, вогнегасники ОЧ-8, ОЧ-5 та ОЧ-100, а також автоматична система пожежогасіння.

Потенційними причинами виникнення пожежі можуть бути несправність електроустаткування та експлуатація пошкодженого технологічного обладнання.

Організаційні заходи для забезпечення пожежної безпеки включають правильну експлуатацію обладнання згідно з вимогами, підтримку належного стану приміщення, розміщення пожежних повідомлень, інструктаж персоналу з пожежної безпеки та установку димової сигналізації.

У приміщенні повинні бути доступні первинні засоби пожежогасіння, такі як вода, пісок, азбестове полотно, вогнегасники ОУ-8 (2 шт.). Також передбачені евакуаційні виходи з необхідною шириною дверей і коридорів, а вікна та двері відкриваються назовні або у напрямку евакуації.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У приміщенні має бути розміщена схема евакуації згідно з СНіП 2.09.02-85.

Висновки

Лазерне обладнання, що використовується для лазерного наплавлення, вимагає дотримання міжнародних стандартів і спеціальних елементів захисту для забезпечення безпеки. Дотримання стандартів класифікації лазерів, ретельне навчання, належне використання ЗІЗ, заходи контрольованого доступу, блокування та засоби безпеки, інструкції з встановлення та налаштування, процедури калібрування та обслуговування, протоколи вирівнювання лазерного променя та аварійні процедури мають важливе значення для безпечного проведення операцій лазерного наплавлення.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Під час дослідження пошкоджень поршнів двигунів були вивчені технології відновлення деталей, і були наведені описи цих процесів, разом з перевагами та недоліками. Один з методів, який був детально описаний, це лазерне газопорошкове наплавлення, і були визначені його ключові переваги порівняно з іншими методами відновлення. Основні переваги цього методу включають точність обробки, що дозволяє економити матеріали при відновленні деталей, що в свою чергу зменшує потребу в подальшій механічній обробці; зменшення зони термічного впливу на оброблювану деталь завдяки локальному характеру лазерного джерела; контрольована якість оброблюваної поверхні, яка регулюється розміром частинок порошку вихідного матеріалу; і, нарешті, менший загальний час технологічного процесу порівняно з альтернативними методами.

Також була розроблена схема технологічного процесу лазерного газопорошкового наплавлення, і була проведена розрахункова робота для оптичної складової системи випромінювача.

					МЛ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Trumpf. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.trumpf.com/en_INT/solutions/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition/
2. Lisiecki, A. Comparison of Titanium Metal Matrix Composite surface layers produced during laser gas nitriding of Ti6Al4V alloy by different types of lasers. Arch. Metall. Mater. 2016, 61, 1777–1783.
3. Lisiecki, A. Study of Optical Properties of Surface Layers Produced by Laser Surface Melting and Laser Surface Nitriding of Titanium Alloy. Materials 2019, 12, 3112.
4. Імпульсне лазерне наплавлення. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.laser-bulat.ru/technology/welding/deposit-welding/>
5. Dong-GyuAhn^a, Ho-JinLee^a, Jong-RaeCho^b, Dae-SeonGuk^a. (2016). Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850616300130>
6. Turichin G. A., Somonov V. V., Babkin K.D., Zemlyakov E. V. & Klimova O. G. (2016). High-Speed Direct Laser Deposition: Technology, Equipment and Materials. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/125/1/012009/pdf>
7. Theory and Technology of Direct Laser Deposition. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.intechopen.com/books/additive-manufacturing-of-high-performance-metals-and-alloys-modeling-and-optimization/theory-and-technology-of-direct-laser-deposition>
8. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., Zhang A. De, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 92. P. 112–224.

					МЛІ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

9. Основи проектування оптико-механічних вузлів: Методичні вказівки до практичних занять студентів спеціальності 131 Прикладна механіка освітньо-професійної програми Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки матеріалів / Уклад. Дубнюк В. Л. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 83 с.

10. Восстановление деталей сваркой и наплавкой. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://extxe.com/1837/vosstanovlenie-detalej-svarkoj-i-naplavkoj/#2>

11. Moskal, G.; Grabowski, A.; Lisiecki, A. Laser remelting of silicide coatings on Mo and TZM alloy. *Solid State Phenom.* 2015, 226, 121.

12. Grigor'ev, S.N., Tarasova, T.V. Possibilities of the Technology of Additive Production for Making Complex-Shape Parts and Depositing Functional Coatings from Metallic Powders. *Met Sci Heat Treat* 57, 579–584 (2016).

13. Fangjuan Qi, Peter. Staron, V. Ventzke, Effect of Local Laser Surfacing on the Fatigue Crack Propagation Rate of Al-alloy 6056 and its Laser Beam Weld, *Procedia Materials Science*, Volume 3, 2014, Pages 1834-1840.

14. K.F. Tam, F.T. Cheng, H.C. Man, Laser surfacing of brass with Ni–Cr–Al–Mo–Fe using various laser processing parameters, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 325, Issues 1–2, 2002, Pages 365-374.

15. Aksenov, A.G., Ermolaev, A.S., Muratov, K.R. et al. Laser Powder Surfacing of Gas-Turbine Components and Restoration of the Metal Powder. *Russ. Engin. Res.* 42, 860–862 (2022).

16. Pinkerton Andrew J., 2015. Advances in the modeling of laser direct metal deposition, *Journal of Laser Applications* 27, S15001, doi: 10.2351/1.4815992

17. Qunli Zhang, Mykola Anyakin, Ruslan Zhuk, Yi Pan, Volodymyr Kovalenko, Jianhua Yao, Application of Regression Designs for Simulation of Laser Cladding. *Physics Procedia* 2012;39:921-7

					МЛІ91000.00.000.ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Development of Multichannel Gas-powder Feeding System Coaxial with Laser Beam (with Q.Zhang, V.Kovalenko, J.Yao, X.Hu, R.Zhuk) Procedia CIRP 42 (2016) 62 – 66, Pages 96-100
19. European Patent EP 1620224 B1 (issued on Sep. 6, 2006) .
20. U.S. Patent Application Publication No. 2012/0199564 A1 (publ.date Aug. 9, 2012) .
21. PRC Patent CN 102899660 B (issued on Jul. 23, 2014).
22. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://en.maxphotonics.com>
23. ISO 11146-1:2005(E), “Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams”
24. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://www.rp-photonics.com/beam_parameter_product.html
25. [Електронний ресурс] Режим доступу: www.en.wikipedia.org/wiki/Numerical_aperture
26. Ready J. LIA Handbook on Laser Materials Processing. LIA, Magnolia Publishing, Inc.: 2001. 715p
27. Keng H Leong, Aravinda Kar Evolving Laser Processing Applications //“Proceedings of International Congress “ICALEO’2003”, Jacksonville, USA, Oct. 2003, LIA
28. Kogelnik H. Li T. //Proc. of the IEEE. - 1966. -Vol. 54.-P. 1312-1329
29. Jacques Auiaud. Representation of Gaussian beams by complex rays // Applied Opt. - 1985. -Vol. 24.-P. 538-543
30. [Електронний ресурс] Режим доступу: www.edmundoptic.com
31. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://eksmaoptics.com>
32. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://refractiveindex.info>