

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

Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ І.В. Кривцун
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2021 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.050502 Інженерна механіка
(код і назва)

на тему: Високоєфективні технології виготовлення біметалів різного функціонального призначення з застосуванням комбінованих лазерних процесів

Виконав: студент 4 курсу, групи МЛ-71
(шифр групи)

Юрченко Юрій Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник доц. каф. ЛТФТ, к.т.н. Блощин М.С.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент к.т.н., доц Мінаков С.М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2021 року

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: **Високоефективні технології виготовлення біметалів різного функціонального призначення з застосуванням комбінованих лазерних процесів**

Київ – 2021 року

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

Інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона

Кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Рівень вищої освіти – **перший (бакалаврський)**

Напрямок підготовки **6.050502 Інженерна механіка**
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЛТФТ

_____ І.В. Кривцун
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Юрченку Юрію Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту **Високоєфективні технології виготовлення біметалів різного функціонального призначення з застосуванням комбінованих лазерних процесів,**

керівник проекту **Блощин Михайло Сергійович, к.т.н.**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 11 червня 2021р.

3. Вихідні дані до проекту:

1. Креслення лопатки ГТД;
2. Матеріал основи ЖС6Ф;
3. Матеріал проміжного шару: бронза Бр.ОЦ10-1 та ЕП648-ВИ товщинами 0,5 мм;
4. Підплавлення основного матеріалу 0,05 мм;
5. Забезпечити металургійний зв'язок між шарами наплавлення;

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Модернізація технологічного процесу виготовлення
2. Проектування лазерно-індукційної системи, для відновлення лопаток ГТД;
3. Розробка комбінованої технології виготовлення біметалевих поверхонь на заданих деталях;
4. Розробка елементів комбінованої лазерної системи для реалізації виготовлення біметалевих поверхонь;
5. Охорона праці та навколишнього середовища.

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

1. Лист: Лист А2 креслення Лопатка ГТД; Плакат класифікація біметалів;
2. Лист: Технологічний лист
3. Лист: Комбінована лазерна фокусуюча система (5 та 6);
4. Лист: Плакат Лопатки ГТД;
5. Лист: Плакат промисловий робот з шарнірним маніпулятором RV-13FRM;
6. Лист: Плакат живильники/дозатори порошку та дроту для наплавки;

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Технологічний</i>	доц. Блощин М.С.		
<i>Конструкторський</i>	доц. Блощин М.С.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	<i>Підготовка матеріалів до проекту</i>	<i>01.05.21 – 10.05.21</i>	
2	<i>Підготовка ескізів графічної частини проекту</i>	<i>10.05.21 – 17.05.21</i>	
3	<i>Проектування креслень конструкторської частини проекту</i>	<i>17.05.21 – 12.06.21.</i>	
4	<i>Розробка розділу по охороні праці та навколишнього середовища</i>	<i>10.05.21 – 11.05.21</i>	
5	<i>Розробка та оформлення пояснювальної записки</i>	<i>17.05.21 – 11.06.21.</i>	

Студент

(підпис)

Ю.В Юрченко

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

М.С. Блощин

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Особливістю лазерного наплавлення, з поміж інших є те, що на поверхню деталі наплавляється шар іншого матеріалу або сплаву, що у даних умовах експлуатації значно підвищує час роботи деталі. Як правило ці сплави дорогі й виготовлення із цих матеріалів всієї деталі економічно не вигідно, тому, що при експлуатації зношується лише робоча поверхня деталі, а всі інші поверхні не піддаються зношуванню, доцільно застосовувати лазерне наплавлення тільки на окремих ділянках поверхні деталі, а всю деталь робити з менш дорогого матеріалу.

Метою даної роботи є розробка конструкції комбінованого лазерного - індукційного технологічного комплексу для поверхневої обробки деталей, тобто, наплавлення.

Застосування комбінованого лазерно-індукційного технологічного комплексу розглянуто на процесі наплавлення Бр.ОЦС10-1 та ЭП648-ВИ на край лопатки ТВД, виготовленого ЖС6Ф, з метою його відновлення.

Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновку, переліку використаних джерел із 32 найменувань, 4 тези. Загальний обсяг роботи становить 117 сторінок основного тексту, 47 рисунків, 13 таблиць, 6 графіків.

Графічна частина дипломного проекту включає 5 кресленків формату А1, що містять загальну інформацію щодо процесу наплавлення, загальний вигляд деталі, на яку буде наплавлятися матеріал, креслення системи фокусування.

ABSTRACT

The peculiarity of laser surfacing, among others, is that a layer of another material or alloy is deposited on the surface of the part, which in these operating conditions significantly increases the operating time of the part. As a rule, these alloys are expensive and the manufacture of these materials of the whole part is not economically viable, because during operation only the working surface of the part wears out, and all other surfaces are not subject to wear, it is advisable to use laser surfacing only on certain parts of the surface. of less expensive material.

The purpose of this work is to develop a design of a combined laser - induction technological complex for surface treatment of parts, ie, surfacing.

The use of the combined laser-induction technological complex is considered in the process of surfacing Бр.ОІС10-1 and ЭП648-ВІІ on the edge of the blade of the turbojet engine, made ЖС6Φ, in order to restore it.

The explanatory note consists of an introduction, 4 sections, a conclusion, a list of used sources of 32 items, 4 abstracts. The total volume of the work is 117 pages of the main text, 47 figures, 13 tables, 6 graphs.

The graphic part of the diploma project includes 5 drawings of A1 format, containing general information about the surfacing process, a general view of the part on which the material will be surfaced, drawings of the focusing system.

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	4
1.1 Аналіз виготовлення сучасних лопаток ГТД.....	4
1.2 Особливості існуючого технологічного процесу виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД.....	9
1.3 Сучасний стан рівня якості виробництва заготовок робочих лопаток турбіни ГТД.....	17
1.4 Вимоги до точності і якості поверхневого шару заготовок робочих лопаток турбіни при адаптивному формоутворенні.....	20
1.5 Розробка автоматизованого алгоритму просторового розподілу припуску по профілю пера в заготовках лопаток турбіни.....	24
1.6 Метод зварювання вибухом.....	29
1.7 Метод спільної гарячої пакетної прокатки.....	30
1.8 Метод електрошлакової наплавки	32
1.9 Метод дугового наплавлення в захисних газах.....	34
1.10 Метод дугового наплавлення покритим електродом.....	36
1.11 Метод плазмового наплавлення.....	37
1.11.1 Плазмо-порошкове наплавлення.....	38
1.12 Метод лазерного наплавлення.....	43
1.13 Лазерне газопорошкове наплавлення.....	45
1.14 Технологічний процес лазерного наплавлення.....	49
1.14.1 Порошковий матеріал для наплавлення.....	49
1.14.2 Технологічні схеми наплавлення.....	50
1.14.3 Вплив технологічних параметрів лазерного наплавлення на розмірні характеристики й структурно-фазовий стан наплавлених шарів.....	55

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ			
					Високоєфективні технології виготовлення біметалів різного технологічного призначення з застосуванням комбінованих лазерних процесів	Лист.	Діагн.	Архивація
Виробил		Юрченко Ю.В.						
Перевірл		Блощинин М.С.						
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ІМЗ			

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ.....	65
2.1 Розрахунок режимів обробки.....	65
2.2 Визначення витрати дозатора	71
2.3 Системи подавання матеріалу, що наплавляється	75
2.3.1 Живильники-дозатори порошкових матеріалів.....	75
2.3.2 Порошкові живильники-дозатори безперервної дії.....	76
2.3.3 Вибір технологічної схеми обробки.....	80
2.4 Промисловий робот з шарнірним маніпулятором.....	82
2.4.1 Опис маніпулятора та його функцій.....	82
2.4.2 Розробка конструкції обертання роботизованої системи.....	86
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	89
3.1 Структурна схема лазерно-індукційної експериментальної установки...	89
3.2 Розробка конструкції лазерного технологічного обладнання.....	91
3.2.1 Вимірювач потужності.....	91
3.2.2 Переривач лазерного випромінювання.....	94
3.2.3 Юстирувальний пристрій.....	97
3.2.4 Система фокусування лазерного випромінювання.....	98
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	108
4.1 Загальні вимоги безпеки при роботі з лазерними установками.....	108
4.2 Небезпечні й шкідливі виробничі фактори.....	109
4.3 Освітлення.....	111
4.4 Електробезпека.....	111
4.5 Захист персоналу від дії лазерного випромінювання.....	112
4.6 Протипожежні заходи.....	114
4.7 Заходи щодо забезпечення лазерної безпеки.....	115
ВИСНОВКИ.....	118
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	119

ВСТУП

Біметал – це матеріал , який зазвичай складається з двох або більше видів металів або сплавів. Основною метою створення біметалів – це створення нових типів матеріалів, в яких будуть поєднуватись властивості металів або сплавів, які входять в його склад для ефективного його використання в різних галузях господарства і промисловості. Також використання біметалів має певний позитивний економічний ефект, так як дорогі і дефіцитні метали або сплави можуть замінюватись дешевшими біметалами із аналогічними властивостями.

В електроніці і радіотехнічній промисловості біметали використовують замість дефіцитних та дорогих матеріалів - хороших провідників струму, це пов'язано з тим, що густина струму найбільша в зовнішніх шарах матеріалу і зменшується в сторону середини провідника, з цього випливає доцільні використання матеріалів для провідника де буде зовнішній шар із великою електропровідністю (мідь, золото, срібло) , а внутрішні шари можуть бути виготовлені із дешевших матеріалів (алюміній , сталь) із значно гіршою електропровідністю. На різності коефіцієнтів теплового розширення матеріалів біметалу, ґрунтується його широке використання в приладобудуванні.

Також, широко застосовуються в машинобудуванні деталі із біметалів, наприклад, біметалічні підшипники тертя , де безпосередню участь у терті бере дорогий сплав бронзи , поміщений в сталеву більш дешеву обойму, компресійні кільця двигунів внутрішнього згорання із нанесеним гальванічним способом нікелевим покриттям , яке зменшує тертя при роботі двигуна.

Для сільського господарства виготовляються біметалічні лемехи плугів із наплавленим зносостійким шаром. Відомі також археологічні знахідки із наплавленими рукоятками на мечях. Металеві пластини в біметалі зчеплюються на молекулярному і міжатомного зв'язку.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Через широкий асортимент використання біметалів, набуває актуальності питання пошуку нових способів виготовлення біметалів, задля задоволення потреб промисловості із значним позитивним економічним ефектом.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1. Технологічний розділ

1.1 Аналіз виготовлення сучасних лопаток ГТД

На сьогоднішній день одним з найважливіших завдань авиадвигателестроения є підвищення надійності газотурбінних двигунів. Так як надійність ГТД, в тому числі, забезпечується технологічними методами, то основні зусилля повинні бути спрямовані на вдосконалення виробничих процесів виготовлення основних деталей двигуна. Перш за все, це стосується технологій виготовлення деталей робочого тракту, таких як лопатки турбіни, так як вони є найбільш відповідальними деталями в двигуні, максимально навантаженими і визначальними ресурс роботи двигуна. Лопатки турбіни характеризуються складною просторовою формою, високими вимогами до точності геометричних параметрів і якості поверхневого шару.

Вартість виготовлення комплекту лопаток становить від 20 до 35% загальної вартості двигуна, а трудомісткість їх виготовлення може досягати 20-30% загальної трудомісткості виготовлення двигуна. Виробництво лопаток ГТД викликає певні технологічні труднощі, пов'язані з високими вимогами до точності складної просторової поверхні пера і геометричні розміри хвостової частини, не кажучи про погану оброблюваності жароміцних матеріалів, які використовують для їх виготовлення.

Технологія отримання заготовок робочих лопаток турбіни ГТД і їх подальша механічна обробка вимагають застосування дорогого спеціалізованого обладнання, унікального оснащення і контрольно-вимірювальних засобів. Тому конструкція лопаток повинна бути технологічною, що забезпечує максимальне застосування існуючого технологічного обладнання, а також можливість механізації і автоматизації процесів механічної обробки, різко скорочує обсяг ручних полірувальних доводочних робіт (суб'єктивного фактора). Це стабілізує технологічний процес і підвищує якість готової продукції [23].

В даний час розвиток сучасного авіаційного двигунобудування немислимо без безперервного підвищення тяги двигуна і, як наслідок,

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

збільшення ККД двигуна, що супроводжується підвищенням температури газового потоку перед турбіною. Одним із способів збільшення температури робочого газу перед турбіною є вдосконалення технології виготовлення робочих лопаток турбіни (рис. 1.1).

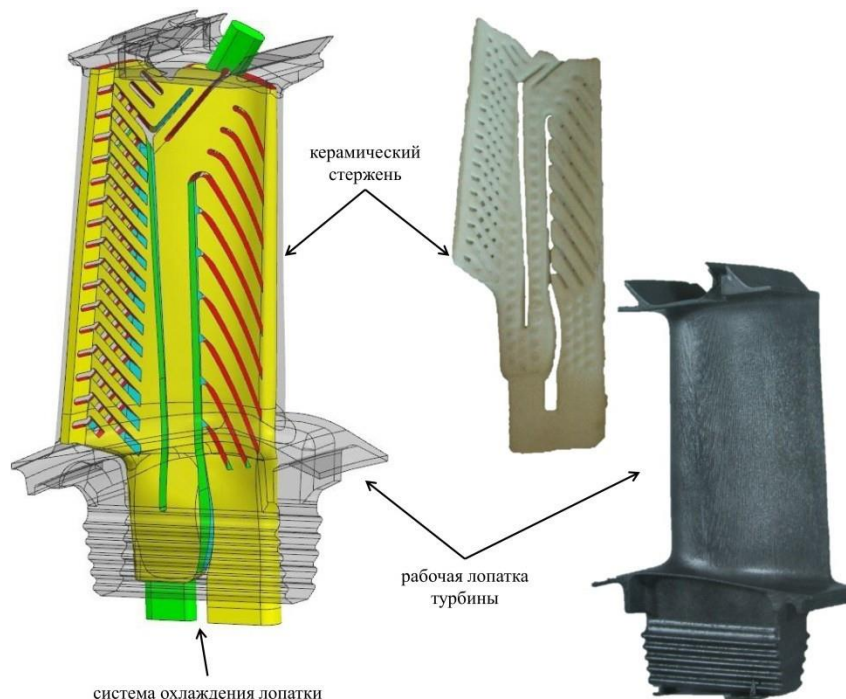


Рисунок 1.1 - Робоча лопатка турбіни ГТД з керамічним стержнем

Розвиток технологічних методів виготовлення робочих лопаток турбін в 50-х роках здійснювалося за двома напрямками. Перший напрямок характеризувався систематизацією та узагальненням великого досвіду, що накопичується двигунобудівними заводами.

Проведений аналіз питання виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД з монокристалічної структурою дозволив виявити ряд «вузьких місць», основним з яких, є недостатнє використання систем комп'ютерного моделювання при технологічній підготовці заготівельного виробництва. Як зазначалося, рівень сучасних світових тенденцій постійно підвищується і зараз проектування виробничих технологій здійснюється відповідно до концепції «Індустрія 3.0», суть якої полягає в наскрізною цифровою підтримки всього життєвого циклу виробу (ЖЦВ). В існуючому ж виробництві слабо

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

реалізована комп'ютерна підтримка етапу розробки та апробації технології виготовлення робочих лопаток турбіни. Дана обставина, в тому числі, є причиною великого відсотка браку в лопатках з поздовжньо-орієнтованою структурою (близько 40%) і в лопатках з монокристаллической структурою (близько 60%), так як відпрацювання технології проводиться за рахунок проведення ряду натурних експериментів методом проб і помилок, що призводить до значних перевитрат дорогих матеріалів і енергоресурсів, підвищення трудомісткості виготовлення лопаток і зниження гнучкості технологічних процесів.

Відповідно до концепції «Індустрія 3.0» виникає потреба у створенні наскрізної цифрової моделі двигуна і технології його виготовлення (рис. 1.2).

Рис. 1.2 ілюструє моделеорієнтований підхід при підготовці виробництва. Створюються приватні цифрові моделі-двійники всіх технологічних процесів, що становлять життєвий цикл виробу в двигуні: проектується 3D-модель деталі, розробляється цифровий технологічний процес її виготовлення, проводяться цифрові газодинамічні дослідження спроектованої деталі, створюється електронний документообіг (безпаперові технології). Таким чином, всі процеси, що відбуваються на стадії проектування двигуна і його подальшої експлуатації, необхідно оцифровувати, тобто паралельно протіканню етапу реального ЖЦВ необхідно проводити етап цифрового проектування.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

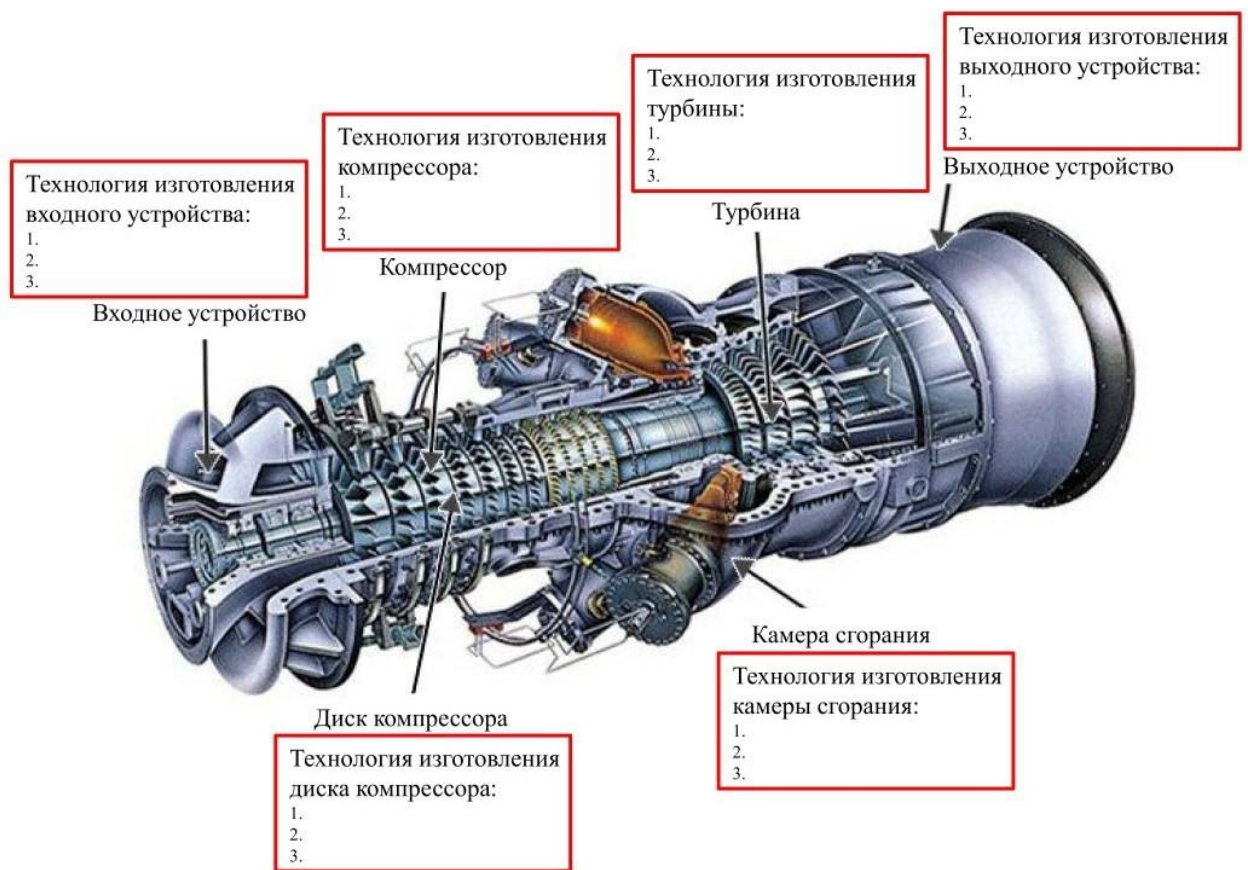


Рисунок 1.2 – Цифровая модель ГТД і збільшене технологія його виготовлення відповідно до концепції «Індустрія 3.0»

Ключові елементи цифрового двійника ланцюжка виготовлення лопатки представлені на рис. 1.3. Особлива увага в даній роботі на прикладі виготовлення робочої лопатки турбіни ГТД I-го ступеня двигуна НК-32 було приділено розробці універсальних підходів і алгоритмів проектування цифрових моделей технологічного процесу виготовлення безпріпускових за профілем пера лопаток, одержуваних методом монокристалічного литва в ливарної установки. Необхідно відзначити, що існуюча технологія виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД складається з двох технологічних циклів: 1-й цикл включає в себе виготовлення відливок робочих лопаток і підготовку технологічних баз для подальшої механічної обробки замку лопатки шляхом полірування профілю пера; 2-й цикл - механічну обробку замкової частини лопатки.

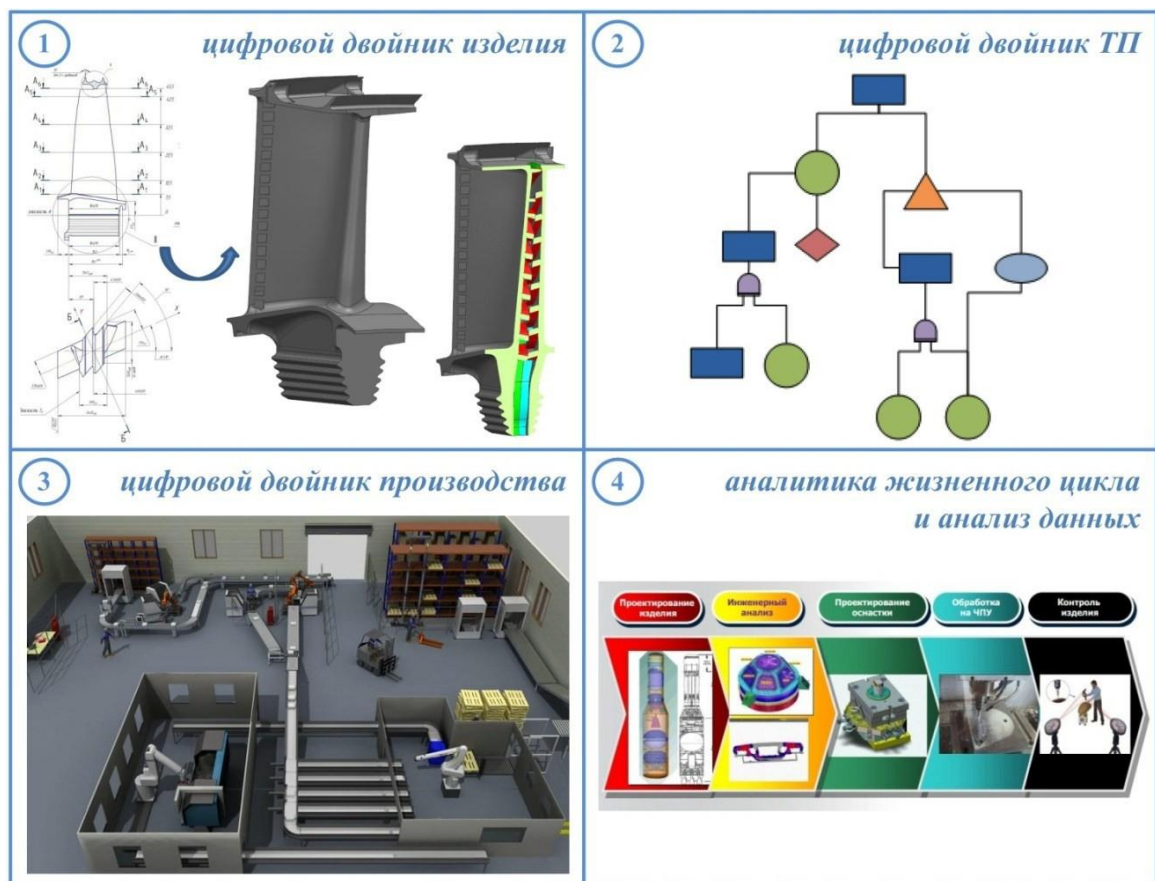


Рисунок 1.3 - Ключові елементи цифрового двійника ланцюжка створення виробу відповідно до концепції «Індустрія 3.0»

Резюмуючи, необхідно сказати, що складність технології виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД, її багатофакторність і висока собівартість диктують впровадження етапу комп'ютерного моделювання при технологічній підготовці виробництва на основі обґрунтованого вибору раціональних параметрів ТП і використання методів і засобів чисельного експерименту. Це повністю відповідає концепції «Індустрія 3.0». Розробка і використання цифрового двійника існуючого технологічного процесу виготовлення робочих лопаток турбіни, його верифікація і апробація в дослідному виробництві дозволить в найкоротші терміни і з мінімальними затратами виявити причини виникнення дефектів і розробити комплекс заходів та рекомендацій, спрямованих на їх усунення.

1.2 Особливості існуючого технологічного процесу виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД

Сучасні газотурбінні двигуни мають величезну номенклатуру деталей і складальних одиниць, однак, на сьогоднішній день охолоджувані лопатки турбіни не має аналогів за складністю навантаження і відповідальності при роботі. У зв'язку з цим, створення жароміцних нікелевих сплавів як основного матеріалу для лиття лопаток сучасних перспективних ВМД і розробка методу точного (беспріпускового) лиття вивів авіаційну техніку на новий рівень [24, 25]. В даний час технологія беспріпускового лиття виливків деталей робочого тракту ГТД з монокристаллической структурою - найважливіше технологічне досягнення в багато-виробництві при виготовленні деталей складної просторово-орієнтованої форми [26, 27, 28].

Технологія виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД займає першорядне місце в сучасному двигунобудування. Це обумовлено такими специфічними особливостями виготовлення лопаток:

1. Надмірно відповідальним призначенням лопаток в двигуні. Надійність, безвідмовність і ресурс роботи газотурбінного двигуна у вирішальній мірі визначається працездатністю лопаток. Таким чином, технологія виготовлення лопаток і наступна операція контролю геометричних параметрів готової лопатки повинні забезпечувати стабільність якості їх виготовлення і повністю виключати можливість установки в двигуні лопаток з відхиленнями розмірів трактовою і замкової частини, незадовільною якістю поверхневого шару, ливарні і іншими видами дефектів.

2. Складною просторової геометричною формою лопатки і високими вимогами по точності виготовлення. Трактова поверхню лопатки являє собою лопату змінного перерізу, обмежену з боку корита і спинки поверхнею складної форми, точно орієнтовану в просторі по відношенню до замку лопатки. Допуски на виготовлення пера лопатки складають $-0,05 \text{ мм.} \dots +0,15 \text{ мм}$, замкову ж частина виготовляють з точністю $0,01-0,02 \text{ мм}$.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. Серійним і масовим характером виготовлення лопаток. Сучасні газотурбінні двигуни налічують понад 2000 лопаток, тому навіть при виготовленні експериментальних і дослідних партій лопаток виробництво носить серійний характер.

4. Використанням при виготовленні лопаток дорогого і жароміцного матеріалу. У зв'язку з цим технологічний процес виготовлення лопаток повинен бути побудований на принципах «бережливого виробництва», гарантуючи мінімальний відсоток браку і забезпечуючи безвідходне або маловідхідне виробництво.

5. Поганий оброблюваністю використовуваного матеріалу при механічній обробці. Робочі лопатки турбіни ГТД виготовляються з жароміцних і жаростійких сплавів на нікелевій основі, що характеризуються відносною високою стійкістю та міцністю. Необхідно відзначити, що стійкість різального інструменту поки що не відповідає вимогам масового виробництва лопаток турбіни [29].

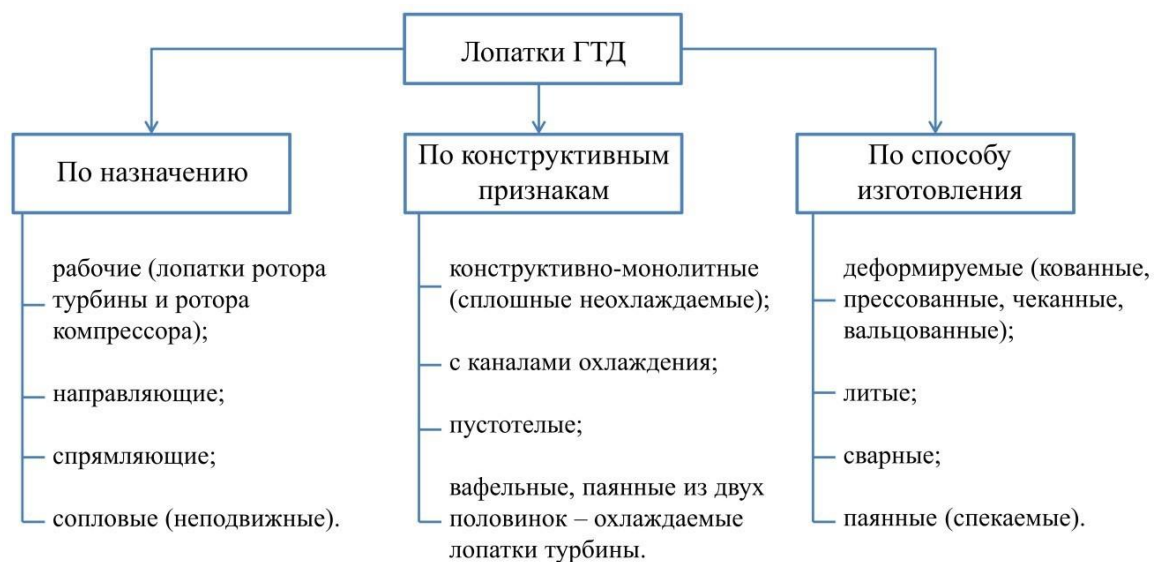


Рисунок 1.4 – Класифікація лопаток ГТД

У зв'язку з практично повним використанням деформуються сплавами запасу жароміцності, в кінці XX століття почали щось робити перші спроби по розробці нових ливарних жароміцних сплавів.

До того ж підвищені вимоги і настільки відповідальне призначення лопаток стали передумовою до розробки нових ливарних сплавів, що дозволяють лопаток працювати в агресивних середовищах з температурами, на 200-300 °С перевищують температуру плавлення матеріалу лопаток.

Матеріали для виготовлення лопаток турбіни ГТД повинні володіти високим опором повзучості, втоми, високотемпературної газової корозії, ерозійного руйнування; у своєму розпорядженні достатньої жароміцністю і пластичністю; бути малочутливими до надрізів (концентраторів напружень). У той же час вони повинні володіти певними технологічними властивостями: оброблюваністю різанням; свариваємостью; хорошими ливарними властивостями [30].

Турбінні лопатки на сьогоднішній день виготовляють з жароміцних сплавів на нікель-хромової і нікель-хром-кобальтової основі, легованих Ti, Al, Mo, W, Nb, Zr, B, V, Y, Hf, La, Re, Ta і іншими елементами . В даний час ливарні сплави на нікелевої основі більш жаростійкі і жароміцні, ніж деформуються.

У промисловому виробництві лопаток турбіни знайшли застосування наступні жароміцні сплави: ЖС-6К, ЖС-6У, ЖС-6Ф, ЖС-30, ЖС-6КВИ, ЖС-6УВИ, ЖС-6ФВИ, ЖС-30ВИ, ВЖЛ-12Э (рис. 1.5) . Властивості даних сплавів і зміст легуючих елементів представлені в табл. 1.1.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Вміст елементів, %	Марка сплаву								
	ЖС6К	ЖС6У	ЖС6Ф	ЖС-30	ЖС6-КВИ	ЖС-6УВИ	ЖС-6ФВИ	ЖС-30ВИ	ВЖЛ-12Э
C	0,13–0,20	0,13–0,20	–	0,11–0,20	0,13–0,20	0,13–0,20	0,12–0,19	0,11–0,20	0,12–0,20
Si	≤0,4	≤0,4	≤0,3	≤0,4	≤0,4	≤0,4	≤0,4	≤0,4	≤0,4
Mn	≤0,4	≤0,4	≤0,3	≤0,4	≤0,4	≤0,4	≤0,4	≤0,4	≤0,4
Cr	9,5–12,0	8,0–9,5	–	5,0–9,0	9,5–12,0	8,0–9,5	4,0–7,0	5,0–9,0	8,5–10,0
Ni	основний	основний	основний	основний	основний	основний	основний	основний	основний
Mo	3,5–4,8	1,2–2,4	–	0,4–1,0	3,5–4,8	1,2–2,4	0,8–1,5	0,4–1,0	2,7–3,4
W	4,5–5,5	9,5–11,0	–	11,0–12,6	4,5–5,5	9,5–11,0	11,0–13,0	11,0–12,6	1,0–1,8
Al	5,0–6,0	5,1–6,0	–	4,8–5,8	5,0–6,0	5,1–6,0	5,1–6,0	4,8–5,8	5,0–5,7
Ti	2,5–3,2	2,0–2,9	–	1,4–2,8	2,5–3,2	2,0–2,9	0,8–1,5	1,4–2,8	4,2–4,7
Co	4,0–5,5	9,0–10,5	–	7,5–9,5	4,0–5,5	9,0–10,5	6,0–10,5	7,5–9,5	8,0–10,5
Fe	≤2,0	≤1,0	≤1,0	≤1,0	≤2,0	≤1,0	≤1,0	≤1,0	≤2,0
Nb	–	0,8÷1,2	–	–	–	–	1,2–1,7	0,4–1,4	–
V	–	–	–	–	–	–	0,8–1,2	–	0,5–1,0
B	≤0,02	≤0,05	≤0,015	–	–	–	≤0,15	≤0,02	–
Ce	≤0,015	≤0,02	≤0,025	–	–	–	≤0,03	≤0,015	–
I	–	≤0,15	≤0,01	–	–	–	≤0,01	≤0,03	–
Zr	–	≤0,08	≤0,02	–	–	–	≤0,1	≤0,02	–
S	≤0,015	≤0,10	≤0,01	–	≤0,015	–	≤0,01	≤0,01	≤0,015
P	≤0,015	≤0,15	≤0,015	–	≤0,015	–	≤0,015	≤0,015	≤0,015
Hf	–	–	1,0–1,5	0,3–1,2	–	–	1,0–1,5	0,3–1,2	–
Ca	ОСТ 190126-85	ОСТ 190126-85 ТУ1-92-277-91	–	–	–	–	≤0,01 ТУ 1-92-45-85	≤0,05	–

Таблиця 1. Властивості сплавів та вміст легуючих елементів

На сьогоднішній день лопатки турбіни виготовляють з ливарних жароміцних сплавів методом монокристалічного лиття (в оболонкові керамічні форми). Даний метод лиття при серійному і масовому виробництві дозволяє найбільш економічно отримувати заготовки робочих і соплових турбінних лопаток з необхідною за кресленням шорсткістю і точністю траєкторних поверхонь, котрі мають потреби в подальшій механічній обробці. Завдяки даним фактом можна говорити про безприпусковому (точному) литті лопаток турбіни ГТД.

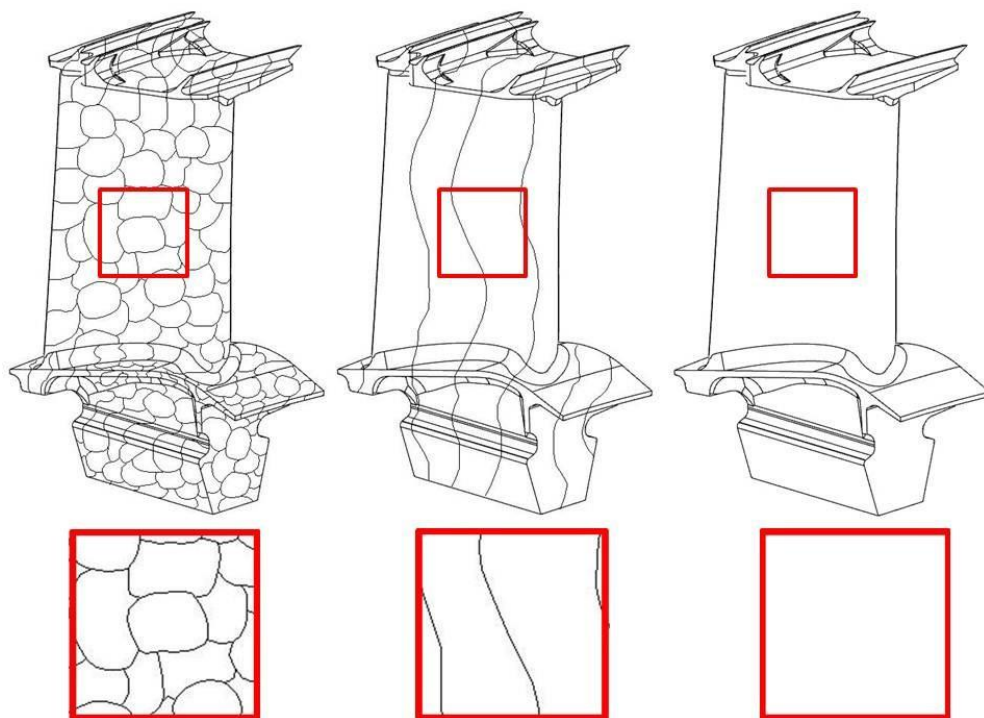
При великосерійному і масовому виробництві лопаток турбіни найбільш економічними в порівнянні з штампованими є ливарні технології виробництва. При вакуумній плавці-заливці в оболонкові форми наступні технологічні відходи металу у вигляді елементів ливникової системи, випарів, і ін. Не окислюються, тобто є поворотними, і їх можна повторно використовувати при наступних плавках. Це істотно знижує витрату дорогого металу. Таким чином, собівартість виготовлення лопатки турбіни методом лиття в оболонкові форми знижується на 50-60%. Заготовки лопаток турбіни, отримані методами гарячого об'ємного деформування, при інших рівних умовах є менш ефективними в порівнянні з литими заготовками. Пов'язано це, в першу чергу, з тим, що метал у вигляді облоя, який видаляється після штампування, є безповоротним і здається за ціною металобрухту.

Заготовки лопаток, отримані литтям, розрізняють на: звичайні, з полікристалічної або рівновісною структурою; з спрямованою кристалізацією (СК) і монокристалічні (рис. 1.6) [31, 32].

На рис. 1.6 а представлена структура нікелевого сплаву після проведення процедури травлення лопатки. Можна помітити чіткий поділ структури на області певної форми - рівновісні зерна.

В процесі експлуатації лопаток газотурбінного двигуна основні навантаження спрямовані уздовж пера лопатки, тому міцнішою є структура лопатки, в якій всі межі зерен збудовані по її осі (рис. 1.6 б).

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



a - рівновісна структура; *б* - структура, що отримується при литті з СК;
в - монокристалічна структура

Рисунок 1.6 - Морфології лопаток турбіни ГТД

Найбільш міцною є лопатки, в структурі яких повністю відсутні кордону зерен (рис. 1.6 в). Подібний монокристал отримують методом при використанні спеціальних технологічних рішень: кристаловідбірника або затравки.

Укрупнений типовий технологічний процес виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД представлений на рис. 1.7.

Використання методу монокристалічного литва в технології виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД повністю виключає з виливків турбінних лопаток поперечні кордону зерен, тим самим підвищуючи механічні характеристики жароміцних сплавів. Монокристалічна структура зерен виливки купується в процесі проходження оболонкової форми з розплавленим металом фронту кристалізації, який строго контролюється шляхом створення поздовжнього і поперечного градієнта температур [25, 30].

Наявність же областей з поперечними межами зерен вкрай небажано, тому як ці області є концентраторами напружень.



Рисунок 1.7 - Укрупнений типовий технологічний процес виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД методом лиття з СК в оболонкові форми

Лопатки, виготовлені за технологією монокристалічного лиття, характеризуються більш високою тривалою міцністю в процесі експлуатації двигуна, а ресурс роботи лопаток в 2-3 рази вище в порівнянні з лопатками з полікристалічною рівновісною структурою.

В даний час у вітчизняному двигунобудуванні застосовують два варіанти технології спрямованої кристалізації: низько- і високоградієнтним (високошвидкісна) спрямована кристалізація.

Для реалізації методу спрямованої кристалізації в виробничих умовах створені спеціальні вакуумні установки типу УВНК-8П, ПМП-2, ПМП-4, УППФ-3М, ВІП-НК, а також запропоновані різні модифікації подібних установок.

Технологічні можливості заготівельного виробництва не завжди забезпечують високий рівень виходу придатних заготовок лопаток турбіни в силу появи великої кількості ливарних дефектів різного походження. Причиною цього може бути вплив різних технологічних параметрів на технологічний процес. Наприклад, при литті заготовок з використанням установки ПМП-2 неруйнуючі методи контролю виявляли неспай, плени, рихлоти, тріщини, порушення структури та інше.

1.3 Сучасний стан рівня якості виробництва заготовок робочих лопаток турбіни ГТД

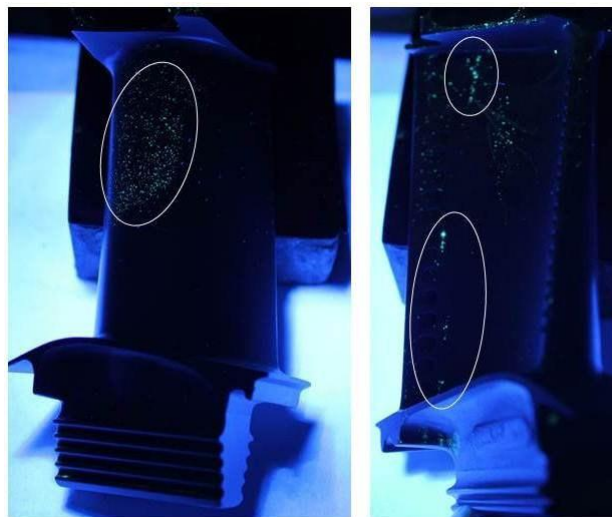
Забезпечення високої рентабельності і значне скорочення трудовитрат у виробництві сучасних ГТД є основним завданням, спрямованої на підвищення якості і зниження собівартості виготовлення високоефективних двигунів нового покоління. Дане завдання вельми актуальна для виробництва лопаток турбіни, де до 2000-х років коефіцієнт використання матеріалу (КВМ) залишався вкрай низьким: 0,05-0,30. Це призводить до значних перевитрат матеріалів та енергоресурсів, високої трудомісткості подальшої обробки (частка механічної обробки лопаток турбіни різанням на той момент

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

досягала 60% від всієї трудомісткості виготовлення двигуна) і зниження якості виготовлених лопаток [33].

Якість заготовок робочих лопаток турбіни характеризується точністю розмірів, заданої кресленням шорсткістю поверхні, структурою, механічними і фізичними властивостями металу, а також відсутністю в виливках лопаток внутрішніх і зовнішніх дефектів (наприклад, раковин, засмічень, тріщин)[34].

Безсумнівно, технологія отримання заготовок істотно впливає на їх якість і, як наслідок, визначає принципи і методики, якими слід керуватися при їх проектуванні і конструюванні.



а

б

а - утворення рихлоти (карбідів); б - дефект у вигляді цівки

Рисунок 1.8 - Результати Люм контролю робочої лопатки турбіни І-го ступеня

За макроструктурою можна визначити величину зерна і характер кристалізації виливка, в деяких випадках - фактичну температуру заливки. Металографічний аналіз мікроструктури дозволяє судити про хімічний склад і механічні властивості матеріалу виливків, виявляти неметалічні включення, шкідливі домішки в металі.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

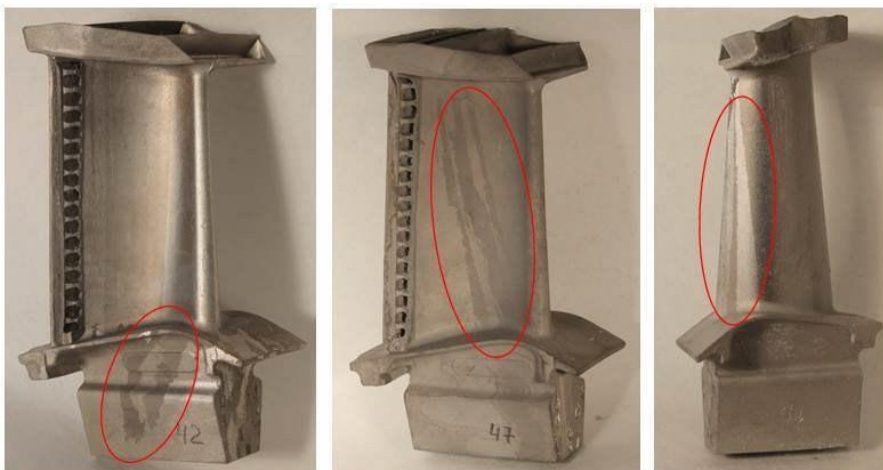


Рисунок 1.9 – Несприятлива макроструктура виливків робочих лопаток турбіни I-го ступеня

На рис. 1.10 показано схематичне зображення спеціалізованого пристосування, що реалізує шаблонний метод вимірювання. Дане пристосування в даний час використовується на підприємстві для контролю геометричній точності лопаток турбіни, яка визначається кінцевими фінішними операціями полірування, що реалізують метод пробних проходів і промірів. У цих операціях передбачається ітераційне послідовне наближення до заданої конструкторської документації геометрії лопатки за допомогою вимірювання і часткового доопрацювання.

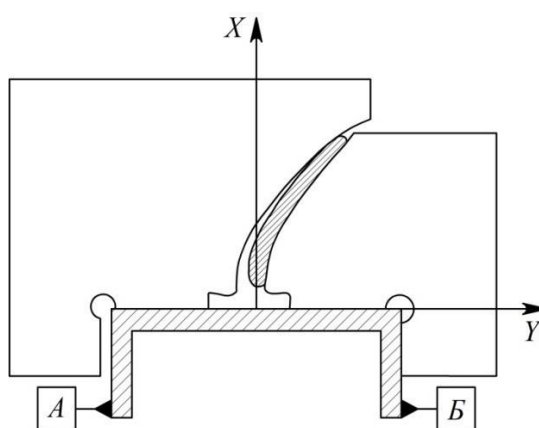


Рисунок 1.10 – Спрощена схема шаблонного пристрою
Подібним методом контролюють всі виливки робочих лопаток турбіни однієї або декількох партій по всьому розмірами, зазначеним в кресленні. Для цього іноді застосовують розрізання частини виливків по перетинах або

розмітці. Розмітка виливків турбінних лопаток застосовується виключно для контролю необхідних припусків на оброблюваних поверхнях.

Необхідно безперервно контролювати геометричні параметри заготовок робочих лопаток, які коливаються внаслідок різної утрудненої об'ємної усадки або викривлення модельної маси і металевих виливків. Встановлено, що температурні режими виготовлення і зберігання моделей, умови охолодження і кристалізації виливків безпосередньо впливають на викривлення.

Контроль товщини стінок стрижневих лопаток турбіни представляє певну складність, яка зумовила розробку і застосування електричних товщиномірів. Товщина стінки лопатки визначається шляхом вимірювання опору на контрольованій ділянці виливка. Товщина стінки контролюється в реперних точках перетинів з використанням спеціального накладного шаблону, отвори в якому відповідають розташуванням точок вимірювання [35].

Безсумнівно, технологія отримання заготовок істотно впливає на їх якість і, як наслідок, визначає принципи і методики, якими слід керуватися при їх проектуванні і конструюванні.

Резюмуючи, можна відзначити, що процеси контролю якісного стану виливків лопаток є невід'ємною частиною, що забезпечує надійність при експлуатації двигунів ГТД, і вимагають постійного удосконалення по стабільності і надійності отримання результатів при проведенні операцій контролю.

1.4 Вимоги до точності і якості поверхневого шару заготовок робочих лопаток турбіни при адаптивному формоутворенні

Оцінка якості високонавантажених деталей ГТД, таких як робочі лопатки турбіни, здійснюється в процесі їх виготовлення на основі відповідності параметрів і їх характеристик, а також режимів обробки заготовок лопаток вимогам конструкторської та технологічної документації, з урахуванням рівня технологічної спадковості.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Технологічний процес, з одного боку, характеризується такими процесами, як поява усадочних раковин при переході розплаву з рідкого стану в тверде, освітою залишкових напружень в поверхневому шарі в процесі кристалізації і при механічній обробці, розвитком мікротріщин. З іншого боку, задані кресленням параметри шорсткості, залишкових напружень, розміри і твердість повинні знаходитися в полі технічного допуску на них. Задоволення зазначеним вимогам є необхідною умовою забезпечення заданих геометричних параметрів робочих лопаток турбіни, які визначають характеристики газоповітряного тракту і елементів паливної системи. Геометричні розміри заготовок лопаток турбіни, фізико-хімічні властивості сплаву, що характеризують міцність і стійкість лопаток і їх взаємне розташування в двигуні, визначають ресурс і безвідмовність агрегату.

Таким чином, необхідною умовою забезпечення високої якості лопаток ГТД є їх виготовлення в суворій відповідності до вимог конструкторської та технологічної документації. Аналіз існуючого технологічного процесу виготовлення робочих лопаток турбіни ГТД I-го ступеня показав, що близько 5% заготовок лопаток (з партії в 100 штук) бракуються через невідповідність геометрії профілю пера лопатки еталону.

Даний дефект, як правило, обумовлений двома чинниками:

1. Недоліками технології виготовлення. Це застарілі методи і підходи до виготовлення та контролю заготовок лопаток, стан технологічного обладнання і оснастки, кваліфікація робітника, послідовність операцій технологічного процесу. Крім цього до недоліків технології слід віднести відсутність заходів щодо запобігання негативного впливу суб'єктивного фактора на якість продукції.

2. Порушеннями технологічної дисципліни. До них відносяться: відсутність необхідної нормативної та технологічної документації на робочому місці, невідповідність використовуваного обладнання і технологічної оснастки встановленим вимогам, невідповідність кваліфікації

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

виконавців виконуваний роботі, низький рівень автоматизації та механізації робочого процесу.

Все це вимагає розробки і впровадження прогресивних технологічних рішень, спрямованих на мінімізацію виробничих витрат, які характеризуються здатністю стабільно виготовляти продукцію в строгій відповідності з вимогами конструкторської документації.

Існуючий технологічний процес виготовлення робочих лопаток турбіни характеризується такими основними вимогами по точності профілів лопаток:

відхилення профілю спинки $\Delta\Pi_C$ і корита $\Delta\Pi_K$ в розрахункових перетинах від заданих допускаються від 0,1 до 0,3 мм;

- відхилення товщини профілю пера $\Delta C_{\max} = \Delta\Pi_C + \Delta\Pi_K$ товщини стінок пера стрижневий лопатки $\pm 0,3$ мм;

- зміщення вихідний кромки від номінального положення в напрямку осі x від $\pm 0,2$ до $\pm 0,3$ мм;

- зміщення профілю пера в кореновому перерізі від номінального положення в напрямку осі y від $\pm 0,05$ до $\pm 0,2$ мм;

- шорсткість пера $Ra = 0,63 \dots 0,08$ мкм, внутрішньої порожнини $Rz = 20 \dots 40$ мкм;

- перфорацію на пері лопатки $\varnothing 0,2 \dots 0,6$ мм мають допуск 0,05 мм, шорсткість $Ra = 2,5 \dots 0,15$ мкм.

Аналіз точності виготовлення робочих лопаток турбіни на різних стадіях технологічного процесу показує, що незначні викривлення і інші технологічні чинники в сукупності призводять до значних відхилень профілів від номінального розташування. Мінлива по висоті жорсткість пера лопатки призводить до того, що лінійні і кутові зміщення коренових, кінцевих і проміжних профілів різко відрізняються один від одного як за абсолютними значеннями, так і за знаком. Тому що проводиться орієнтування не дозволяє забезпечити рівномірний розподіл припуску на всіх профілях. Остаточна розмірна обробка (чистове шліфування) на існуючому обладнанні призведе до

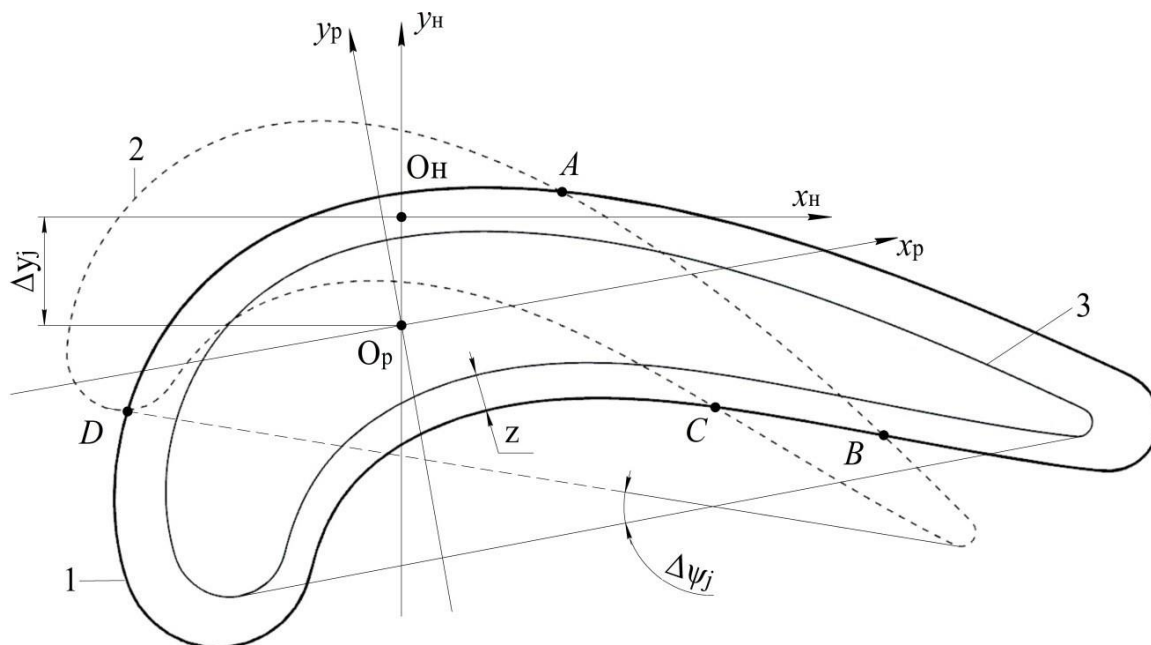
					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

того, що інструмент, рухаючись по номінальній програмі (профіль 2, рис. 4.1), виріже з заготовки 1 з припуском з укорочений профіль *ABCD*, зрізуючи при цьому на вхідний і вихідний крайках нерівномірні шари металу з протилежних сторін пера лопатки.

Збільшення припуску по профілю пера в лопатках турбіни з метою компенсації даних похибок розташування, по-перше, суперечить ідеології отримання лопаток без припуску на механічну обробку, по-друге, призведе до того, що його середнє значення багаторазово перевищить значення припусків, економічно доцільних для операцій шліфування.

Аналіз операцій підгонки профілів пера вручну шліфувальником показав, що робочий підганяє перетин кожного профілю за розмірами і формою індивідуально, незалежно від його розташування в просторі, забезпечуючи тільки плавність поверхні по висоті пера і практично не впливаючи на наявні на заготівлі лінійні і кутові зміщення. Можна сказати, що робочий робить розподіл припуску індивідуально для кожного профілю, використовуючи широкі поля допусків їх розташування. Отже, виникає необхідність розробки алгоритму автоматизованого розподілу припуску по перу лопатки, який був би універсальним для різних типорозмірів лопаток турбіни.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



1 і 2 - відповідно реальний і номінальний положення j -го профілю оброблюваного профілю пера лопатки, 3 - контур заготовки лопатки;

Δy_j - лінійний зсув профілю від номінального розташування, $\Delta \psi_j$ - кутовий зсув профілю від номінального розташування, z - припуск

Рис. 4.1 - Ескіз формоутворення пера лопатки в процесі остаточної розмірної обробки

1.5 Розробка автоматизованого алгоритму просторового розподілу припуску по профілю пера в заготовках лопаток турбіни

Рішення завдання рівномірного розподілу припуску в заготовках робочих лопаток турбіни ГТД може призвести вручну полірувальник на своєму робочому місці індивідуально для кожної заготовки лопатки. Однак подібний підхід вимагає великих затрат часу, високої трудомісткості, кваліфікації робітника і, що найголовніше, не виключає суб'єктивних помилок, внесених оператором. При масовому і серійному виробництві лопаток цей спосіб малопродуктивний, а існуючі альтернативи мають свої об'єктивні недоліки.

Необхідно відзначити, що в рамках даної дисертаційної роботи розробляється алгоритм оптимального розподілу припуску не для всієї партії

заготовок лопаток, а саме для партії, яка відбраковується з первинною ознакою наявності негативного припуску і відправляється в переплав.

Алгоритм автоматизованого знаходження оптимального, тобто найкращого, просторового розподілу припуску в заготовках робочих лопаток турбіни дозволяє вирішити цю задачу набагато швидше і незалежно від суб'єктивних помилок оператора. В основу автоматизованого розподілу припуску покладено метод автоматичного пошуку.

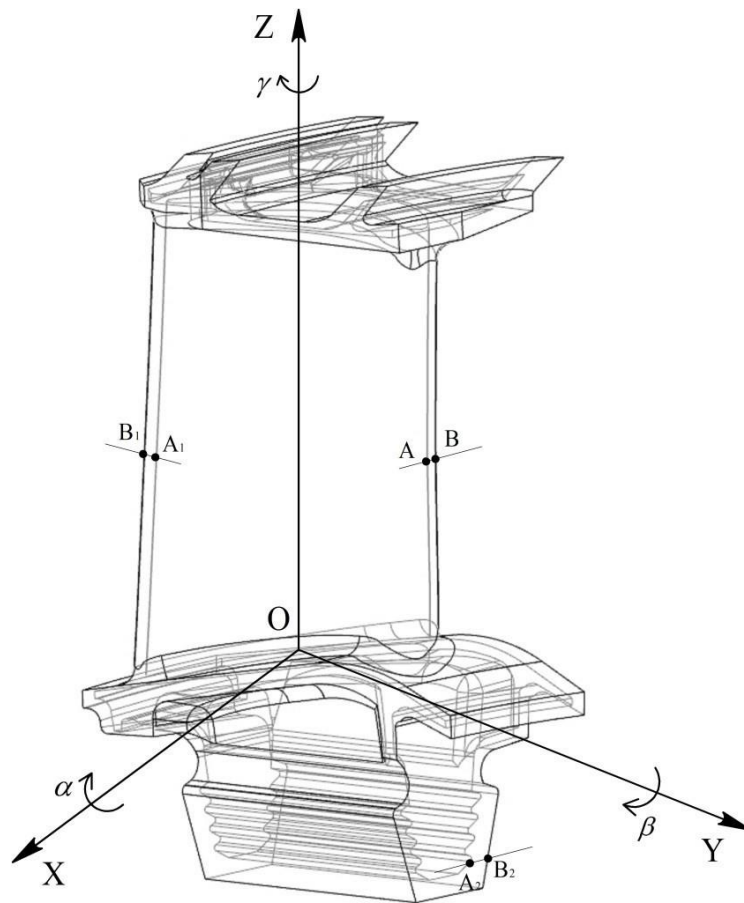
Процес автоматичного пошуку складається з поєднання пробних рухів, аналізу результатів проб, визначення подальшого руху, зміни його напрямку (при необхідності), робітничого руху, нових проб і т.д. Заготівля лопатки турбіни переміщається в загальному випадку за всіма шістьма ступенями свободи, і при цьому проводиться визначення рівномірності розподілу припуску шляхом вимірювання припуску в окремих реперних точках на поверхні заготовки [36].

Щоб судити про рівномірність розподілу припуску, необхідно мати критерій цієї рівномірності розподілу, іншими словами - критерій оптимальності.

Наведемо формальний опис задачі просторового розподілу припуску.

Сутність розробляється критерію оптимальності пояснимо за допомогою прикладу розподілу припуску у заготовки робочої лопатки турбіни ГТД І-го ступеня в просторі (рис. 1.5)

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



контур заготовки лопатки

контур деталі лопатки

Рисунок 1.5 – Розподіл припуску у заготовки робочої лопатки турбіни

На рис. 1.5 суцільною жирною лінією позначений контур заготовки лопатки, всередині нього суцільною тонкою лінією позначений контур деталі лопатки, яка повинна вийти з заготовки після механічної обробки. Спостереження проводиться в системі координат, нерухомою щодо контуру деталі лопатки.

Аналіз рис. 1.5 дозволяє зробити висновок про те, що контур заготовки лопатки має 6 ступенів свободи: переміщення по осях x , y , z і поворот (обертання) на кути α , β , γ щодо відповідних осей. Завдання полягає в тому, щоб шляхом переміщення по цим ступеням свободи контуру заготовки лопатки досягти найбільш вигідного взаємного розташування контуру заготовки деталі лопатки.

Для початку необхідно визначитися, що буде вважатися найбільш вигідним (оптимальним) розташуванням. Припустимо, що форма заготовки лопатки забезпечує отримання готової деталі зняттям рівномірного шару

матеріалу з контуру заготовки лопатки. Такий контур називають ізоформним контуру готової деталі лопатки. Тому, можна розташувати контур заготовки лопатки щодо контуру деталі таким чином, що відрізки нормалей AB , A_1B_1 і A_2B_2 , відновлені з будь-яких двох точок контуру готової деталі лопатки, будуть рівні, тобто в математичній постановці необхідно домогтися дотримання тотожності: $AB = A_1B_1 = A_2B_2$. Саме таке розташування і слід вважати найбільш вигідним (оптимальним). Дане твердження справедливе лише в ідеальному випадку. Однак в реальних виробничих умовах контур заготовки лопатки не є ізоформним контуру деталі, і мова може йти тільки лише про максимальне наближення контуру заготовки до контуру, ізоформному контуру готової деталі лопатки. В даному випадку відрізки нормалей AB , A_1B_1 і A_2B_2 не рівні один одному, але стоїть завдання зробити їх по можливості максимально рівними.

Для вирішення поставленого завдання в розглянутої постановки були розроблені три види критерію оптимальності (K).

Першим критерієм оптимальності (K_1) служить максимальне з відстаней, взятих по нормалі до контуру деталі лопатки. Позначимо цю відстань через δ_i . Вимірювання проводиться в n точках контуру деталі лопатки.

Тоді, критерій оптимальності має вигляд:

$$K_1 = \max_{(i)} \delta_i = \max_{(i)} \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma);$$

$$(i=1, \dots, n).$$
(1.5)

Завдання оптимальної установки контуру заготовки лопатки щодо контуру деталі лопатки полягатиме в такому виборі значень змінних $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$, при яких забезпечується мінімум величини K_1 :

$$\min_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} K_1 = \min_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} \left\{ \max_{(i)} \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \right\};$$

$$(i=1, \dots, n).$$
(1.6)

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В якості другого критерію оптимальності (K_2) може бути прийнято мінімальне з відхилень δ_i :

$$K_2 = \min_{(i)} \delta_i = \min_{(i)} \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma);$$

$$(i=1, \dots, n). \quad (1.7)$$

Завдання управління полягає в тому, щоб зміною змінних $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ забезпечити максимальне значення критерію K_2 :

$$\max_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} K_2 = \max_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} \left\{ \min_{(i)} \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \right\};$$

$$(i=1, \dots, n). \quad (1.8)$$

З практичної точки зору, критерій K_2 часто є найбільш вдалим, так як при установці заготовки лопатки за цим критерієм заготівля віддаляється від небезпечних положень, в яких припуск може виявитися негативним.

Третім критерієм оптимальності (K_3) може служити різниця між максимальним і мінімальним з відхилень:

$$K_3 = K_1 - K_2 = \max_{(i)} \delta_i - \min_{(j)} \delta_j = \max_{(i)} \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) - \min_{(j)} \delta_j(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma);$$

$$(i=1, \dots, n) (j=1, \dots, n). \quad (1.9)$$

Завдання оптимального розподілу припуску зводиться до мінімізації цього критерію:

$$\min_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} K_3 = \min_{(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)} \left\{ \max_{(i)} \delta_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) - \min_{(j)} \delta_j(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \right\};$$

$$(i=1, \dots, n) (j=1, \dots, n). \quad (2.0)$$

Недоліками критерію подібного типу є необхідність формування K_3 у вигляді різниці двох порівняно великих величин. Ця різниця при наближенні до мінімуму стає невеликий і сумірною з перешкодами, що утрудняють можливість використання критерію K_3 .

Необхідно відзначити, що для пошуку оптимального просторового розподілу припуску в заготовках робочих лопаток турбіни краще вибирати

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

критерій K_2 зважаючи на його найбільшу пристосованість до складнопрофільних деталей машинобудування. Однак критерії оптимальності K_1 і K_3 також мають право на існування.

1.6 Зварювання вибухом

При зварюванні вибухом деталь, що приварюється розташовується під кутом до нерухомої основи або паралельно до неї та приводиться у рух контрольованим вибухом, після чого вдаряється з великою силою з основою. При цьому є значна деформація металу в зоні з'єднання, вона набуває хвилеподібну форму [1]. В результаті цього процесу відбувається необоротне вбирання механічної енергії та нагрів місця з'єднання, що сприяє фізичному контакту і активації металів.

Цей вид зварювання можна використовувати для з'єднання різнорідних сплавів і металів, так як через швидкоплинність процесу об'ємна дифузія не встигає розвиватися. Перед зварюванням деталі зачищаються до металевого блиску та знежирюються для кращої якості зварювання.

Зварювання проводять у спеціалізованих звукоізованих приміщеннях або під піною у певній області швидкостей і кутів контакту металів. Найчастіше використовують в якості вибухової речовини амоніти, гранулотол, амонали тощо.

Зварювання вибухом плоских поверхонь найчастіше використовується для виготовлення біметалів та багат шарових листів, в тому числі для плакування спеціальними сплавами.

За допомогою цього методу виготовляють металургійне устаткування, оболонки кабелів зв'язку, потужних струмовідводів, трубчастих перехідників для енергетики та ракетобудування, відводів у діючих газо- і нафтопроводів тощо.

Основними перевагами зварювання вибухом є висока швидкість і можливість з'єднання металів та сплавів, зварювання яких є обмеженою або неможливою за використання інших технологій.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Рисунок 1.6 Схема процесу зварювання вибухом

1.7 Спільна гаряча пакетна прокатка

Одним із основних способів отримання широкого класу біметалів в промислових масштабах є спільна гаряча пакетна прокатка[2]. Даний спосіб використовується для отримання корозійно-стійких біметалевих листів. При гарячій прокатці пакет з двох або більше шарів різних металів в вигляді пластин або профілів піддається гарячій прокатці на заданий профіль.

Незважаючи на велику кількість різноманітних процесів по виготовленню плакованих металів цим способом, принципова схема зводиться до наступних операцій:

- підготовка заготовок з металу основного шару;
- підготовка пластин або листів з металу плакуючого шару;
- складання і зварювання пакетів;
- нагрів і деформація пакетів;
- термічна обробка та оздоблення готової продукції.

В процесі прокатування між контактними поверхнями металів відбувається схоплення, що утворює металічні зв'язки. Контактні поверхні спеціально готують для успішного перебігу процесу прокатування. Поверхні основного металу зазвичай оброблюють на строгальному та фрезерному

верстатах. Рідше використовують абразивне зачищення або дробоструменеву обробку. В залежності який метал використовується для плакування, відповідно до цього готують контактну поверхню пластин плакуючого металу. Іноді на поверхню пластини наносять шар нікелю електролітичним способом або наплавляють тонкий шар маловуглецевої сталі. Також для захисту плакуючого листа наносять рівний шар флюсу або хлористого амонію для запобігання окислення.

Для виготовлення двошарових листів, плакованих легко окислювальними металами, такими як титан, цирконій, використовують вакуумування пакетів або продування інертним газом. Газ відкачують з пакета під час нагрівання або перед нагріванням. Для запобігання окислення контактних поверхонь здійснюється циркуляція аргону протягом всього періоду нагріву пакету.

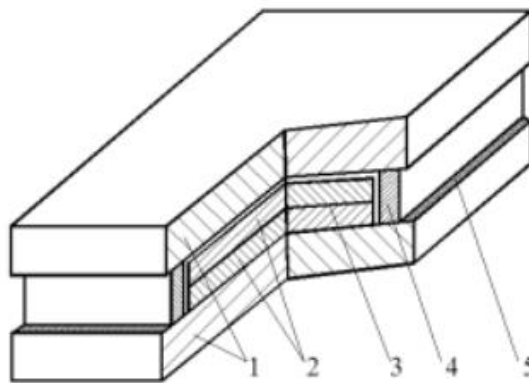


Рисунок 1.7 Конструкція чотиришарового біметалічного пакета

1-основні шари; 2-плакуючі шари; 3-розділовий шар; 4-сполучна планка; 5-зварний шов.

Міцне зчеплення шарів виникає під час гарячої прокатки по контактних поверхнях слябів і пластин, через проміжні сполучні шари, утворюється однорідний кант з вуглецевої сталі по периметру пакета завдяки зварюванню нижніх і верхніх слябів з планками. схоплювання між пластинами плакуючого металу не відбувається завдяки роздільному шару.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.8 Електрошлакова наплавка

Електрошлакове наплавлення — технологія, що базується на нанесенні розплавленого металу на робочу поверхню виробу, при якій оплавлення основного та розплавлення присадного металів відбувається за рахунок тепла, що виділяється у шлаковій ванні при проходженні через неї електричного струму [3]. Електрошлакове наплавлення відбувається в горизонтальному, вертикальному або нахиленому положенні, зазвичай, з примусовим формуванням наплавленого шару.

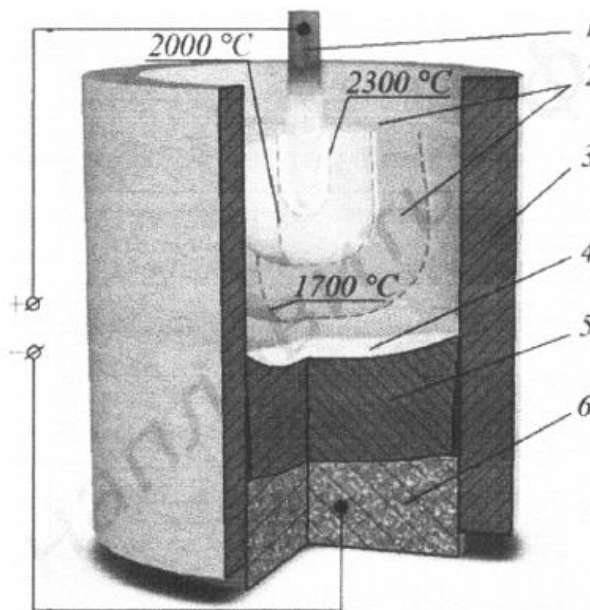


Рисунок 1.8 Топологія температурного поля в шлаковій ванні: 1-плавкий електродний дріт; 2-шлакова ванна; 3-кристалізатор; 4-ванна розплаву; 5-наплавлений метал; 6-виріб.

Шлакова ванна характеризується великою неоднорідністю температурного поля. На деякій відстані від електрода температура шлаку становить 1700...1800 °С. В той час, як в шлаку розташованому навколо електрода, вона може становити 2000 °С і більше. У шлаку на границі електродів відбувається нейтралізація катіонів (на катоді) і газовиділення (на аноді). Дані процеси відбуваються у тонкому приелектродному шарі шлаку (~20 мкм), де іноді припадає значна частка повного падіння напруги на шлаковій ванні (8...20%). При цьому температура шлаку може досягати 2200...2300 °С. При використанні неплавкого графітового електрода

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

призводить до ерозії його поверхневого шару за рахунок термоелектричних процесів, що обумовлює перехід вуглецю в наплавлений метал і шлак.

У процесі ЕШН розрізняють два способи формування наплавляемого металу. Перший передбачає формування на плоскій горизонтальній поверхні вільного розплаву зварювальної ванни, а другий полягає у використанні спеціальних каталізаторів (формувальні пристрої), які виготовляються переважно з міді. В них розплавлений метал кристалізується в замкнутій порожнині.

Для уникнення перегрівання кристалізатори охолоджують проточною водою, а на їх поверхні, що контактують з розплавом, наносять графіт та інші матеріали, що захищають їх від електрохімічної ерозії.

Збудження електрошлакового процесу відбувається у декілька етапів і базується на попередньому розплавленні флюсу і нагріві до робочої температури сформованої шлакової ванни.

Існує декілька способів наведення шлакової ванни. Для наведення невеликих обсягів шлаку в процесі ЕШН зазвичай використовують тепло електричної дуги. По мірі того, як флюс плавиться в порожнині кристалізатора обсяг шлаку збільшується, і відбувається електрошлаковий процес. Розплавлення флюсу відбувається при підвищених значеннях зварювального струму і напруги дуги, так як умови стійкого горіння дуги протилежні умовам стійкого процесу електрошлакового наплавлення.

За необхідності шлакової ванни великого об'єму, використовують спеціальні пристрої (тиглі, печі та ін.), в яких попередньо розплавляють флюс. Отриманий розплав подається в простір між виробом і кристалізатором, та подають підвищену напругу (до 60 В), що запобігає переохолодження шлаку. По мірі зростання об'єму шлаку напругу знижують до номінального значення.

Другий спосіб базується на використанні електропровідного флюсу у твердому стані. Цей флюс (АН-25) містить велику кількість нижчих оксидів титану, саме це впливає на його електронну провідність в твердому стані. За рахунок оксидів титану збільшується швидкість формування шлакової ванни.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Забезпечення високої стійкості електрошлакового процесу – один з найважливіших вимог до процесу наплавки. Електрофізичні властивості шлаку і розплаву зварювальної ванни, а також всі параметри режиму наплавлення впливають на стійкість електрошлакового процесу. Для забезпечення стійкості процесу ЕШН, потрібно стабілізувати температуру, об'єм жужільної ванни та глибину занурення електрода в шлак.

Електрошлаковий процес має однакову стійкість і на змінному, і на постійному струмі. Електрошлаковий процес має стійкість у широкому обсязі щільності струму ($0,2 \dots 250 \text{ А/мм}^2$) якщо в зварювальну ванну вводиться дріт. Висока стабільність ЕШН перш за все визначається великою тепловою інерцією жужільної ванни, завдяки цьому повільно змінюється значення струму і напруги.

1.9 Дугове наплавлення в захисних газах

Сутність процесу наплавлення в захисних газах насамперед полягає в тому, що в зону електродуги подають захисний газ від невеликим тиском, наслідком чого є ізоляція стовпа дуги та зварної ванни від кисню та азоту, які знаходяться в повітрі[3,7]. Розділяють зварювання (наплавлення) в інертних і активних середовищах газів, в залежності від застосовуваного газозварювання. Наплавлення може проводитися плавким або неплавким електродом. У першому випадку при наплавленні плавким електродом, дуга горить між деталлю і електродним дротом, який подається безперервно в зону обробки, та бере участь у формуванні зварного шва. При зварюванні неплавким електродом електрод не плавиться і не реагує з металом шва, а окремо вводять в зону обробки присадний метал.

Зварювання в середовищі вуглекислого газу відбувається наступним чином. Електродний дріт подається в зону горіння дуги, надходить струмінь газу під невеликим тиском, достатній для відтиснення повітря від зони зварювання. Вуглекислий газ має в 1,5 разів більшу щільність ніж повітря, що забезпечує надійний захист дуги від повітря при невеликих витратах газу.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Так як вуглекислий газ який потрапляє в зону дуги дисоціює $2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2$, то зварювання проходить вже в суміші газів CO_2 , CO , O_2 , а не в чистому вуглекислому газі. Від температури залежить кількість співвідношення обсягів цих газів. Вміст кисню в продуктах розпаду майже не відрізняється від атмосфери повітря при температурах крапель (2600...2800 K). В середовищі вуглекислого газу досягається майже повний захист ванни розплаву від азоту повітря. Але окислювальний характер газової суміші зберігається, він майже такий, який би був при зварюванні оголеним електродом на відкритому повітрі. Через це, необхідно забезпечити заходи по розкисленню наплавлюваного металу під час наплавлення в середовищі вуглекислого газу.

Розкислювання виконується двома шляхами: додатковою подачею флюсу, шлакова обробка металу; використання дроту, до складу якого входять ефективні розкислювачі.

На практиці широкого розповсюдження отримав другий спосіб. В якості розкислювачів застосовують марганець (1 - 2%) та кремній (0,6 – 1,0%) при зварюванні в середовищі вуглекислого газу.

Наведено перелік зварювальних матеріалів, які застосовують при зварюванні та наплавленні в середовищі CO_2 , ними виступають електродні дроти наступних марок: Св-18ХГС, ПП-АН4, ПП-АН8, ПП-3Х2В8Т, Св-08Г2С, Св-0, 8ГС. При виконанні зварювання дротом, в якому не достатньо розкислювачів та проходить з великою кількістю вуглецю, супроводжується сильним розбризкуванням наплавляемого металу, підвищується можливість утворення тріщин та спостерігається пористість наплавленого металу.

Нижче на рис. 1.9 показана схема установки для наплавлення в середовищі CO_2 .

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

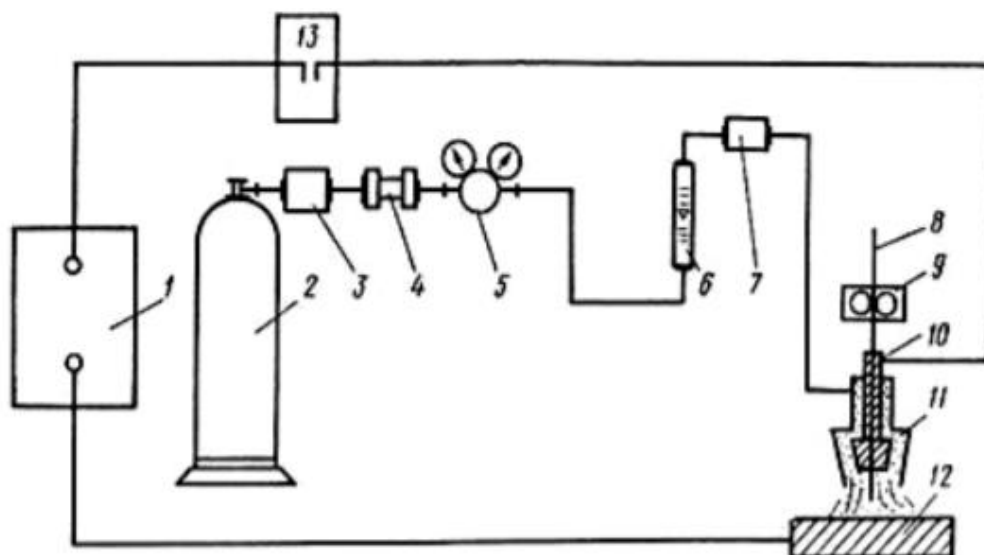


Рисунок 1.9. Схема установки для наплавлення в середовищі CO_2 :

1 – джерело постійного струму; 2 – балон з газом; 3 – підігрівач газу; 4 – осушувач газу; 5 – редуктор; 6 – ротаметр; 7 – газовий клапан; 8 – електродний дріт; 9 – привод подачі електродного дроту; 10 – струмоведуча втулка; 11 – сопло пальника; 12 – деталь; 13 – панель керування.

1.10 Дугове наплавлення покритим електродом

Наплавлення цим методом здійснюється зазвичай вручну та засновується на використанні стержневих електродів з покриттям (обмазкою)[3]. Покриття електродів служать як захист ванни розплаву від азоту та кисню, що містяться в повітрі. Також завдяки покриттю стабілізується електрична дуга та підвищується технологічність процесу наплавлення і подачу легуючих сполук до складу наплавленого шару металу. Застосовують кілька видів покриття:

- високоцелюлозне (20 - 30% целюлози);
- ільменітне (< 30% ільменіту (FeO-TiC));
- високорутилове (до 35% TiO_2);
- карбонатно-рутилове;
- основне (фтористо-кальцієве);
- покриття залізний порошок – рутил;
- спеціальні покриття з вмістом графіту.

В процесі дугового наплавлення в основному застосовуються основне, карбонатно-рутилове та високорутилове покриття. В склад електродного покриття також вводять розкислювачі, легуючі та стабілізуючі добавки, газоутворюючі та шлакоутворюючі компоненти.



Рисунок 1.10 Плавкі електроди із захисним покриттям

1.11 Плазмове наплавлення

Плазмове наплавлення – це спосіб наплавлення при якому джерелом теплоти виступає плазмова дуга. При плазмовій наплавці в якості електродних або присадних матеріалів слугують гранульовані порошки[5], порошкові або суцільні дроти, присадка в вигляді литих чи спечених кілець.

Суть цього методу полягає в нанесенні покриття на металеву поверхню дротяних або порошкових матеріалів в розплавленому виді з використанням плазмової дуги як джерела тепла, яка горить між заготовкою (виробом) і електродом плазмотрона.

Основною метою плазмового наплавлення є виготовлення деталей, які мають спеціальні корозійно-стійкі властивості, а також відновлення поверхонь деталей, які зазнали браку або знослися.

Обладнання яке використовується для плазмового наплавлення складається з джерела струму, блоку живлення, плазмотрона, пристрою подачі дроту або порошкового дозатора, маніпулятора яким переміщується деталь або плазмотрон.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

У технологічний процес плазмового наплавлення входить: попередня підготовка та плазмова наплавка, шляхом переміщення деталі відносно плазмотрона або навпаки, та з одночасною подачею в зону плазмової дуги присадного матеріалу.

Різноманітні металеві порошки, литі присадні прутки, порошкові дроти, суцільнотягнуті наплавляючі та зварювальні дроти використовують у якості присадного матеріалу під час плазмового наплавлення.

Перелік асортименту наплавлюваних матеріалів: леговані чавуни, сплави на основі заліза, кобальту, нікелю, вуглецеві, леговані і високолеговані сталі, суміші з карбідами.

1.11.1 Плазмо-порошкове наплавлення

Плазмо-порошкове наплавлення значно відрізняється від інших методів наплавлення обладнанням, технологічними можливостями та використовуваними матеріалами[5,7].

З точки зору універсальності, порошки для наплавки можна отримати майже з будь-якого придатного матеріалу для наплавки незалежно від його твердості, ступеня легування, пластичності і інших властивостей. У ролі присадки застосовується як порошки, так і більш грубозернисті сипучі матеріали.

Наплавлення з присадочним порошком виконують плазмовою дугою прямої дії або двома плазмовими дугами – прямої і непрямої дії із загальним електродом.

При цьому використовують різні схеми введення порошку в дугу, які можна розділити на дві групи. В одній групі порошок вводять в дугу всередині плазмотрона (Рис.1.11.1), а в іншій - поза його (Рис.1.11.1.).

У плазмотронах з внутрішнім введенням порошку в дугу створюються, як правило, більш сприятливі умови для його нагрівання плазмою. При зовнішній

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

подачі порошку його нагрівання менш ефективно, зате надійність роботи плазмотрона трохи вищий.

Запатентовані схеми введення порошку в дугу через електродну камеру плазмотрона (Рис.1.11.1, а і б), на жаль, не знайшли практичного застосування, так як внаслідок попадання порошку на електрод, він швидко виходить з ладу. Плазмотрони з подачею порошку через осьовий отвір у катоді також поки не знайшли практичного застосування через складнощі виготовлення електродів з отвором і проблемами, пов'язаними з подачею порошку через отвір відносно діаметру.

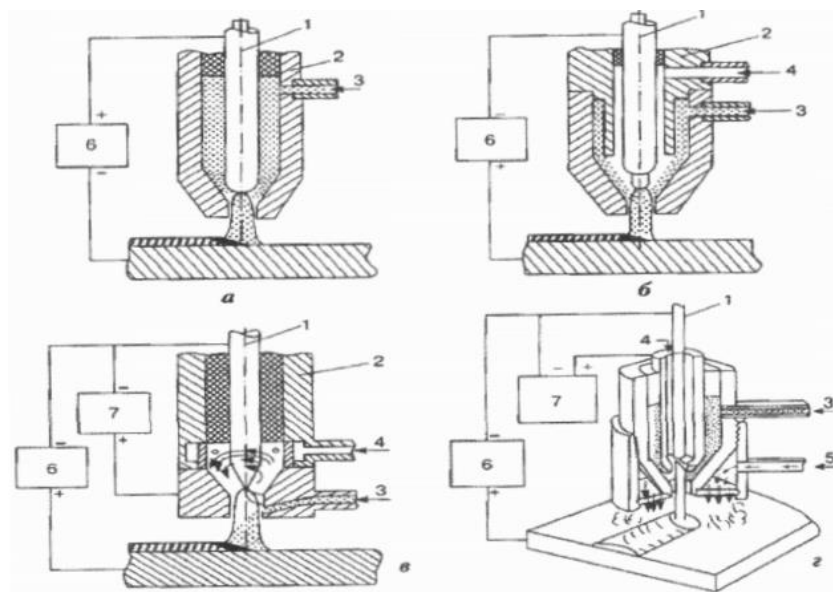


Рисунок.1.11.1. Схеми плазмового наплавлення з введенням присадочного порошку в дугу всередині плазмотрона: а - разом з плазмоутворюючим газом; б - через електродну камеру; в - через бічний отвір в каналі сопла; г - через воронкоподібну щілину між соплами (1 - мідний водоохолоджуваний електрод (а), водо охолоджуваний з вольфрамовою вставкою (б), вольфрамовий (в, г), 2 - сопло; 3 - введення присадочного порошку з транспортуєчим газом; 4 - введення хіазмо утворюючого газу; 5 - введення захисного газу; 6 - джерело живлення дуги прямої дії; 7 - джерело живлення непрямої дуги).

Радіальне введення порошку через бічний отвір в каналі сопла (Рис.1.1.6.1, в) характерний для напилення, але для наплавлення використовується рідко.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

За такої схеми введення порошку стала робота плазмотрона можлива лише при великих витратах плазмо утворюючого газу. Ця умова легко реалізується при напиленні, але при наплавленні велика витрата плазмо утворюючого газу небажана, через те, що веде до збільшення глибини проплавлення основного металу.

Для наплавлення ефективною виявилася схема подачі порошку в дугу під кутом $25-80^\circ$ через воронкоподібну щілину, яка утворюється і об'єднується конічними поверхнями внутрішнього і зовнішнього сопел плазмотрона (Рис.1.11.1, г). У цьому випадку подвійний потік транспортуючого газу і порошку концентрується в дузі, тому не тільки не зменшує, а й підвищує її сталість. Щоб при відносно великій довжині внутрішньо соплової ділянки дуги електродний виріб уникнув шунтування дугового розряду соплами і утворенню так званої каскадної дуги, внутрішнього і зовнішнього сопла, електрично ізолюють один від одного.

Дуга непрямої дії горить між електродом і внутрішнім соплом і служить в основному для забезпечення стабільної роботи плазмотрона. Роль її в нагріванні порошку невелика. Потужніша дуга прямої дії слугує для необхідного нагріву поверхні виробу, плавлення присадкового металу та освітлення зварювальної ванни.

При плазмовому наплавленні з зовнішньою подачею присадкового порошку (Рис.1.11.1), його подають в зону наплавлення через отвори в торці сопла плазмотрона (їх може бути від одного до трьох) або по трубці, прикріпленій збоку сопла.

При наплавленні сплавів на основі нікелю, кобальту або заліза кут нахилу цих трубок (отворів), їх діаметр, витрата транспортуючого газу та інші параметри режиму вибирають такими, аби порошок подавався в дугу на невеликій відстані від виробу і потрапляв в зварювальну ванну під дугою. При цьому порошок можна подавати в дугу збоку, спереду і ззаду або одночасно з декількох сторін (Рис.1.11.2, відповідно а-в). Напрямок подачі порошку в

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

цьому випадку скоріше всього не грає ролі, то ж на практиці використовують всі ці варіанти.

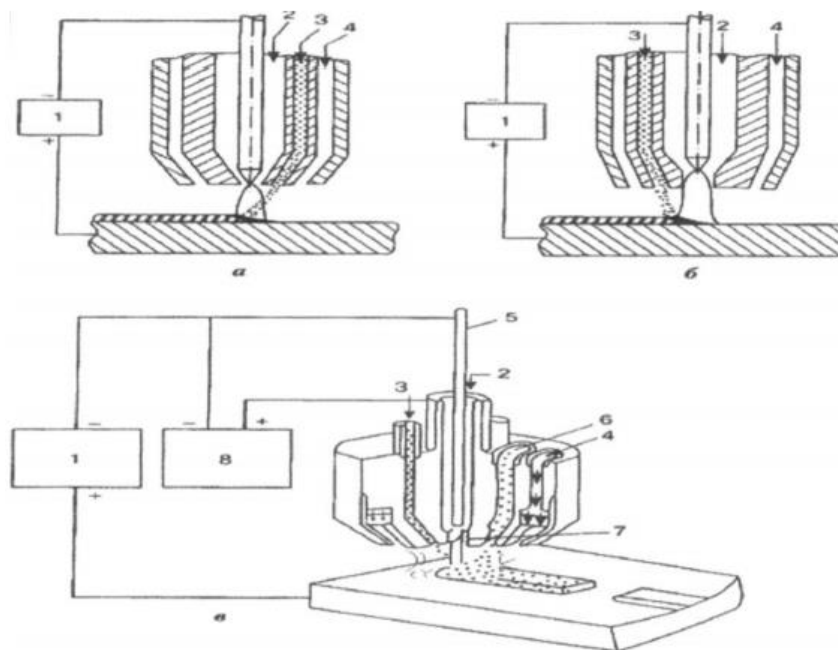


Рисунок.1.11.2. Схеми плазмового наплавлення з зовнішньою подачею присадкового порошку через отвір в торці сопла «кутом назад» (а) , «кутом вперед» (б), по каналах в соплі плазмотрона (в): 1 - по каналах живлення дуги прямої дії; 2 - подача плазмо утворюючого газу; 3 - подача присадочного порошку транспортуючим газом; 4 - введення захисного газу; 5 - електрод; 6 - введення додаткового присадочного порошку; 7 - плазмова дуга; 8 - джерело живлення непрямої дуги.

При наплавленні композиційних сплавів додатковий канал для подачі зміцнюючих частинок карбіду вольфраму частіше знаходиться позаду дуги і має такий кут нахилу, щоб порошок карбіду потрапляв в зварювальну ванну, минаючи дугу (Рис.1.11.2 в). Це дозволяє уникнути або, хоча б, зменшити їх розчинення в розплаві. Ванна розплаву утворюється за рахунок розплавлення металу основи, захисного покриття, нанесеного на зерна карбіду вольфраму, або порошку сплаву-зв'язки, який подають разом з карбідом або окремо від нього по бічним каналам. У будь-якому разі наплавлений метал складається з порівняно легкоплавкої матриці і не розплавлених часток карбіду вольфраму, що становить гетерогенну структуру.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Певно, що зі зміною режиму роботи плазмотрона і видів введення присадкового порошку в дугу змінюються як інтенсивність, так і тривалість нагрівання його часток плазмовою дугою. Експериментальних даних про температуру нагрівання порошку в дузі при наплавленні немає.

При подачі порошку ззовні час його перебування в дузі значно коротший, а нагрівання не настільки ефективне. За даними В. І. Ірмера, що вивчав енергетичний баланс процесу плазмового наплавлення, на нагрів порошку витрачається при його внутрішній подачі від 9 до 20% потужності дуги, при зовнішній - близько 12%.

Залежно від будови плазмотрона для наплавлення використовують присадкові порошки з розміром частинок від 45 до 250 мкм, рідше - до 400 мкм, які одержують, зазвичай, шляхом розпилення рідкого металу водою або інертним газом.

Плазмотрони з внутрішнім підведенням порошку застосовують для наплавлення композиційних шарів, якщо присадочним матеріалом є механічні суміші порошків сплаву-зв'язки і карбідів вольфраму, ніобію або ванадію. Формування карбідів в суміші може досягати 75-80% по масі. Розмір їх зерен від 20 до 200 мкм. В інших випадках використовують роздільну подачу порошків карбиду і сплаву-зв'язки.

В ролі плазмо утворюючого і транспортуючих газів для наплавлення порошком застосовують аргон. Як захисний газ використовують аргон, суміш аргону з 5-8% водню або азот. Аргоно-водяна суміш може служити також і для подачі порошку.

Ефективність плазмово-порошкового наплавлення залежить від потужності плазмотронів, зазвичай становить 5-10 кг наплавленого металу за годину. Реальна продуктивність наплавки залежить від розмірів і форми виробу, товщини наплавляемого шару, типу присадкового порошку та інших причин і знаходиться в межах 0,8-6 кг/год.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Мінімальна товщина наплавленого шару при внутрішній подачі порошку становить 0,25 мм, а при зовнішній - 0,5 мм. Найбільша висота одношарового валика в цих випадках становить 5-6 мм. Можливість нанесення відносно тонких шарів з малим проплавленням основного металу - важливий плюс плазмового наплавлення порошком.

При наплавленні без коливань плазмотрона наплавлені валики становлять за шириною 3-10 мм; при наплавленні з коливаннями вона може сягати 40-50мм.

1.12 Лазерне наплавлення

Лазерне наплавлення будується на локальній подачі присадного матеріалу і короткочасному розплавленні матеріалу основи. Керування процесом дозволяє регулювати не тільки розміри зон розплавлення, а також і термічні цикли процесу[6]. Є три загальноприйнятих способи утворення покриттів лазерним наплавленням.

Перший спосіб засновується на утворенні покриття оплавленням попередньо нанесеного порошку. Склад шлікера вибирають таким чином, щоб він мав якомога менший вплив на склад майбутнього покриття. Нанесену пасту на поверхню виробу поступово сканують і оплавляють. Щоб утворити багат шарове покриття, необхідно після кожного етапу наносити новий шар шлікеру. Простота технології та її конструкції є основною перевагою цього методу. Але також є деякі недоліки – нерівномірність покриття через сили поверхневого натягу металу, трудозатрати процесу.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Рисунок 1.12.1 Схема нанесения покрытий оплавлением поперечно нанесеного порошку

Другий найпоширеніший спосіб наплавки засновується на подачі газо-порошкової суміші в зону обробки за допомогою бічної подачі. Подача порошку в зону розплаву якісно змінює процес наплавки, що дозволяє виготовляти як рівномірні за товщиною покриття та хімічним складом, так і композитні матеріали зі збереженням зміцнюючої фази. Подавання суміші може виконуватися як назустріч, так і збоку. Основним мінусом цього способу є несиметричність подачі порошку відносно напрямку руху.

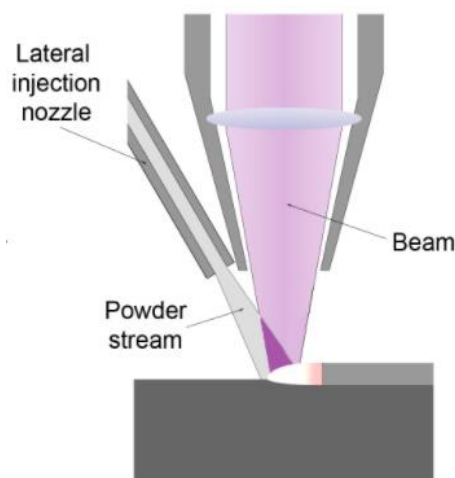


Рисунок 1.12.2 Схема подачі газо-порошкової суміші за допомогою бічної подачі

Третій спосіб має назву коаксіальне лазерне наплавлення, в цьому випадку газо-порошкова суміш вводиться в зону випромінювання симетрично з усіх боків стискаючись в фокус конусом. Саме формування симетричного рівномірного потоку порошку є основною складністю цього процесу. Даний спосіб є найбільш універсальним для виготовлення композитних та однорідних покриттів на плоских та тривимірних поверхнях.

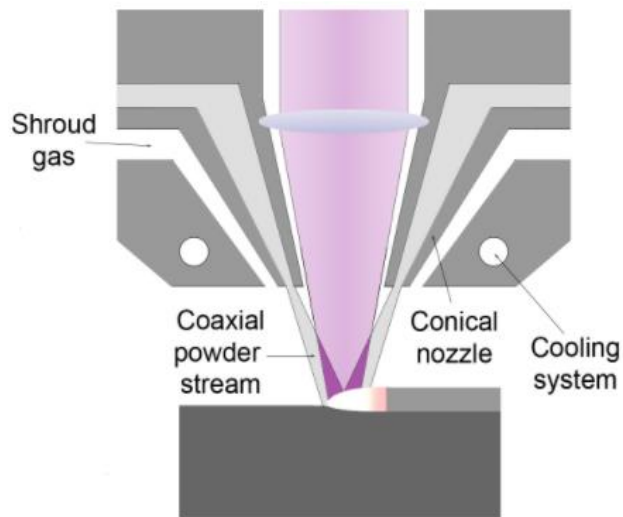


Рисунок 1.12.3 Схема подачі газо-порошкової суміші за допомогою коаксіальної системи

1.13 Лазерне газопорошкове наплавлення

Значні переваги має метод лазерного газопорошкового наплавлення, при якому наплавлюваний порошок примусово подається транспортуючим газом безпосередньо в зону лазерного впливу.

Частинки порошку починають нагріватися в зоні лазерного випромінювання.

Частка за час польоту від точки її контакту з лазерним променем до поверхні виробу (10 мм) при середній швидкості 10 - 30 м/с, тобто 1 мс, частинка нагрівається до температури плавлення. При розмірах часток 80 -100 мкм, для повного розплавлення частки потрібен час 10 мс. Через це, частина

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

енергії, яка потрібна для повного розплавлення частки, залучається від розплавленого металу основи, у процесі їхнього контакту. Значення питомої погонної енергії для цього методу становить $q=30-50 \text{ Дж/мм}^2$.

Основними параметрами процесу є:

- розмір наплавленого шару, ширина - b , висота - h ;
- глибина підплавленої поверхні основи, h_1 ;
- пористість, тріщинуватість наплавленого шару;
- мікротвердість; -структура, її дисперсність; -залишкові напруги;
- висота мікронерівностей.

Основними компонентами процесу є:

- потужність лазерного випромінювання, P , Вт;
- діаметр плями фокусування, d_0 , мм;
- швидкість руху променя або деталі, $V_{\text{напл}}$, м/хв;
- витрата порошку, G , г/с;
- діаметр порошку, що подається, діаметр сопла, d , мм;
- відстань від кінця сопла до осі лазерного променя, L , мм;
- кут подачі порошку, α° ;
- витрата транспортуючого газу, p , $\text{см}^3/\text{хв}$;

Підвищення витрати порошку при безперервному режимі опромінення приводить до невеликого росту ширини й висоти наплавленого шару при зниженні коефіцієнта перемішування з 0,14 до 0,06. Зростання відстані L від 5 до 35 мм приводить до збільшення площі перетину струменя порошку на поверхні обробки й зменшенню щільності часток. При цьому збільшується ширина й знижується висота наплавленого шару. Коефіцієнт перемішування збільшується від 0,07 до 0,65. На параметри наплавлення значно впливає кут подачі порошку. Оптимальним вважається кут $\alpha = 45^\circ$. При збільшенні α до 45° висота валика зростає за рахунок динамічного тиску газопорошкового

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

струменя на рідку ванну розплав. При подальшому збільшенні кута, істотно зменшується кількість порошку, що потрапляє в розплав, і висота валика наплавлення зменшується. При цьому дещо зменшується також ширина валика. Коефіцієнт перемішування збільшується від 0,05 до 0,47. Впливовим фактором, що діє на формування наплавленого шару, є напрямок подачі порошку щодо руху поверхні. Є кілька варіантів: у слід руху поверхні, під кутом до напрямку руху назустріч руху поверхні, одночасно й у слід і назустріч руху (рис.1.13). Подача порошку в слід руху поверхні забезпечує добре формування наплавленого валика. Газопорошковий струмінь тисне на розплавлений метал, відтискуючи його у хвостову частину до затверділого металу. Коливання висоти й ширини валика сягають 10 - 15%. При подачі порошку назустріч, газопорошковий струмінь відтісняє рідкий метал від частини, що затверділа, тому він розтікається по поверхні, що збільшує площу ванни розплав. При цьому зростає кількість частинок порошку, що потрапляють у ванну розплав, через це збільшується розміри валика в порівнянні з попередньою схемою. Однак валик має нерівномірні розміри по довжині. Відмінність розмірів досягає 50 - 60%.

Це описано в літературі й цілком допустиме в тому випадку, коли газопорошковий струмінь не зорієнтований у просторі. Якщо точно формувати газопорошковий струмінь і подавати його прямо в передню стінку ванни розплав, то продуктивність процесу наплавлення з погляду на витрати енергії лазерного випромінювання, вигідного використання порошку, використання енергії розплаву основи, гомогенності структури наплавленого шару й сталості його розмірних характеристик, а також шорсткості поверхні, за цією схемою, значно вище щодо попередньої. Однією з важливих характеристик цього процесу є коефіцієнт використання наплавленого порошку, як відношення маси наплавленого металу до маси витраченого порошку. Зростання потужності випромінювання, діаметра плями фокусування приводять до зростання коефіцієнта використання порошку. Розмір факела розпилювання порошку, що залежить від відстані L , розміру

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

перетину сопла, що подає, величини витрати порошку й витрати транспортуючого газу, а також розмір кута подачі порошку повинні мати раціональні значення (при $P = 1000 \text{ Вт}$, $d = 2 \text{ мм}$, $L = 10 \text{ мм}$, $G = 0,1 - 1 \text{ г/с}$, $\alpha = 45^\circ$). Для підтримки рівномірності шару по глибині при обробці більших площ поверхні розумно використовувати скануючий пучок або вести обробку з коефіцієнтом перекриття поблизу розміщених валиків $K_n = 0,6-0,7$. При цьому K_n дорівнює відношенню відстані між центрами двох сусідніх валиків S до ширини одиничного валика b ;

$$K_n = S / b .$$

При дії лазерного випромінювання із щільністю потужності

$W_p = 10^5 - 10^6 \text{ Вт/см}^2$ у підкладці утвориться ванна розплаву, що під дією конвекції, а також сил поверхневого натягу безперервно рухається зі швидкостями до 20 м/с , створюючи потоки різноманітного напрямку. У напрямі руху лазерного променя - розплавлений метал стікає по передній стінці ванни розплаву, тече по поверхні дна, плавно піднімаючись до поверхні по металу, що затвердів раніше, завихрюючись від поверхні до центра потоку рідкого металу. Після цього метал кристалізується й остигає. При подачі порошку в ванну розплавленого металу, він забирається потоком розплаву, безперервно механічно й дифузно змішуючись із ним на всьому шляху до кристалізації. У поперечному напрямку руху лазерного випромінювання утворюються інші потоки розплавленого металу, а також два потоки, спрямовані від периферії ванни розплаву до поверхні, збираючись у центрі зони на поверхні. Потім два потоки рухаються по осі пучка в глиб зони, розділяючись знову на два, та завихрюючись у центральній частині своєї половини ванни розплаву. Відповідні потоки мають місце, коли основна маса розплавленого металу утворюється за рахунок подачі порошку. Результатом механічного перемішування розплавленого порошку, процесів дифузії, структурних перетворень при застиганні металу, що закристалізувався, утворюється валик наплавлення деякого розміру і форми.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

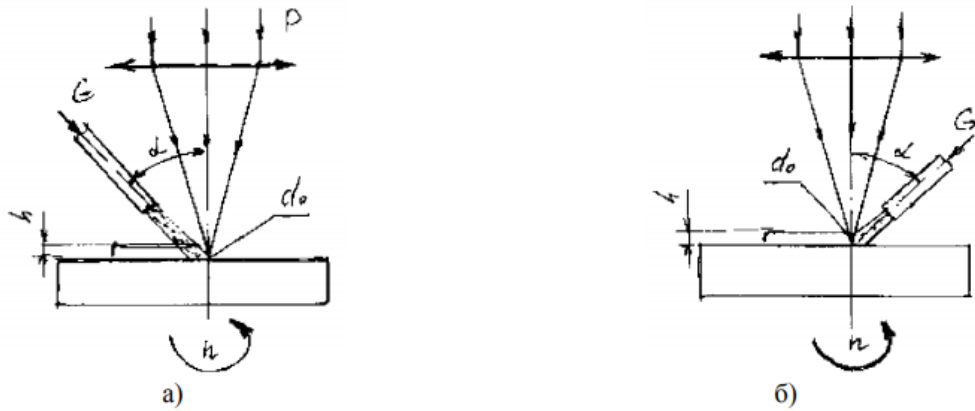


Рисунок 1.13 Схема подачі порошку в слід (а) і назустріч (б) руху оброблюваної деталі.

1.14 Технологічний процес лазерного наплавлення

1.14.1 Порошковий матеріал для наплавлення

Для формування покриттів при відновленні деталей машин однокомпонентну порошкову шихту (із хімічної сполуки, чистого металу або сплаву) використовують рідко. Це пов'язане з властивостями структурного стану й особливостей спечених порошкових матеріалів.

Високу зносостійкість при різних умовах зношування показують композиційні матеріали із двох, трьох і більше компонентів. Їхній вибір заснований на правилі Шарпі, при використанні квазірівновагових композицій в макро й мікрообсягах поверхневих шарів. Структура таких сплавів гетерогенна і утворена із часток тугоплавких з'єднань, пов'язаних ділянками більш м'якої цементуючої фази. Зносостійкість таких матеріалів визначається зносостійкістю м'якої основи, міцністю зв'язку твердих включень із основою, їхніми кількістю розмірами, формою, розмірами й характером розподілу включень в основі. У спечених нерівновагих твердих сплавів зносостійкість завжди вище, ніж у сплавів такого ж хімічного складу, але отриманого наплавленням.

Порошки, що самофлюсуються, такі як ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4, ПГ-10Н-01; ПГ-10ДО-01; ПГ-10Н-04 дозволяють без застосування захисної атмосфери отримувати поверхневі шари задовільної якості, без тріщин із шорсткістю

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

поверхні Rz 20 - 34 мкм. Хімічний склад і характеристика твердості деяких матеріалів для наплавлення наведена в табл. 2.

Таблиця 2. Хімічний склад і характеристика твердості деяких матеріалів для наплавлення

Марка матеріалу	C	Cr	Si	B	Ni	W	V	Mo	Co	HRC
ПГ-СР2	0,3	13	3	2	остальн	-	-	-	-	35
ПГ-СР3	0.6	15	3.5	2.5	“-”	-	-	-	-	45
ПГ-СР4	0.8	17	4	3.5	“-”	-	-	-	-	55
СНГН-50	0.6	14	3.4	3	“-”	-	-	-	-	47
СНГН-60	1.0	18	4.5	4.5	“-”	-	-	-	-	58
ПГ-ХН80СР2	0.5	14	2.5	2	“-”	-	-	-	-	42
110Х28Д063У4	1.1	28	-	-	-	4	-	-	ост	42
50Х32Д044У1	2.5	32	-	-	-	17	-	-	“-”	58
5Х27Д061М5Н3	0.25	27	-	-	3	-	-	5	“-”	20

1.14.2 Технологічні схеми наплавлення

У процесі вибору оптимальної технологічної схеми обробки необхідно уточнити перелік технологічних факторів (рис.1.14.2.1), у тому числі: напрямок подачі порошку щодо руху заготовки.

Одним з найекономічніших варіантів подачі порошку є схема, при якій потік порошку подається у передню стінку ванни розплавленого металу, тобто в слід лазерного променя. Приймаємо кут подачі порошку рівним 45°.

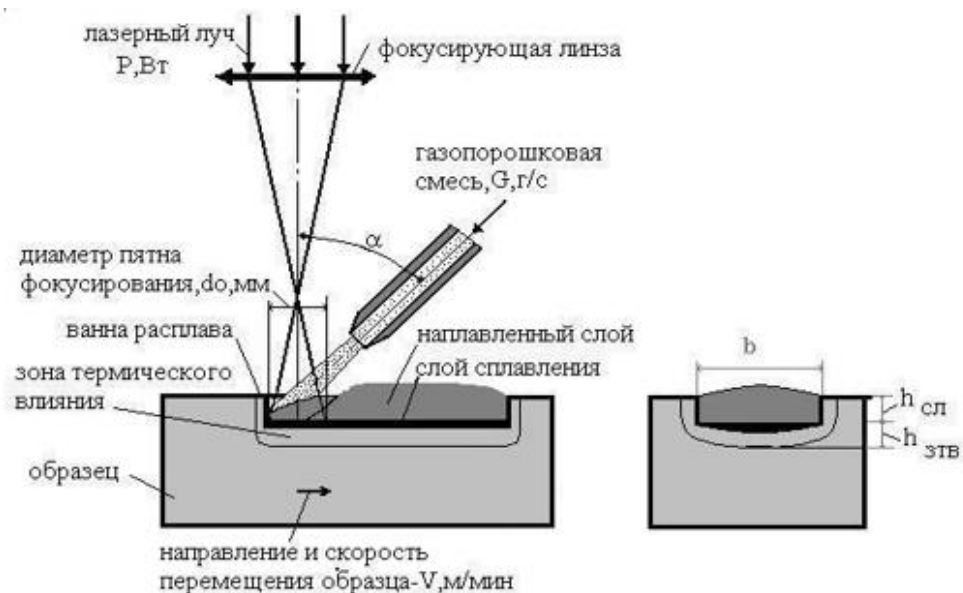


Рисунок.1.14.2.1 Схема лазерного газопорошкового наплавлення

Величина відстані від зрізу сопла що подає порошок до осі лазерного пучка по напрямку подачі порошку.

З огляду, що величина факела розпилювання порошку не повинна перевищувати 3мм, приймаємо величину відстані $L = 10\text{мм}$.

Діаметр порошку, що подає сопло.

Розмір перерізу сопла визначається будовою дозатора й розмірами плями фокусування лазерного випромінювання. Враховуючи ці міркування приймаємо розмір сопла $d_c = 1,8\text{ мм}$.

Коефіцієнт перекриття наплавлених валиків.

Для досягнення мінімальної шорсткості поверхні й рівномірності наплавленого шару по глибині, з урахуванням продуктивності обробки, приймаємо коефіцієнт перекриття $K_n = 0,7$.

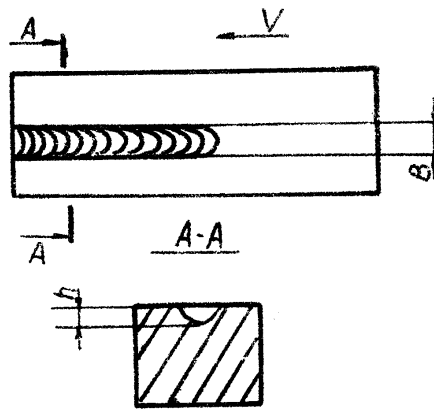
Кінематична схема обробки.

Серед деяких можливих схем обробки можна розібрати, схеми представлені нижче.

1. Лазерне наплавлення за лінійною схемою.

Обробка виконується безперервним розфокусованим лазерним випромінюванням при однокоординатному переміщенні оброблюваної деталі.

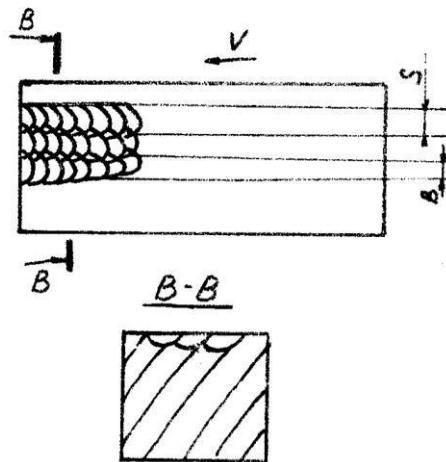
					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Лінійна схема лазерного наплавлення

2. Лазерне наплавлення за площинною схемою.

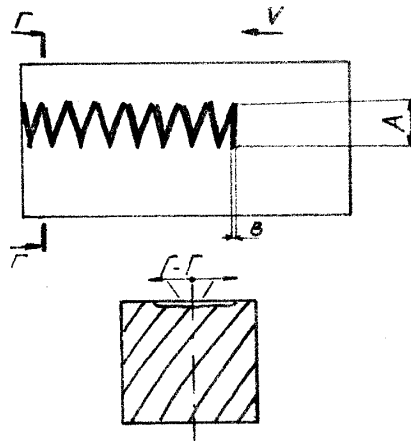
Обробка проводиться в безперервному або імпульсному режимі роботи лазера, при якій кожна наступна зміцнена зона переміщується щодо попередньої на певний крок по одній або двох осях, відповідно для безперервного й імпульсного випромінювань, (рис.1.15.2.3).



Площинна схема наплавлення імпульсним лазерним випромінюванням.

3. Лазерне наплавлення скануючим променем.

Обробка відбувається при двохкоординатному русі лазерного променя щодо деталі по заданій траєкторії сліду взаємодії



Лазерне наплавлення скануючим променем

4. Лазерне наплавлення по твірній.

При цьому методі обробки деталь зі швидкістю наплавлення переміщується відносно лазерного променя уздовж своєї осі, періодично, після повертаючись кожного проходу на дискретний кут, що відповідає обраному кроку обробки й, відповідно до прийнятому коефіцієнту перекриття.

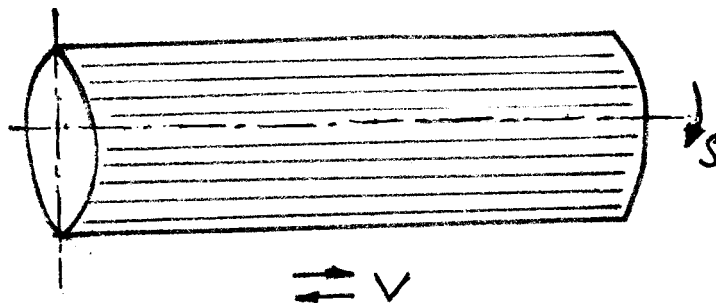


Схема лазерного наплавлення по твірній

Основними мінусами цієї схеми є:

- переривання випромінювання і подачі порошку після кожного проходу;
- на межах можуть з'являтися крайові ефекти, що пов'язані з накопичуванням тепла й зміною умов тепловідведення, що призводять до виплеску розплавленого металу та збільшенню мікронерівностей;
- під кінець обробки, останній валик може значно змінювати мікронерівності, шорсткість поверхні, тобто і припуск під наступну механічну обробку;
- потрібен спеціальний пристрій або система ЧПК, для повороту

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

деталі на дискретний кут.

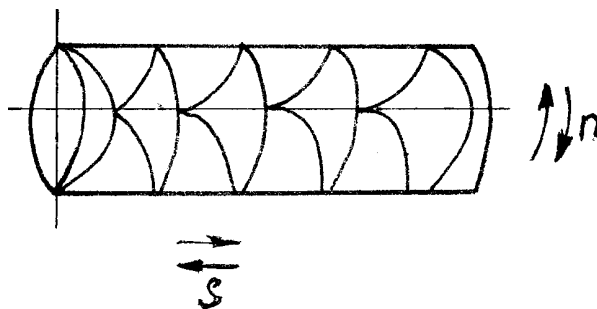
- направлення наплавлених валиків і зон взаємного перекриття зі зміненою структурою не збігається з напрямком дії сили тертя в зоні контакту із сполученою деталлю.

5.Лазерне наплавлення по кільцю з реверсивним обертовим рухом.

Згідно цієї схеми, деталь обертається навколо своєї осі з лінійною швидкістю наплавлення, періодично з урахуванням обраного кроку обробки, після кожного кільця зміщаючись дискретно уздовж осі.

Основні недоліки цього методу:

- лазерного випромінювання і переривання подачі порошку;
- підвищення шорсткості поверхні в місцях повторного наплавки на кільці;

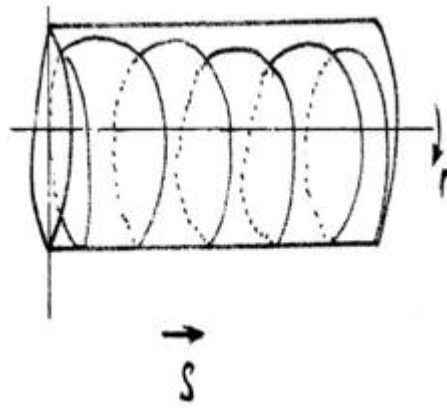


Лазерне наплавлення по кільцю з реверсивним обертовим рухом

6.Лазерне наплавлення по спіралі.

В цій ситуації можна розглянути кілька схем одочасно: обробка по однозахідної спіралі, обробка по звичайній гвинтовій спіралі, й обробка по багатозахідної спіралі, коли крок гвинтової лінії становить довжину оброблюваного циліндра.

В даних схемах обробки деталь робить погоджені обертовий рух навколо своєї осі й поступальне - уздовж її, це забезпечує потрібне значення лінійної швидкості наплавлення. Дана схема обробки позбавлена недоліків, характерних для вище розглянутих. Тому приймаємо її в якості робочої.



Лазерне наплавлення по спіралі

1.14.3 Вплив технологічних параметрів лазерного наплавлення на розмірні характеристики й структурно-фазовий стан наплавлених шарів

Задля встановлення закономірностей зміни розмірів, твердості, структури й фазового складу наплавлених шарів від режимів опромінення, витрати порошку, його складу, технологічної схеми наплавлення робили експериментальні дослідження. На зразки зі сталі 45 і жароміцного сплаву ЖС6К інжекційним способом при різних умовах опромінення наплавлялися шари з різних сплавів ПГ-СР4, ПС-12НВК, ХТН, TiC й B_4C . Оброблені зразки аналізувалися різними методами. На рис 1.14.3.1 приведені результати дослідження зміни розмірних характеристик наплавлених шарів.

У загальному випадку характер залежностей значною мірою визначається хімічним складом порошку для наплавлення. При цьому деякі залежності носять однозначний характер, інші - більш складний. Покриття із самофлюсуючих сплавів ПГ-СР4 і ПС-12НВК відрізняються плавною зміною ширини наплавлених валиків зі густини потужності випромінювання й зміною швидкості обробки. Покриття з Ti мають значно меншу товщину при рівних умовах опромінення, різняться великою пористістю та нерівномірністю.

Порівнюючи різні схеми подачі порошкових матеріалів у зону лазерного випромінювання показало, що схема подачі порошкового

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

матеріалу в слід лазерного променя в порівнянні з - назустріч променю на 25- 30% більш економічно по витратах енергії випромінювання й на (10-15%) економічніше по використанню порошкового матеріалу. Оцінка проводилася по коефіцієнту використання порошку і питомій енергії наплавлення.

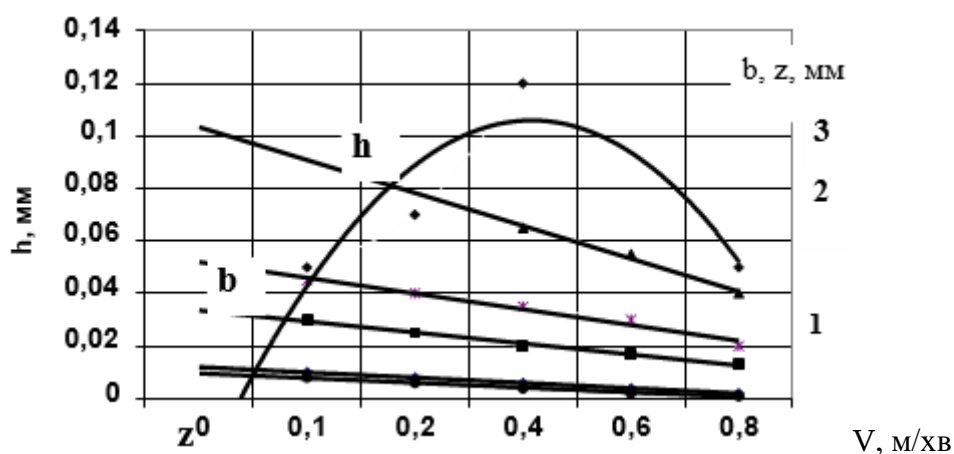


Рисунок 1.14.3.1 Зміна розмірних характеристик наплавленого шару сплаву ПС12НВК залежно від швидкості наплавлення при різних діаметрах плями фокусування: $P=1,5$ кВт; $d_1=1,5$ мм, $d_2=2,0$ мм; $G=0,4$ г/с.

В схемі майже завжди присутній шар сплавлення покриття з основою, що забезпечує металургійний зв'язок. При введенні порошку назустріч променю можна отримувати покриття великої товщини, до 2-3 мм за один прохід, але в даному випадку складно забезпечити достатню міцність зчеплення покриття з основою. Для цього необхідні підвищені потужності лазерного випромінювання - 3-5 кВт. Тож в даній роботі в якості основний прийнята перша схема наплавлення.

Мікроструктура наплавлених валиків з порошкових нікель-хром-бор-кремнієвих сплавів різняться високою дисперсністю, має виражену дендритну будову. Між дендритами й осередками γ -фази, кількість якої залежить здебільшого від змісту вуглецю й бора в сплаві, розташовані включення евтектики $\gamma+Ni_3B$ і скупчення високодисперсних карбідів типу $Cr_{23}C_6$. Також змінюється мікротвердість наплавлених валиків залежно від складу

порошкового матеріалу й становить для ПГ-СР4 - 7500-8500 МПа; ПС12НВК - 8000-10000 МПа.

На рис.1.9.3.2 й 1.9.3.3 зображені залежності мікротвердості наплавлених валиків з порошків Тi, ПГ-СР4 і ПС12НВК від швидкості обробки. Як видно на графіках, вплив швидкості обробки спостережується, але незначно. В основному твердість наплавленого шару визначається структурно-фазовим складом вихідного порошкового матеріалу.

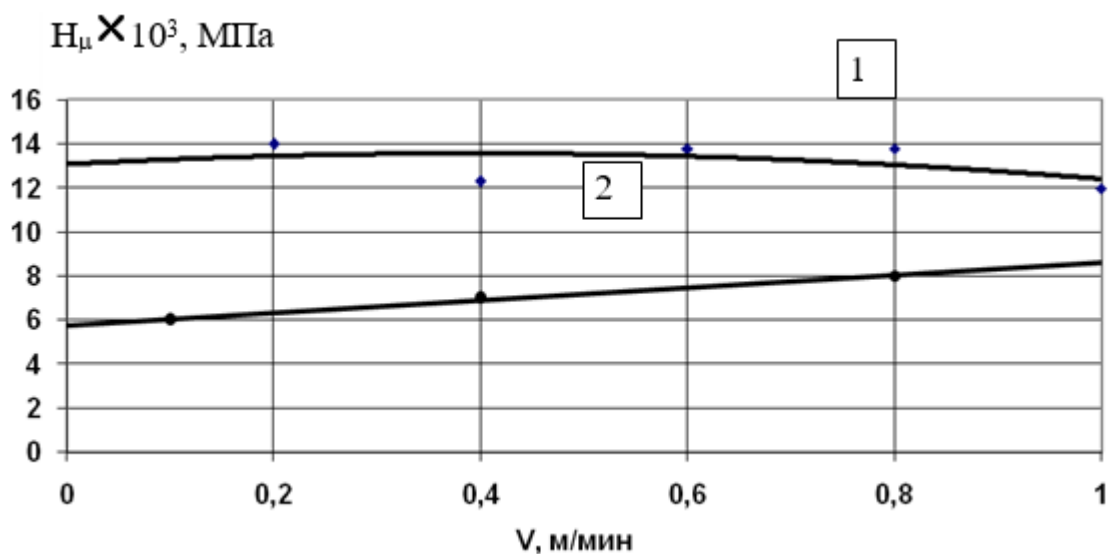


Рисунок 1.14.3.2 Вплив швидкості лазерної обробки на мікротвердість наплавленого сплаву

Тi (1), ПГ-СР4 (2): Р = 1,5 кВт.

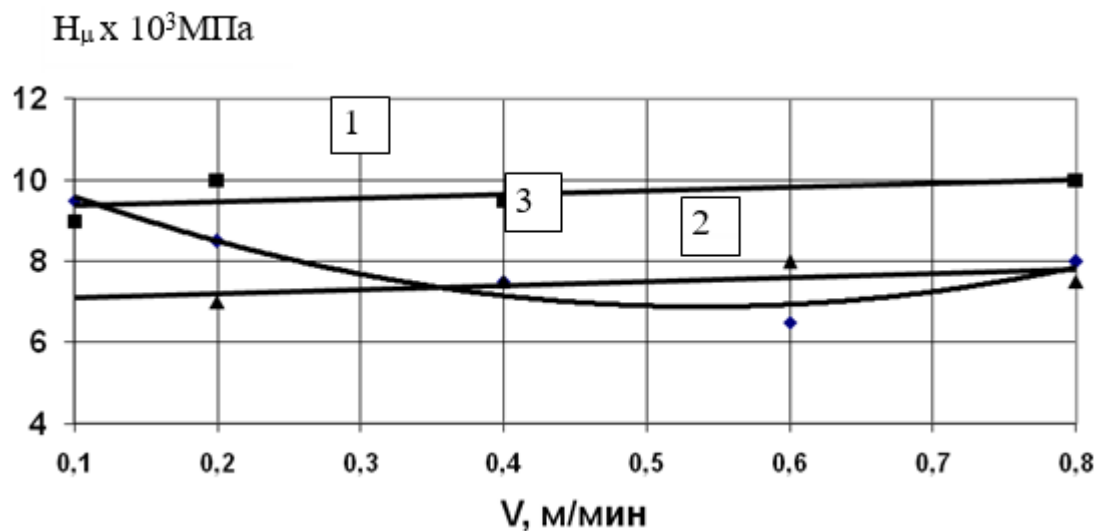


Рисунок. 1.14.3.3 Вплив швидкості лазерної обробки на мікротвердість наплавленого сплаву

ПС12НВК: P = 1,5 кВт; G = 0,4 г/с; d₀ = 1,5 мм (2), d₀ = 2,0 мм (1), d₀ = 2,5 мм (3).

На рис.1.9.3.4 показаний розподіл мікротвердості по глибині наплавлення для трьох сплавів. Максимальну твердість має наплавлений шар з Ti - 14000 МПа. Проте застосовувати цей сплав для наплавлення практично не можливо через велику кількість тріщин, пор, мікро- і макронерівностей. Для використання цього матеріалу для наплавлення в його склад необхідно додати речовини, що збільшують рідинно-текучість і змочують властивості розплаву, а також пластифікатори для релаксації виникаючих напруг і виключення утворення тріщин.

$H_{\mu} \times 10^3 \text{ МПа}$

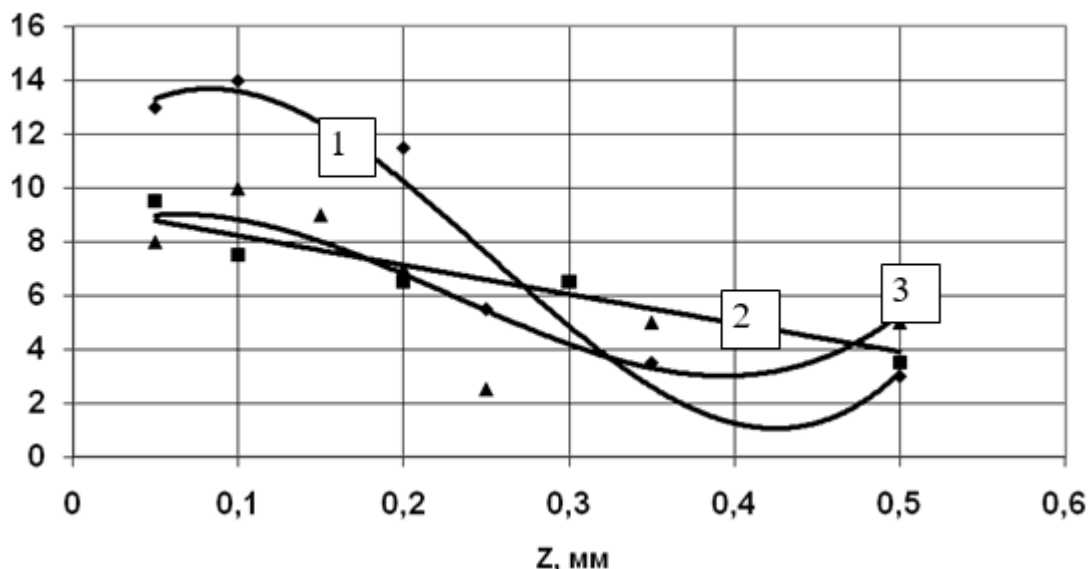


Рисунок.1.14.3.4 Розподіл мікротвердості по глибині наплавленого сплаву Ti(1), ПС12НВКС1(2), ПГ-СР4(3): $P=1,5 \text{ кВт}$, $G=0,4 \text{ Г/с}$, $d_0=2,0 \text{ мм}$, $V=0,4 \text{ м/хв}$.

При аналізі структур наплавлень було виявлено що, чим більше густина потужності й швидкість обробки, тим більше проявляються тріщини.

По характеру розташування тріщин можна зробити висновок, що при малих швидкостях наплавлення тріщини виникають переважно в поверхневому шарі, а при підвищених - у зоні сплавлення.

Як видно із залежностей для ПГ-СР4 і ПС12НВК мікротвердість у наплавленому шарі по глибині змінюється досить плавно. У зоні сплавлення вона становить- 4000 МПа. Структура перехідного шару плавно змінюється від структури наплавленого валика до структури матеріалу підкладки. Це свідчить про високу пластичність зони з'єднання наплавленого валика з основою. Про це говорять також дані електронно-зондового аналізу розподілу ряду легуючих елементів (Cr, Ni, B, Si, Fe, Mn) у перехідному шарі.

Велика заінтересованість із погляду підвищення зносостійкості деталей, що працюють при дії високих температур і агресивних середовищ, представляють порошкові наплавочні матеріали на залізній основі типу ВТН (12Х18Н10Т- Ti_2 -VC), ХТН (12Х18Н10Т- Ti_2 -Cr₂) і порошок B_4C .

Ці порошки наносилися методом лазерного інжекційного наплавлення на поверхню зразків зі сталі 45, сплаву ЖС6К. При потужності лазерного випромінювання $P=1,5$ кВт, $d_0=2$ мм, витраті порошку $G=0,1-0,5$ г/с, швидкостях обробки 0,2-0,8 м/хв забезпечувалася товщина наплавлених шарів за один прохід 0,05-0,2 мм.

При наплавленні на жароміцний сплав ЖС6К порошкового матеріалу ХТН, основою якого є нержавіюча сталь 12Х18Н10Т, а зміцнюючими фазами Ti_2 й Cr_2 , утворився характерний валик зі структурою литого сплаву, дендрити якого орієнтовані в сторону максимального тепловідведення. Металографічні дослідження показали, що наплавлені шари сплаву ХТН мають високодисперсну структуру. Здібленість надлишкових кристалів зміцнюючих фаз й евтектики значно вище, ніж у плазових покриттів. У наплавлених шарах спостерігаються подібні до мартенситних голок ділянки підвищеної тривалості..

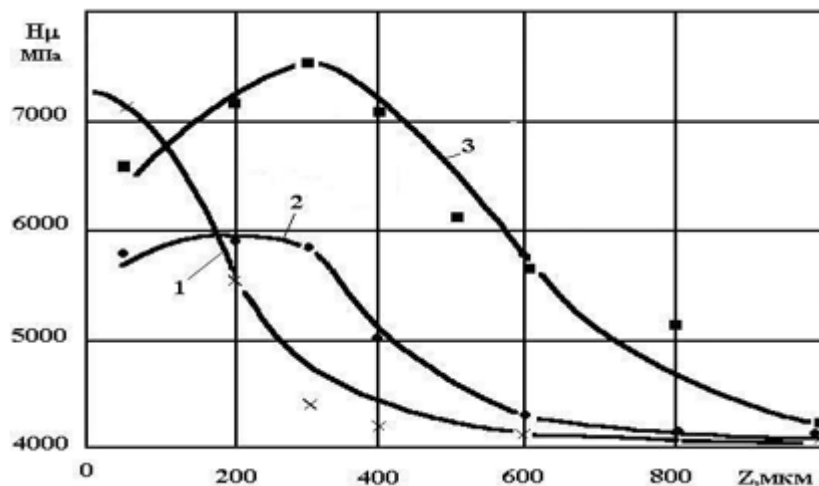


Рисунок. 1.14.3.5 Розподіл мікротвердості по глибині наплавленого шару ХТН при різних умовах опромінювання 1 – $W_p = 6$ кВт/см², $V = 0,2$ м/хв; 2 – 11 кВт/см², 3 – 25 кВт/см².

Вони характеризують собою евтектичні локальні ділянки з дисперсною структурою. Зміцнюючі фази й γ -фаза орієнтовані в напрямку тепловідведення. Величина швидкості охолодження в приповерхневих шарах, розрахована по товщині кристалів зміцнюючої фази і становила

приблизно $5 \times 10^4 \dots 10^5$ °C/с. Зі збільшенням відстані від поверхні дисперсність структури зменшується, збільшуються розміри кристалів зміцнюючих фаз. Мікротвердість структури по глибині наплавленого шару змінюється плавно, та залежить від режимів обробки й становить 7000-7500МПа. Твердість наплавлених шарів зростає зі збільшенням ступеня дисперсності їх структурним складових, зростанням частки більш твердої евтектики й твердості матриці.

Електроннозондовий аналіз виявив, що вихідний сплав має неоднорідну структуру, для якої характерна ліквіація вхідних у сплав компонентів і наявність міждендритних зон й розмірах самих дендритів та дрібних включень карбідних фаз. Міжосьові простори в сплаві збагачені хромом і титаном. Вольфрам і кобальт більшою мірою концентруються в осях дендритів; молібден й алюміній ліквують мізерно виділення, що спостерігаються в міждендритних зонах, становлять собою карбіди типу MeC різного складу. Частинок білих кольорів на зображенні в поглинених електронах мають невеликий середній атомний радіус, тобто містять в основному більш легкі, ніж матриця елементів. Чорні включення містять значну кількість важких елементів - вольфраму й молібдену. Досить різке розходження в складі зазначених включень характеризується на відсутності у цьому випадку області їхньої взаємної розчинності.

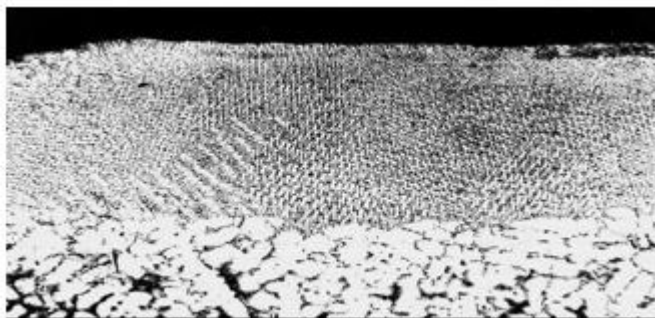


Рисунок. 1.14.3.6 Мікроструктура наплавленого шару B_4C , плакованого Ni і Al.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

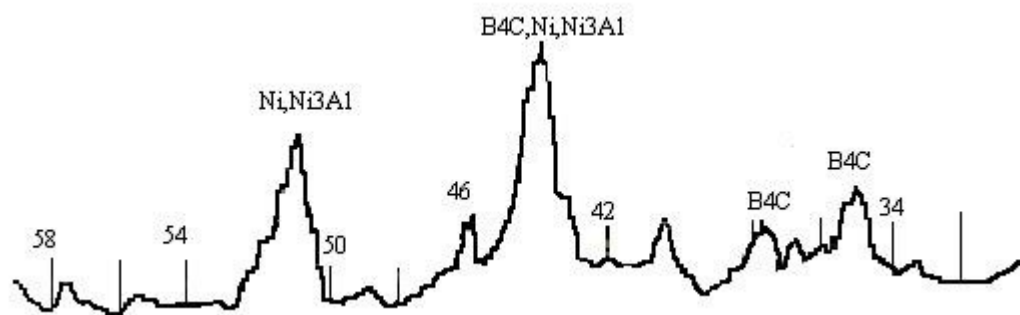


Рисунок. 1.14.3.7 Фазовий склад шару сплавлення покриття B_4C і сплаву ЖС6К.

На дифрактограмах, знятих із шару сплавлення, поряд з лініями Ni видно лінії Fe_α і $Fe\gamma$.

Наплавлення порошку B_4C , плакованного $Ni+Al$, простежується сильним поглинанням лазерного випромінювання. Валик, що утвориться, має рівномірну уздовж напрямку обробки ширину й висоту та має характерний металевий блиск і низьку шорсткість поверхні. Структура шару має високодисперсне блочно-комірчасту будову при наявності більших за обсягом напрямку закристалізованих зон. Сітка зміцнюючої фази являє собою міжзеренні межі, як значно дисперсніші, ніж в основному матеріалі. Легуючі елементи в наплавленому шарі розподілені рівномірно, що вказує на збільшений зміст бора. Рентгенографічні дослідження підтверджують присутність у наплавленому шарі фази B_4C (рис. 1.14.3.7).

В області зони сплавлення є дрібні виділення карбіду типу MeC , інтенсивна сегрегація по границях зерен W . На це вказують дані електроннозондового аналізу в поглинених електронах. Крім того, по границях зерен також є виділення ультрадисперсних часток бориду хрому. Невеликі розміри боридних часток не дали змогу визначити їхній склад й ідентифікувати тип боридів. Структура наплавленого шару має значно більшу мікротвердість 6000-6500 МПа, що рівномірно знижується по глибині (рис. 1.14.3.8). У зоні сплавлення спостерігається значне вирівнювання концентрації легуючих елементів, що сприятливо має позначитися на міцностних властивостях наплавлених шарів.

Підсумовуючи наведені вище результати можна зробити висновок, що

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

структури, які утворюються в поверхневому шарі, як при наплавленні ХТН, так й B_4C , можуть знижувати швидкість процесів рекристалізації, що протікають у сплаві ЖС6К при температурах 750 - 900 °С та приводять до зниження жароміцностних показників матеріалу, і з урахуванням підвищення твердості, як наслідок, до росту його зносостійкості в умовах високих температур.

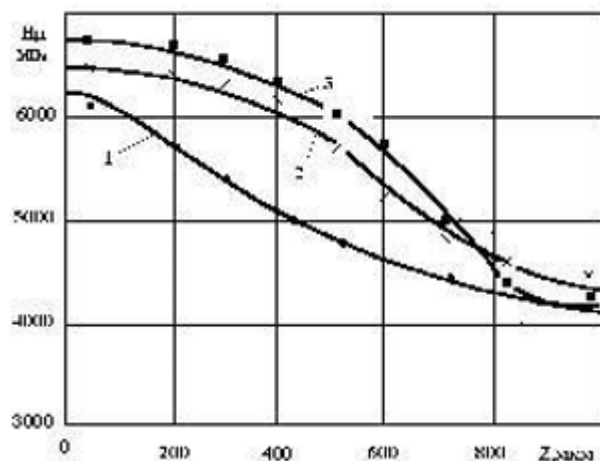


Рисунок. 1.14.3.8 Вплив щільності потужності лазерного випромінювання й швидкості обробки на розподіл мікротвердості по глибині наплавленого шару B_4C : 1) W_p – 25 кВт/см², V – 2 м/хв; 2) W_p – 6 кВт/см², V – 0,8 м/хв; 3) W_p – 25 кВт/см², V – 0,6 м/хв.

Технологічна частина

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.Розробка комбінованого технологічного процесу лазерного наплавлення

2.1 Розрахунок режимів обробки.

Вихідні дані:

Потужність лазерного випромінювання	$P_0 = 2,8 \text{ кВт};$
Коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання	$A = 0,7$
Величина наплавляемого шару	$h_n = 0,05 \text{ см}$
Наплавляемый матеріал:	Бр ОЦС-10 (порошок)
Склад: $\text{Cu} = 79 \text{ \%}; (\text{Zn} = 0,9-1,1\%) \text{ Pb} = 9,9-10,1) (10 \text{ \% домішки} - 1 \text{ \%})$	
Температура плавлення:	$T_{\text{пл.}} = 980^\circ\text{C}$
Температура кипіння:	$T_{\text{кип.}} = 1740^\circ\text{C}$
Коефіцієнт теплопроводності:	$a = 0,21 \text{ см}^2/\text{с}$
Коефіцієнт теплопроводності:	$\lambda = 3,10 \text{ Вт/см} \cdot \text{град}$
Питома теплоємність:	$C_\phi = 1,67 \text{ Дж/ см}^3 \cdot \text{град}$
Густина:	$\rho = 8,95 \text{ г/см}^3$
Матеріал підкладки – СЖ6Ф:	
Температура плавлення:	$T_{\text{пл.}} = 1300^\circ\text{C}$
Температура кипіння:	$T_{\text{кип.}} = 2470^\circ\text{C}$
Коефіцієнт теплопроводності:	$a = 0,07 \text{ см}^2/\text{с}$
Коефіцієнт теплопроводності:	$\lambda = 0,314 \text{ Вт/см} \cdot \text{град}$
Питома теплоємність:	$C_\phi = 4,485 \text{ Дж/ см}^3 \cdot \text{град}$

При лазерному наплавленні потрібно, щоб наплавлюваний порошок Бр ОЦС-10 плавився, але не закипав, судячи з цього максимальна температура на поверхні виробу повинна бути $T_{\text{max}} = 1700^\circ\text{C}$, тобто нижче температури кипіння бронзи.

З іншого боку необхідно, щоб розплавлявся матеріал підкладки, для зв'язування бронзи зі сталлю. Отже мінімальна температура на поверхні деталі повинна бути більше температури плавлення сталі, тобто $T_{\text{пл.}} = 1350^\circ\text{C}$. Коефіцієнт теплопроводності і температуропровідності вибираємо

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

для бронзи.

Визначаємо необхідний час дії теплового джерела:

$$t_n = \frac{\pi h_n^2}{4a} \left(\frac{T_{max}}{T_{max} - T_{пл}} \right)^2 = \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4 \cdot 0,21} \left(\frac{1700}{1700 - 1350} \right)^2 = 0,021 \text{ с}$$

Визначаємо значення функції F (z):

$$F(z) = \frac{4AP_0}{\pi^2 \lambda h_n} \cdot \frac{T_{max} - T_{пл}}{T_{max}^2} = \frac{4 \cdot 0,7 \cdot 2800}{3,14^2 \cdot 3,1 \cdot 0,05} \cdot \frac{350}{1700^2} = 2,6$$

За графіком визначаємо значення z = 2 і поправочний коефіцієнт $\wp(z) = 0,7$

Визначаємо радіус лазерного пучка:

$$r_0 = \left(\frac{\wp \cdot A \cdot P_0 \cdot h_n}{\pi \cdot \lambda \cdot (T_{max} - T_{пл.})} \right)^{1/2} = \sqrt{\frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 2800 \cdot 0,05}{3,14 \cdot 3,1 \cdot (1700 - 1350)}} = 0,142 \text{ см}$$

Тоді діаметр лазерного променя становитиме $d_0 = 0,284 \text{ см}$

Знаходимо швидкість обробки:

$$g = \frac{2r_0}{t_n} = \frac{2 \cdot 0,142}{0,221} = 1,29 \frac{\text{см}}{\text{с}} = 0,774 \text{ м/хв}$$

Визначаємо величину наплавленого валика:

$$b_n = \left(1 - \left(\frac{T_{пл}}{T_{max}} \right)^4 \right)^{1/2} = 0,284 \left(1 - \left(\frac{1350}{1700} \right)^4 \right)^{1/2} = 0,222 \text{ см}$$

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Знаходимо ефективну щільність потужності на поверхні оброблюваної деталі:

$$W_p^{\text{еф}} = \frac{\rho \cdot A \cdot P_0 \cdot 4}{\pi d_0^2} = \frac{0,7 \cdot 0,7 \cdot 2800 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,284^2} = 21670 \text{ Вт/см}^2$$

Визначимо залежність величини наплавляемого шару від швидкості обробки.

Температура на глибині 0,05: $T(0,05;t) = 13500\text{C}$;

Діаметр плями на поверхні деталі: $d_0 = 0,284 \text{ см}$;

Час обробки

$$t_H = \frac{d_0}{g} = \frac{0,284}{g}$$

Максимальна температура на поверхні деталі:

$$T_{\text{max}} \frac{W_p^{\text{еф}}}{\lambda} \sqrt{\frac{4at}{\pi}} = \frac{21670}{3,1} \sqrt{\frac{4 \cdot 0,21t}{3,14}} = 6990 \sqrt{0,267t}$$

Максимальна величина наплавляемого шару:

$$h_H^{\text{max}} = \sqrt{\frac{4at_H}{\pi}} \cdot \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{пл}}}{T_{\text{max}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,21t}{3,14}} \cdot \frac{T_{\text{max}} - 1350}{T_{\text{max}}} = \sqrt{0,267} \frac{\Delta T}{T_{\text{max}}}$$

Швидкість обробки буде змінюватися: $g = 1,2 - 2,1 \text{ см/с}$

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Результати обчислень записуємо в табл. 3:

$$d_0 = 0,284 \text{ мм}$$

$$P = 2800 \text{ Вт}$$

Таблиця 3. Результати обчислень.

Швидкість обробки v , см/с	Час обробки t_n , с	Температура на поверхні $T_{\max}$ °C	Величина наплавляемого шару $h_n^{\max}$, см
1,2	0,237	1758	0,060
1,29	0,221	1700	0,050
1,4	0,201	1619	0,037
1,5	0,189	1570	0,029
1,6	0,178	1524	0,022
1,7	0,167	1576	0,015
1,8	0,158	1437	0,010
1,9	0,149	1394	0,005
2,0	0,142	1362	0,001
2,1	0,135	1328	-----

Аналогічно розраховуємо режими обробки і величину наплавлюваного шару для різних значень діаметра пучка на поверхні деталі.

Результати обчислень записуємо до табл. 4-7.

$d_0 = 0,2 \text{ см}$ $P = 2800 \text{ Вт}$

Таблиця 4. Результати обчислень.

$\vartheta, \text{ см/с}$	$t, \text{ с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$h, \text{ см}$
1,5	0,133	1317	----
1,4	0,142	1361	0,002
1,3	0,155	1422	0,010
1,2	0,166	1472	0,017
1,1	0,182	1540	0,028
1,0	0,200	1615	0,038
0,9	0,222	1702	0,050

$d_0 = 0,3 \text{ см}$

Таблиця 5. Результати обчислень.

$\vartheta, \text{ см/с}$	$t, \text{ с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$h, \text{ см}$
1,3	0,231	1735	0,055
1,4	0,214	1671	0,046
1,5	0,200	1615	0,038
1,6	0,188	1564	0,030
1,7	0,176	1517	0,023
1,8	0,167	1474	0,018
1,9	0,158	1435	0,012
2,0	0,150	1399	0,006
2,1	0,143	1365	0,002

$d_o = 0,35 \text{ см}$

Таблиця 6. Результати обчислень.

ϑ , см/с	t, с	T, °C	h, см
1,5	0,233	1744	0,057
1,6	0,219	1689	0,048
1,7	0,206	1639	0,041
1,8	0,194	1593	0,035
1,9	0,184	1550	0,028
2,0	0,175	1511	0,023
2,1	0,167	1475	0,018
2,2	0,159	1441	0,013
2,3	0,151	1409	0,008
2,4	0,146	1379	0,004
2,5	0,140	1351	0,0005

$d_o = 0,25 \text{ см}$

Таблиця 7. Результати обчислень.

ϑ , см/с	t, с	T, °C	h, см
1,1	0,227	1722	0,054
1,2	0,208	1648	0,043
1,3	0,192	1584	0,033
1,4	0,178	1526	0,025
1,5	0,167	1475	0,018
1,6	0,156	1428	0,011
1,7	0,147	1385	0,005
1,8	0,139	1346	-----

2.2 Визначення витрати дозатора

Величина наплавленого шару – $h_n = 0,05$ см

Діаметр наплавленого валика – $\phi_n = 0,222$ см

Густина матеріалу – $\rho = 8,95$ г/см³

Коефіцієнт використання порошку – $K_{н.п.} = 0,5$

Об'єм наплавленого валика:

$$V_n = \frac{\pi \cdot \phi_n^2}{4} \cdot h_n = \frac{3,14 \cdot 0,222^2}{4} \cdot 0,05 = 1,94 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$$

Маса наплавленого валика:

$$m_n = V_n \cdot \rho = 1,94 \cdot 10^{-3} \cdot 8,95 = 0,0174 \text{ г}$$

Витрата дозатора:

$$G = \frac{m_n}{T_n \cdot K_{н.п.}} = \frac{0,0174}{0,221 \cdot 0,5} = 0,098 \text{ г/с}$$

Визначимо залежність висоти наплавленого валика від витрати порошку:

$$h_n = \frac{4 t_n \cdot K_{н.п.}}{\pi \phi_n^2 \cdot \rho} \cdot G = \frac{4 \cdot 0,221 \cdot 0,5}{3,14 \cdot 0,222^2 \cdot 8,95} = 0,5116$$

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Результати обчислень записуємо в табл. 8.

Таблиця 8. Результати обчислень.

Витрата порошку G, г/с	Висота валика h_H , см
0,05	0,026
0,06	0,031
0,07	0,036
0,08	0,041
0,09	0,046
0,10	0,051
0,11	0,056
0,12	0,061
0,13	0,066
0,14	0,071
0,15	0,076
0,16	0,081
0,18	0,091
0,20	0,101

$$t_H = 0,221; \quad \theta_H = 0,222; \quad \vartheta = 1,29 \text{ см} / \text{с}$$

Аналогічно попередньому розрахунку знаходимо залежність величини наплавленого шару від витрати порошку при різних швидкостях обробки та вносимо результати до таблиць 9-13.

$$\vartheta = 0,9 \text{ см/с} : t = 0,221 \text{ с}; d = 0,199; \varphi = 0,155 \text{ см}; h = 1,056G.$$

Таблиця 9. Витрати порошку при різних швидкостях обробки

Витрата по G, г/с	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Висота валика h, см	0,042	0,052	0,063	0,074	0,085	0,095	0,105

$$\vartheta = 1,0 \text{ см/с} : t = 0,221 \text{ с}; d = 0,221; \varphi = 0,172 \text{ см}; h = 0,855G$$

Таблиця 10. Витрати порошку при різних швидкостях обробки

G, г/с	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
h, см	0,034	0,043	0,051	0,06	0,068	0,077	0,086	0,094	0,10

$$\vartheta = 1,5 \text{ см/с} : t = 0,221 \text{ с}; d = 0,332; \varphi = 0,258 \text{ см}; h = 0,378G$$

Таблиця 11. Витрати порошку при різних швидкостях обробки

G, г/с	0,04	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24
h, см	0,015	0,019	0,026	0,034	0,038	0,042	0,045	0,049	0,053	0,057	0,061	0,068	0,076

$$\vartheta = 1,7 \text{ см/с} : t = 0,221 \text{ с}; d = 0,376; \varphi = 0,292 \text{ см}; h = 0,295G$$

Таблиця 12. Витрати порошку при різних швидкостях обробки

G, г/с	0,04	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24
h, см	0,012	0,015	0,02	0,027	0,032	0,038	0,044	0,047	0,05	0,053	0,059	0,065	0,071

$$\vartheta = 2,0 \text{ см/с} ; t = 0,221 \text{ с}; d = 0,442; e = 0,344 \text{ см}; h = 0,213G$$

Таблиця 13. Витрати порошку при різних швидкостях обробки

G, г/с	0,04	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,25
h, см	0,008	0,011	0,019	0,021	0,021	0,026	0,03	0,034	0,038	0,043	0,047	0,051	0,053

Аналізуючи розрахунки, обираємо необхідні режими лазерного наплавлення.

Для кожної величини наплавлюваного валика необхідно змінити витрату з урахуванням зміни часу дії лазерного випромінювання, тому що швидкість визначається при різних часах обробки, а витрата при одному $t = 0,221 \text{ с}$.

$$Z = Z_1 \cdot K,$$

де Z - щира витрату порошку;

Z_1 – витрату порошку з рис. 3.4.;

K - коефіцієнт враховуюча змінна часу обробки;

$$K = \frac{t}{t_1}; \quad t = 0,221 \text{ с}$$

$$t_1 = \frac{d}{\vartheta_1} - \text{визначається в залежності від швидкості обробки } \vartheta_1 .$$

$$h=0,01: t = \frac{0,284}{1,8} = 0,158; K = \frac{0,221}{0,158} = 1,399; C = 0,019 \cdot 1,399 = 0,026$$

2.3 Системи подавання матеріалу, що наплавляється

2.3.1 Живильники-дозатори порошкових матеріалів

Дозувальні пристрої порошкових матеріалів класифікують відповідно до структури технологічного процесу, за конструктивними ознаками та за принципом дії.

Відповідно до структури технологічного процесу дозувальні пристрої порошкових матеріалів розділяють на пристрої:

- безперервної дії;
- безперервно-циклічної дії безперервної дії;
- дискретної (періодичної) дії;

За принципом дії дозувальні пристрої класифікують на пристрої об'ємного та вагового типів.

Найбільшою категорією є розділення за конструктивними ознаками і головною з них є класифікація за типом робочого органу видом руху та:

- обертальний рух (шлюзові, лопатеві, черв'ячні, тарілчасті, дискові, роторні, трубчасті); без рухомого робочого органу (гравітаційні, пневматичні);
- поступальний рух (стрічкові, пластинчасті);
- без рухомого робочого органу (гравітаційні, пневматичні);
- коливальний рух (вібраційні).
- повертально-поступальний рух (плунжерні, маятникові);

Головні показники, які мають забезпечувати конструкції дозаторів-живильників сипких матеріалів, є:

- забезпечення потрібної продуктивності в широкому діапазоні зміни властивостей матеріалу і умов експлуатації можливість вмикання під навантаженням;
- швидке блокування в аварійних ситуаціях;
- можливість вмикання під навантаженням;
- мінімальна кількість рухомих деталей;
- надійність у роботі мінімальна кількість рухомих деталей;

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- низька вартість;
- мала інерційність;
- спонукач має сприяти, а не перешкоджати гравітаційному випуску;
- простота обслуговування і низька споживна потужність;
- стабільність дозування за умови постійної витрати;
- незначне спрацювання робочого органу;
- повільність регулювання продуктивності.

Дозатор обладнують вібратором з амплітудою вібрації, яку можна регулювати в залежності від сипкості матеріалу. Вібратор дозволяє збільшити надійність дозування порошків з різними фізико-хімічними характеристиками, в тому числі порошків з гострокутовою формою частинок.

2.3.2 Порошкові живильники-дозатори безперервної дії

В системах газополуменового, плазмового та детонаційного нанесення покриттів користуються не всіма типами порошкових дозаторів, які були перелічені вище. Найчастіше використовують вібраційні, гравітаційні, пневматичні, а також живильники з обертальним рухом робочого органу.

Дозатори без рухомого робочого органу. Найпростішими за своєю конструкцією і найменш енергоємні із відомих конструкцій є гравітаційні дозатори. На рис.2.3.2.1 показано пристрій для подачі сипучих матеріалів з низькою газопроникністю шару. Конструкційні характеристики забезпечують регулювання витрати в широких діапазонах за рахунок усунення зони розрядження, яка виникає в бункері біля випускного отвору. Для уникнення цього ефекту встановлена стабілізуюча трубка, що дає можливість вертикального переміщення від приводу.

Високі технічні характеристики мають інжекторні дозатори з аеруючими стінками (рис.2.3.2.1).

Дозатор складається з бункера 1 із аеруючими стінками 33 і корпуса 31, що розділяються у місці їх з'єднання мембраною 30. У мембрана зроблений

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

центральный отвір 5 через який бункер сполучається еластичною трубкою 16 і підвідним отвір каналом 19 із внутрішньою порожниною змішування 23.

Бункер 1 може зніматися і відкриватися для вільного доступу до решітчастої перегородки 32, мембрани 30 і еластичної трубки 16. Він кріпиться гвинтами до корпусу 31. Герметичність з'єднання забезпечує мембрана 30.

Аеруючі стінки 33 бункера 1 виготовлені у вигляді конуса 10, який переходить у поперечну решітчасту перегородку 32 із зворотним центральним конусом 12 і сідлом 14, яке використовується для автоматичного запирання бункера 1 мембраною 30 при виникненні можливих зворотних ударах. Стінки 33, мають пористу структуру із пористістю достатньою для вільного проходження аеруючого газу в одному напрямку і недостатньою для проходження порошку.

У центрі бункера встановлена трубка 9. Її осьовий канал 3 у місці посадки на центральний конус 12 має наскрізні радіальні отвори 34, які направлені в сторону мембрани 30 під одним кутом і слугують для рівномірного барботування порошку.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

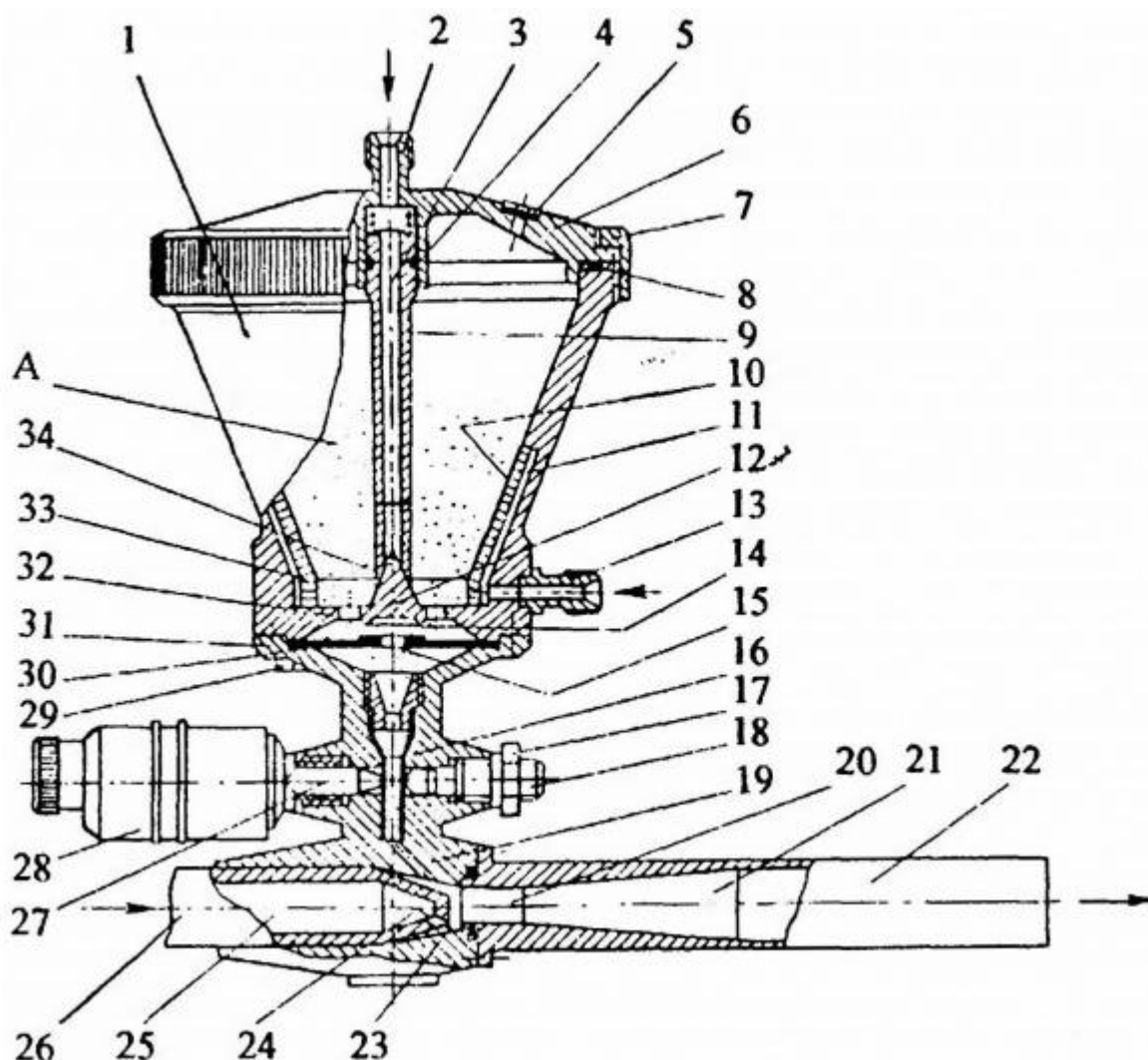


Рисунок.2.3.2.1. Схема інжекторного дозатора із аеруючими стінками: 1 бункер; 2 - вхідний штуцер; 3 - осьовий канал; 4 - ущільнення; 5 - патрубок; 6 - кришка бункера; 7 - гайка; 8 - ущільнення; 9 трубка; 10 - конус; 11 - кільцева порожнина; 12 зворотний центральний конус; 13 штуцер; 14 - сидло; 15 отвір; 16 -еластична трубка; 17 -гайка; 18 - жиклер; 19 ~ підвідний канал; 20 - циліндрична ділянка патрубка 22; 21 - дифузор; 22 - патрубок; 23 - порожнина змішування; 24 - крівні отвори; 26 - канал; 26 - сопло; 27 - шток; 28 ~ клапан; 29 - гвинт; 30 мембрана. 31 корпус; 32 - решітчаста перегородка; 33 - аеруючі стінки; 34 радіальні отвори; А порошок.

Трубка 9 телескопічно з'єднана з кришкою 6 бункера, яка також знімається і кріпиться накидною гайкою 7 до бункера 1. Герметичність гарантується ущільненнями 4 і 8.

Регулювання порції порошку А здійснюється жиклером 18, який може вільно переміщуватися вздовж осі та зменшувати або збільшувати зазор

еластичної трубки 16 між штоком 2 електромагнітною клапана 28. Жиклер закріплюється гайкою 17.

У порожнині змішування 23 знаходиться струминне сопло 26, яке призначене для подачі і розпилення порошкового матеріалу у ствол детонаційної гармати. Сопло 26 через наскрізні отвори 24 з'єднується з порожниною змішування 23, а поздовжнім каналом 25 із балоном транспортуючого газу.

Дозатор працює наступним чином. Одночасно із подачею сигналу на клапан 28 подається транспортуючий газ. При спрацьовуванні клапана 28 втягується шток 27; відкривається прохідний перетин еластичної трубки 16. Під дією струменю газу, який надходить через канал 25 і наскрізні отвори 24 сопла 26, у порожнині 23 створюється розряджена атмосфера, за рахунок чого відбувається підсмоктування порошку із підвідного каналу 19.

Порошок і транспортуючий газ надходять до циліндричної ділянки 20 патрубку 22, де вони змішуються і, проходячи через дифузор 21, потрапляють до ствола установки.

З метою усунення ефекту самозгущення під час роботи дозатора здійснюється барботування інертним газом, який проходячи через магістралі і штуцера 13, 2, кільцеву порожнину 11, аеруючі стінки 33 і трубку 9, розрихляє порошок А і дренується через патрубок 5 в атмосферу.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.3.3 Вибір технологічної схеми обробки

Порошкове лазерне наплавлення може виконуватися з подачею порошку безпосередньо в зону обробки, назустріч або вслід руху зразка.

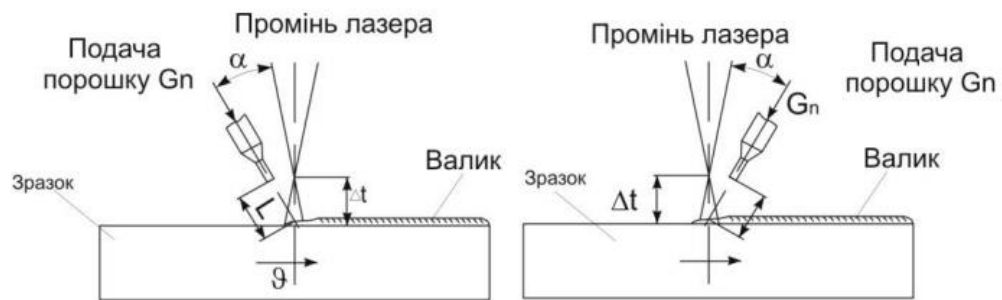


Рисунок. 2.3. Схема газопорошкового лазерного наплавлення з подачею порошку вслід руху (а) і назустріч руху (б) зразка.

Подача порошку назустріч руху сприяє підвищенню в 1,5 рази коефіцієнта використання порошку й збільшенню геометричних розмірів валика (висота й ширина) в 1,5-2,0 рази, на відміну від подачі порошку вслід руху зразка. То ж, подачу порошку будемо виконувати на зустріч руху зразка.

На якість формування валиків при ГПЛН впливає не тільки режими лазерної обробки й напрямок подачі порошку, але також і параметри подачі порошку: масова витрата порошку G_p , дистанція подачі L , кут нахилу осі живильника до лазерного променя α .

Якість процесу наплавлення визначають наступні риси:

- висота h і ширина в наплавлених валиках, їхня рівномірність;
- коефіцієнт перемішування γ , дорівнює відношенню площі розплавленого металу підкладки до площі всього розплавленого металу в поперечному перерізі шва;
- коефіцієнт використання порошку $K_{и.п.}$, дорівнює відношенню маси порошку, що витратився на формування валика, до маси всього витраченого порошку.

Результати вимірювання цих характеристик при різних режимах ГПЛН показали, що коефіцієнт перемішування γ перебуває в складній залежності від швидкості обробки. γ збільшується зі збільшенням швидкості, що обумовлено меншою густиною присадкового порошку на одиницю площі поверхні.

При зростанні ступеня розфокусування Δf , зменшується густина потужності випромінювання і в результаті цього зменшується $K_{и.п.}$ і зменшується висота валика. Ширина валика спочатку незначно збільшується, а потім знижується. Коефіцієнт γ зі збільшенням Δf зменшується.

Із зростанням потужності від 1,5 до 3,5 кВт, збільшується ширина й висота валика, коефіцієнт використання порошку й коефіцієнт перемішування.

При збільшенні масової витрати порошку G_p ширина й висота валиків збільшується, що обумовлено збільшенням $K_{и.п.}$, а коефіцієнт γ зменшується.

Зі збільшенням відстані L від перерізу сопла до зони обробки ширина валиків збільшується, оскільки потік частинок, які летять, розширюється, при цьому зменшується густина потоку часток, зменшується їх $K_{и.п.}$ і висота валика, а коефіцієнт γ значно збільшується.

Наплавленні валики безумовно мають шорсткість поверхні, тому що частки порошку розплавляються не повністю на кінцевій стадії формування.

Для зменшення шорсткості приймають ряд мір:

- подають порошок на зустріч руху зразку, тому що він перетинає лазерний промінь “у польоті” та нагрівається, оплавляється повніше й шорсткість валика помітно зменшується;
- збільшують розмірів плями лазерного випромінювання, щоб воно було більшого діаметра ніж газопорошковий потік;
- повторно оплавлюють поверхні без подачі порошку при використанні меншої потужності або при більшенні швидкості;

Виходячи з вище викладених міркувань вибираємо наступну технологічну схему обробки (наплавлення):

- відстань від живильника до оброблюваної поверхні $L = 10\text{мм}$;
- кут між віссю живильника й лазерним променем $\alpha = 45^\circ$;
- подача порошку на зустріч руху зразка.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.4 Промисловий робот з шарнірним маніпулятором

Для переміщення лазерної головки для наплавлення в зоні обробки було обрано маніпулятор сімейства Melfa від Mitsubishi Electric - Робот з шарнірним маніпулятором RV-13FRM. Він має вантажопідйомність до 13 кг і компактні розміри. Технічні характеристики маніпулятора були взяті з [https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/dl/7022/] і наведені нижче.

2.4.1 Опис маніпулятора та його функцій

Компактний робот RV-13FRM можна з легкістю об'єднувати в різноманітні системи автоматизації. Завдяки своїй гнучкості і широкому діапазону рухів дозволяє виконувати в обмеженому просторі такі роботи як збірка, монтаж, зварка, наплавка, палетизація, сортування. Базова модель постачається з повністю оснащеним стандартним контроллером (рис. 2.4.1.1)



Рисунок. 2.4.1.1. Промисловий робот RV-13FRM

[https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/dl/7022/]

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Характеристика:

- Довжина руки 834 мм;
- Вага 120 кг;
- Стабільність позиціонування ± 0.02 мм;
- Можливий монтаж на підлогу, стіни та стелю;
- Максимальна гнучкість.

До особливих функцій даної моделі можна віднести:

-Зменшення часу такту реалізується за рахунок використання високопродуктивних двигунів і унікальній технології керування приводами, розробленої Mitsubishi Electric. Завдяки цим модернізаціям зберігається високий обертальний момент при високій частоті обертання і знижується час розгону/сповільнення. Також було покращено режим безперервної роботи і зменшено час позиціонування.

-Збільшена ефективність обробки за рахунок внутрішнього монтування проводки маніпулятора та сигнальних кабелів, що насамперед зменшує ризик роз'єднання дротів і усуває їхню плутанину навколо робота (рис.2.4.1.2.)



Рисунок. 2.4.1.2. Внутрішнє розташування дротів і каналів маніпулятора

[<https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/dl/7022/>]

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- Маніпулятор оснащений відеосенсорами;
- Підвищенна ефективність використання робочого простору;
- Підвищенна зручність використання робота завдяки автоматизації керування, функції резервного копіювання/відновлення та можливості передачі стану виконання роботи на FTP-сервер чи збереження на SD-картах;
- Підвищення точності досягається завдяки активному регулюванню зусилля та спрощення налагодження довжини інструменту;
- Зіткнення двох маніпуляторів, що працюють в одні робочій зоні унеможлиблюється завдяки швидкісному регулюванню положення, яке вмонтоване в iQ Platform як стандартна функція (рис. 2.4.1.3)

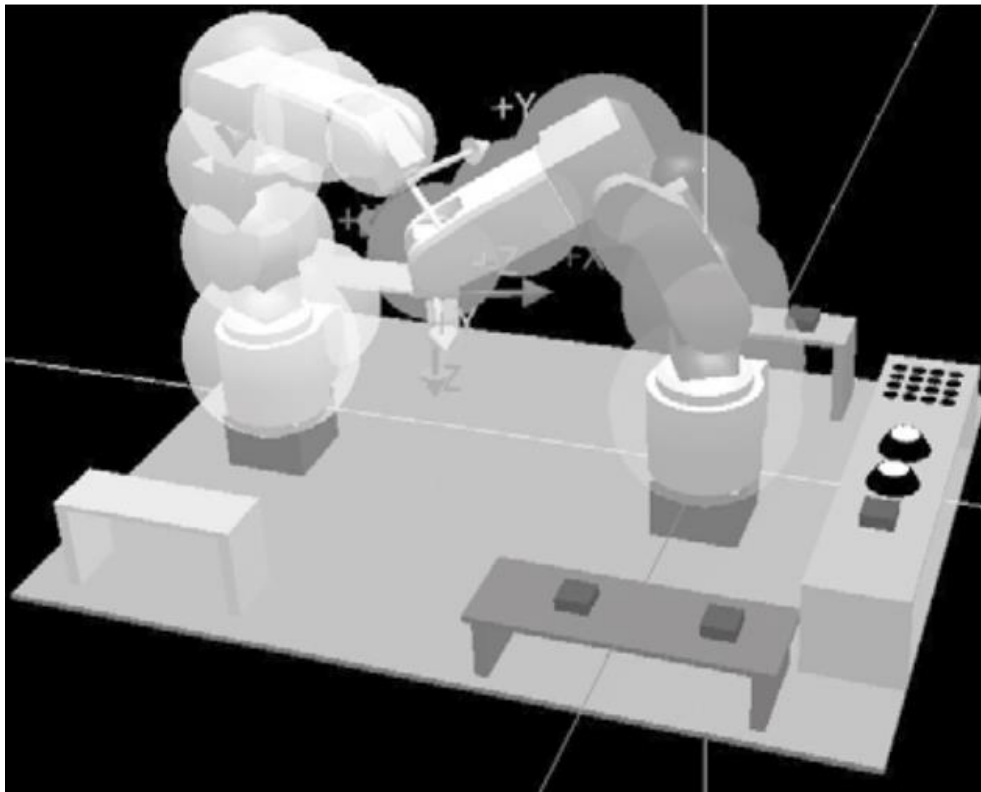


Рисунок. 2.4.1.3 Усунена можливість зіткнення з іншим роботом

[<https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/dl/7022/>]

-Робота оснощено спеціальними датчиками сили і моменту, що контролюють силу захоплення робота, а також підтримують її постійною.

-Датчик температури дає змогу компенсувати теплове розширення для більш точнішого позиціонування.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Технічні характеристики:

Кількість ступенів вільності – 6

Розпізнання позицій – Абсолютний датчик положення

Вантажопідйомність – 12-13 кг

Радіус робочої зони – 1094 мм

Максимальна швидкість, мм/с – 10450

Час циклу, с – 0.53

Точність повтору операції – ± 0.05

Температура оточуючого середовища, °C – Від 0 до 40

Радіус робочої зони – ISO 9409-1-40

Клас захисту – IP67

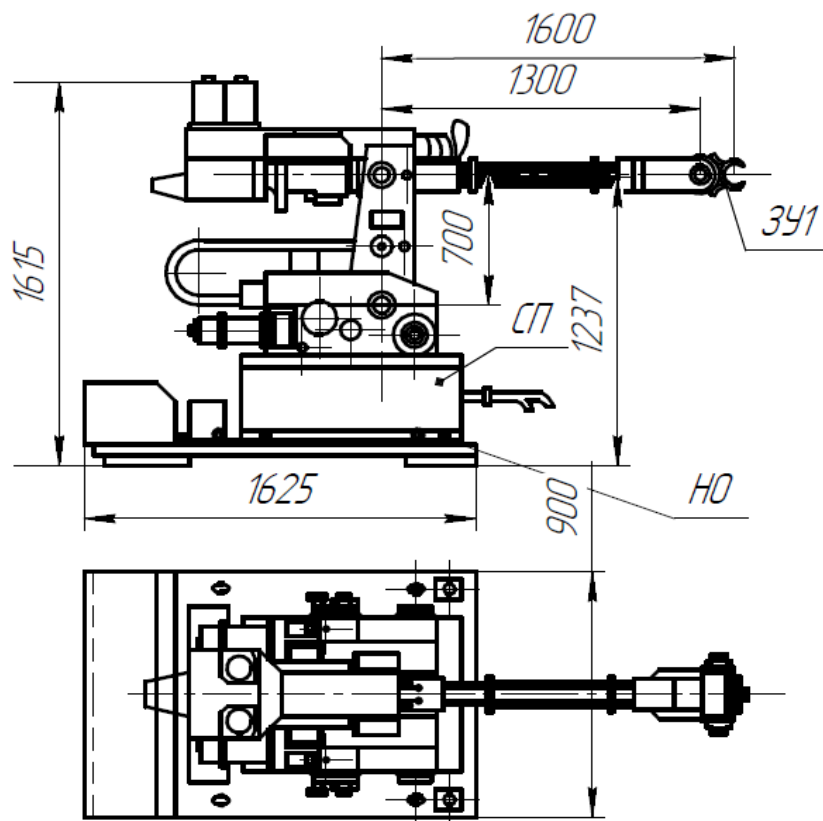


Рисунок 2.4.1.4. Креслення робота з шарнірним маніпулятором

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.4.2 Розробка конструкції обертання роботизованої системи

Було встановлено та зображено можливе робоче поле механізованої системи, що зображено на рис. 2.4.2.1.

Для обертання механічного маніпулятора було використано механічну систему, яка базується на основі циліндричного редуктора представленого на рис. 2.4.2.2

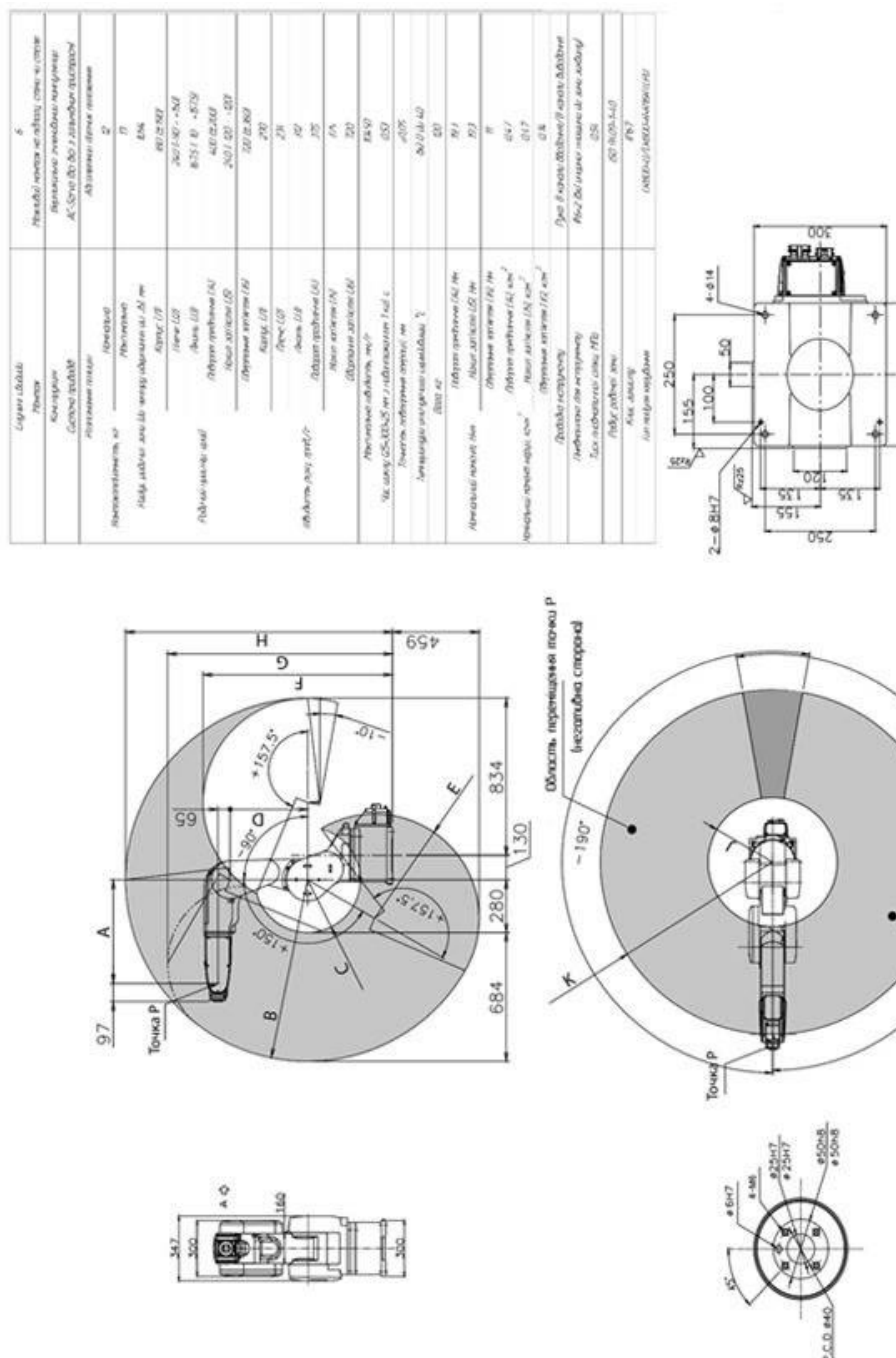


Рисунок 2.4.2.1 Робоче поле механічного маніпулятора

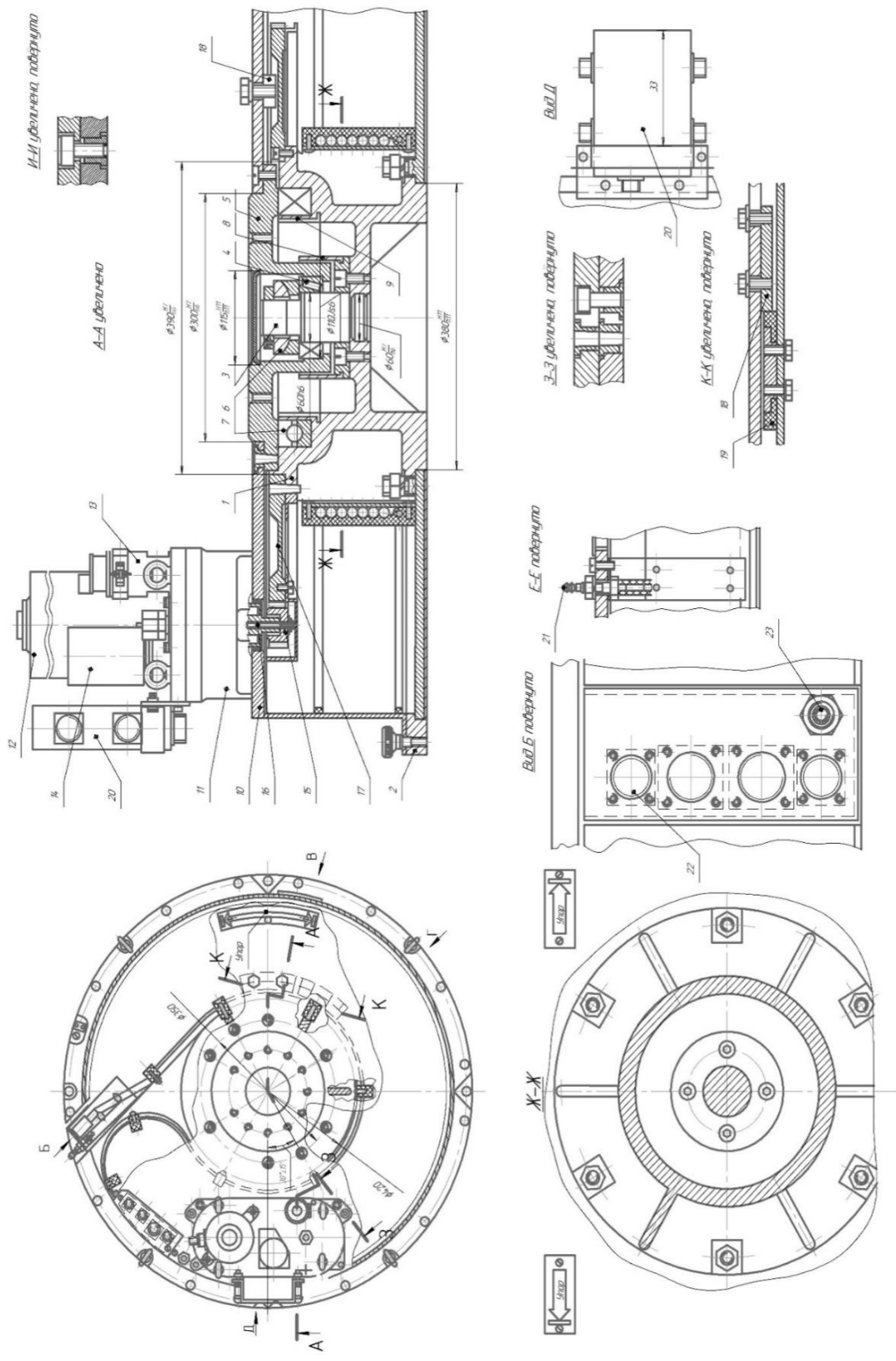


Рисунок 2.4.2.2 Система обертання механічного маніпулятора

Конструкторський розділ

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. Конструкторський розділ.

3.1. Структурна схема лазерно-індукційної експериментальної установки.

Лазерно-індукційне наплавлення лопатки проводиться на лазерно - індукційному технологічному комплексі, в основі якого лежить TruLaser Cell 3000 .

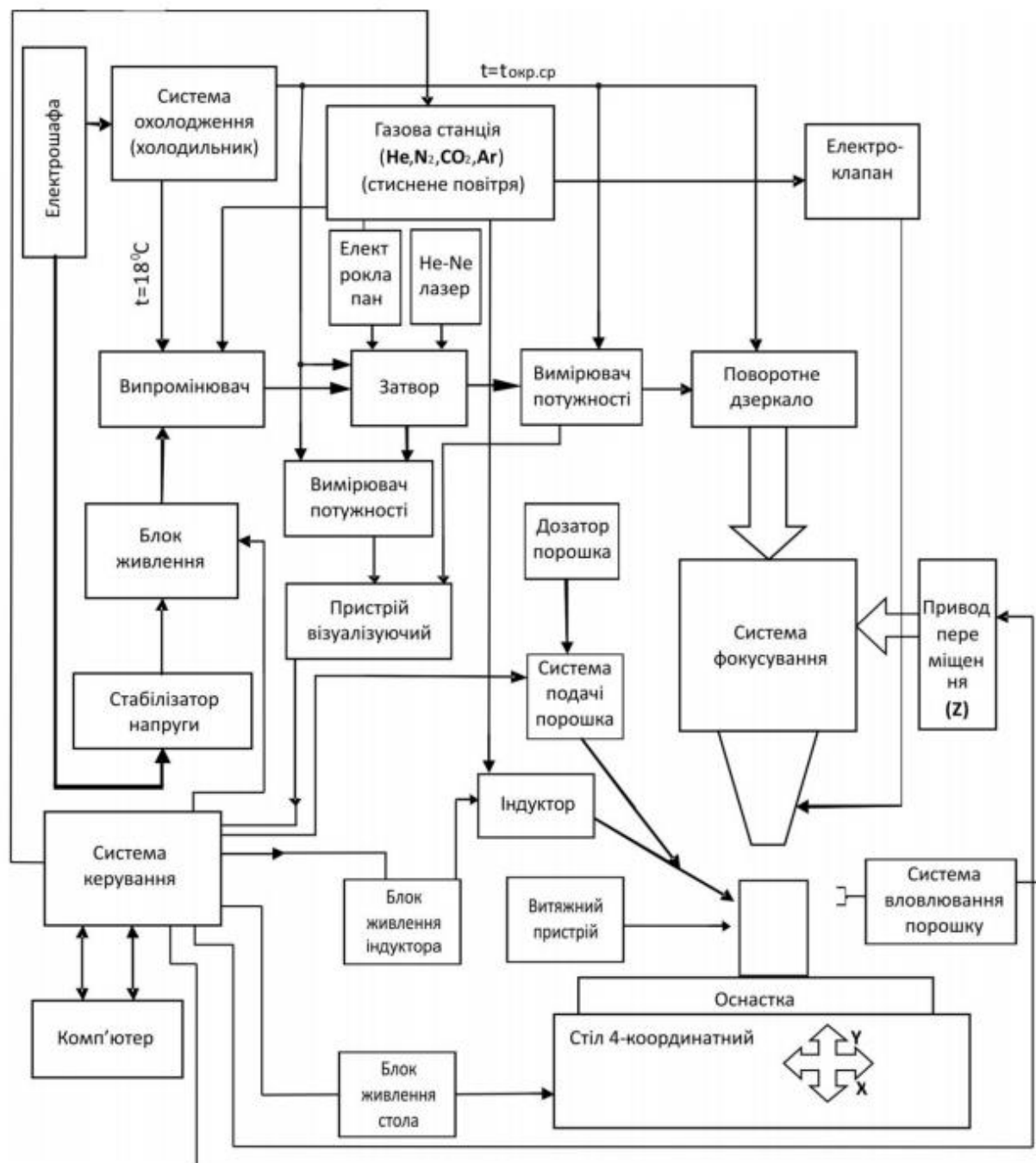


Рисунок. 3.1.1 Структурна схема лазерно - індукційної експериментальної установки

Будова лазерно - індукційної експериментальної установки:

1. Випромінювач, лазерна установка «TruLaser Cell 3000».
2. Блок живлення лазера, вміщує у собі систему електроживлення.
3. Газова станція, яка забезпечує подачу необхідних газів
4. Стабілізатор напруги мережі, який призначений для стабілізації можливих коливань у мережі.
5. Затвор, забезпечує перекриття лазерного випромінювання й подачу його на вимірювач потужності.
6. He-Ne лазер, необхідний для юстирування оптичного тракту лазерного випромінювання; він складається з блоку живлення He-Ne лазера та забезпечує працездатність допоміжного лазера.
7. Вимірювач потужності 1, призначений для відслідковування інформації про потужність основного лазерного випромінювання, коли затвор закритий.
8. Вимірювач потужності 2, призначений для відслідковування інформації про потужність основного лазерного випромінювання, коли затвор відкритий.
9. Пристрій візуалізації, показує величину потужності, яка була виміряна вимірювачами потужності.
10. Поворотне дзеркало, входить до будови системи транспортування лазерного випромінювання, яка призначена для транспортування лазерного випромінювання від випромінювача до зони обробки.
11. Система фокусування, призначена для фокусування лазерного променя в пляму необхідного діаметра.
12. Привод вертикального переміщення системи фокусування, призначений для вертикального переміщення по програмі.
13. Дозатор, призначений для дозування й подачі порошку в зону обробки.
14. Витяжний пристрій, призначений для видалення шкідливих речовин, що утворюються при обробці.
15. Зразок з нанесеним покриттям.
16. Система вловлювання порошку, призначена для збору залишкового порошкового матеріалу

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

17. Плазмотрон, пристрій? що створює плазмове джерело нагріву порошкового матеріалу.
18. Блок живлення плазмотрона, сприяє працездатності плазмотрона.
19. Стіл з ЧПП, призначений для передачі зразку необхідних рухів й обертань.
20. Блок живлення стола, призначений для забезпечення працездатності стола.
21. Система керування або блок керування комплексом, на нього надходить інформація про роботу всіх вузлів, приладів і систем експериментальної лазерно - дугової установки.

3.2. Розробка конструкції лазерного технологічного комплексу

3.2.1 Вимірювач потужності

Прилад призначений для оцінки характеристики розподілу інтенсивності потужних лазерних установок рис. 3.2.1.1

Лазерний промінь діаметром 42 мм падає на прийомну шайбу 1.

Прийомна шайба водоохолоджуєма, прямокутної форми. У шайбі, хрестоподібним порядком виконані отвори 2 мм 17 отворів по осі *X-X* і 17 по осі *Y*.

За прийомною шайбою, нижче, з деякою швидкістю рухається сталева стрічка 3. Вона приводиться в рух двигуном постійного струму за допомогою черв'ячної пари. У стрічці з певним проміжком зроблені отвори (2 мм, як показано на рис.3.2.1.2), товщина стрічки становить 2 мм.

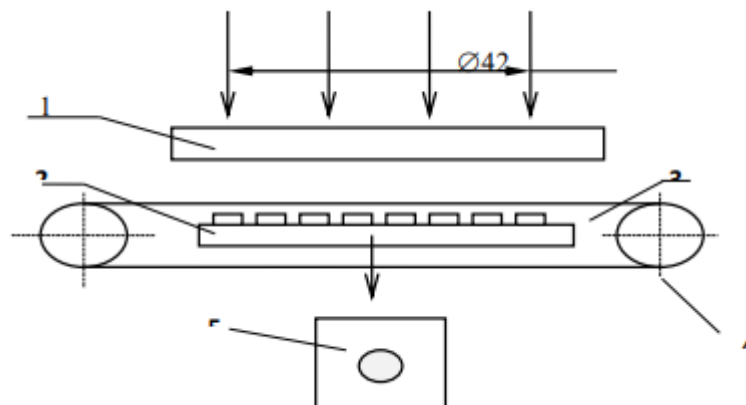


Рисунок.3.2.1.1 Вимірник потужності і її розподілу в пучку

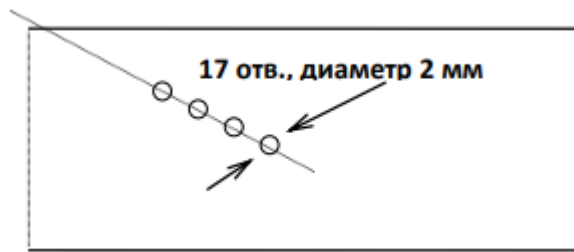


Рисунок.3.2.1.2 Схема діафрагми пристрою

За стрічкою знаходиться блок датчиків, яка представляє з себе прямокутну шайбу, на якій у хрестоподібному порядку встановлені піроелектричні приймачі випромінювання.

Стрічка постійно рухається й, таким чином, в блоці датчиків по черзі засвічуються 2 піроприймача (по одному на кожній осі). Блок датчиків має водяне охолодження. Електричний сигнал, який виникає при засвічуванні піроприймача, підсилюється й фіксується за допомогою осцилографа 5. Таким чином отримуються дві осцилограми, які дозволяють у процесі роботи лазера оцінювати розподіл інтенсивності в пучку по осі X і по осі B .

Принцип дії піроелектричних приймачів заснований на зміні t сегнетоелектричного матеріалу (кристала титана, барію, сульфату літію, ниобата літію й т.д.).

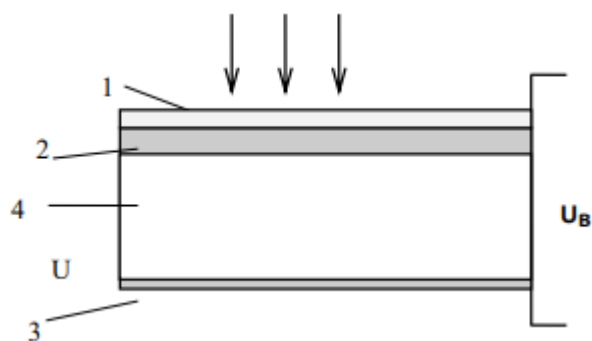


Рисунок.3.2.1.3 Піроелектричний приймач випромінювання

Піроелектричний приймач має вигляд плоскопаралельної пластини з монокристалічного сегнетоелектрика 4. На грані пластини нанесені суцільні електроди 2, 3, при цьому електрод 2, покритий поглинаючим покриттям, 1.

Розрахунок конструкції:

За умовою частота відтворення інформації 20Гц.

Відстань між рядами отворів на стрічці 50мм.

Отже, швидкість руху стрічки:

$$V=20 \times 50=1000 \text{ мм/с.}$$

Частота обертання барабана:

$$\eta_6 = V / (2\pi R) = 1000 / (2 \times 3,14 \times 25) = 6,53 = 390 \text{ хв}$$

Вибираємо електродвигун типу СП-163

- потужність 8,3 Вт;
- частота обертання валу 3500 об/хв
- постійна напруга жавлення $U=110 \text{ В}$
- сила струму $I=0,27 \text{ А}$

Передавальне число черв'ячної передачі:

$$U = U_{\text{дв}} / (\eta = 3500 / 390 = 9)$$

Призначаємо z_1 (2 - число витків черв'яка) z_2 ($z_1 \times u = 2 \times 9 = 18$ - число зубів черв'ячного колеса)

Коеф. діаметра черв'яка:

$$q = 0,25 \times z_2 = 0,25 \times 18 = 4,5$$

Відповідно ДО ДЕРЖСТАНДАРТУ 2144-76 $q=5$.

Міжосьова відстань $a_w = 25 \text{ мм.}$

Визначаємо модуль:

$$m = 2 \quad a_w / (q + z_2) = 2 \times 2,5 / (5 + 18) = 2,17$$

Відповідно ДО ДЕРЖСТАНДАРТУ 2144-76 $m=2,5$

Коеф. зсуву:

$$X = a_w / m - 0,5(q + z_2) = 25 / 2,5 - 0,5(5 + 18) = -0,5$$

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Геометричні розміри черв'яка:

Ділильний діаметр:

$$d_1 = m \cdot q = 2,5 \cdot 5 = 10 \text{ мм}$$

Діаметр вершин витків:

$$d_{01} = d_1 + 2m = 10 + 2 \cdot 2 = 14 \text{ мм}$$

Ділильний кут підйому:

$$\gamma = \arctg(z_1/q) = \arctg(2/5) = 21,801^\circ$$

Діаметр западин евольвентного черв'яка

$$df_1 = d_1 - 2(2,2 \cos \gamma - 1)m = 10 - 2(2,2 \cos 21,801 - 1)2,5 = 5,82 \text{ мм}$$

Геометричні розміри черв'ячного колеса:

Ділильний діаметр:

$$d_2 = m \cdot z_2 = 2,5 \cdot 18 = 39 \text{ мм} \quad \text{Середній діаметр вершин зубів:}$$

$$d_{02} = m(z_2 + 2 + 2X) = 2,5(18 + 2 + 2 \cdot 0,5) = 46 \text{ мм}$$

Середній діаметр западин зубів:

$$df_2 = m(z_2 - 2,4 + 2X) = 2,5(18 - 2,4 + 2 \cdot 0,5) = 37 \text{ мм}$$

Різниця в поверхню зубів:

$$R = 0,5 \cdot d_1 - m = 0,5 \cdot 10 - 2,5 = 12,5 \text{ мм}$$

Ширина вінця 10 мм.

3.2.2 Переривач лазерного випромінювання

Переривник лазерного випромінювання (затвор) перекриває й відкриває шлях лазерному променю. У закритому стані затвора лазерної промінь, відбиваючись від дзеркальної поверхні дзеркала з міді, потрапляє на аналізатор лазерного променю або поглинач випромінювання. У відкритому стані затвора лазерний промінь потрапляє з випромінювача до поворотного дзеркала, і через фокусуючу систему падає на деталь. У закритому стані

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

дзеркало- заслонка утримується завдяки пружини розтягання. Дзеркало, що встановлене в рухливій каретці, переміщається по кулькових направляючих за допомогою пневматичного циліндра. Повернення затвора у вихідний закритий стан відбувається завдяки підбуренню повітря з робочої камери пневмоциліндра під дією пружини розтягнення. Крайні положення заслінки обмежені гвинтами - упорами, закріплені в корпусі затвора.

Обираємо стандартний пневмоциліндр за ДСТ 26059-89, тип А2-однобічної дії, що штовхає, із пружинним поверненням. Тиск повітря $P = 1,0 \text{ МПа}$, максимальна швидкість переміщення штока $V_{\max} \geq 2 \text{ м/с}$, діаметр поршня $D=20 \text{ мм}$, діаметр штока $d=8 \text{ мм}$, номінальна сила, що штовхає, наприкінці ходу $F_{\text{ном}} = 215 \text{ Н}$, хід поршня $S = 60 \text{ мм}$.

Вибираємо пружину розтягання з ДЕРЖСТАНДАРТ 13770-86, з такими характеристиками: $F = 170 \text{ Н}$; клас 2, розряд 1.

Діаметр зовнішній гвинта пружини $D_1 = 11,0 \text{ мм}$.

діаметр проволочи $d = 1,6 \text{ мм}$

твердість одного гвинта: $z_1 = 77,4 \text{ Н/мм}$;

число робочих витків пружини: $n = c_1 // c = 77,4 / 3,15 = 25$

деформація пружини:

$S_1 = F_1 / c = 11,5 / 3,15 = 3,6 \text{ мм}$

$S_2 = F_2 / c = 153 / 3,15 = 48,0 \text{ мм}$

Розраховуємо час спрацювання затвора від моменту подавання сигналу на розподільник до завершення робочого ходу штока пневмоциліндра. Найбільша швидкість переміщення штока пневмоциліндра $V_{\max} = 2 \text{ м/с}$ хід поршня $S = 60 \text{ мм}$. Якби на шток не діяла сила з боку дзеркала, то швидкість штока була б практично постійною $u = 2 \text{ м/с}$, по всій довжині ходу поршня. Але так як на важіль (коромисло), у який упирається шток, діє змінна по величині сила пружності пружини, при закритому затворі, на самому початку ходу, коли $x = 0$, момент від сили

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

пружини F_1 урівноважений моментом від сили ваги, що діє на дзеркало, і переміщенню штока нічого не перешкоджає. Він відразу набирає швидкість $V = 2\text{ м/с}$. Після цього, зі збільшенням x лінійно росте сила опору пружини переміщенню штока з постійною швидкістю, він починає сповільнювати свій хід, і при $x = 60\text{ мм}$ зусилля на штоку пневматичного циліндра зрівнюється по величині із протидіючою силою - пружності пружини.

Для полегшення розрахунків вважатимемо, що шток рухається рівнозповільнено з постійним сповільненням:

$$a = R/m$$

де R - рівнодіюча всіх сил, m - маса дзеркала.

За час рух t_2 шток проходить відстань $S = 60\text{ мм}$ і знижує свою швидкість із $V = 2\text{ м/с}$ до $V = 0\text{ м/с}$;

$$S = at_2 / 2 = V \times t_2 \times 2 / t_2 \times 2 = V \times t_2 / 2;$$

звідси

$$t_2 = 2S / V$$

$$t_2 = 2 \times 0,060 / 2,0 = 0,06\text{ с.}$$

Час поширення повітряної хвилі від компресора до робочої камери пневмоциліндра:

$$t_1 = l / Z_{\text{зв}};$$

де l - відстань від компресора до пневмоциліндра,

$Z_{\text{зв}}$ - швидкість звуку, приймемо $Z_{\text{зв}} = 330\text{ м/с}$;

Нехай $l = 10\text{ м}$, тоді

$$t_1 = 10\text{ м} / 330\text{ м/с} = 0,030\text{ с.}$$

Отже, час спрацювання затвора:

$$t = t_1 + t_2 = 0,030 + 0,060 = 0,09\text{ с}$$

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.2.3 Юстирувальний пристрій

Юстирувальний пристрій використовується для налаштування тракту лазерного випромінювання вузлів, а також для сполучення юстирувального випромінювання з робочим випромінюванням. Виникає можливість візуалізації останнього і дає можливість контролювати траєкторію потужного лазерного випромінювання, а також роботу вузлів, що передають це випромінювання. Юстирувальний лазер ЛГН-207 встановлюється в призму на чотирикоординатному столику, що дозволяє виконувати прецизійні переміщення лазерного променя в координатах X,Y. Плюс до всього, столик має можливість за допомогою двох важелів і гвинтових механізмів робити кутові переміщення у горизонтальній і вертикальній площинах відносно до осі X. Вертикальне переміщення столика з лазером по осі Z виконується за допомогою пари гвинт-гайка.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.2.4 Система фокусування лазерного випромінювання

Система фокусування лазерного випромінювання являє собою тубус, який закріплюється на корпусі поворотного дзеркала. Усередині тубуса розташований порожній водоохолоджуваний циліндр із можливістю грубих і точних мікрометричних переміщень по осі Z. Усередині цього циліндра знаходиться об'єктив із плоско-опуклою лінзою. На торці циліндра розміщена головка із соплом для подачі захисного газу під тиском.

Опираючись на ці дані вибираємо фокусуючу лінзу виходячи з механічних, фізичних й оптичних властивостей матеріалів лінз, які використовуються для фокусування лазерного випромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм, а також розраховуємо її основні параметри.

Вибираємо фокусуючу лінзу з огляду на механічні, фізичні та оптичні властивості матеріалів лінз, які використовуються для фокусування лазерного випромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм, а також проводимо розрахунок її основних параметрів.

В якості матеріалу лінзи приймаємо KCl.

Діапазон прозорості, мкм	0,3 - 20
Коефіцієнт об'ємного поглинання	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт переломлення	1,46
Коефіцієнт відбивання, %	7,6
Температура плавлення, °C	776
Питома об'ємна теплоємність, Дж/см³·с	1,36
Коефіцієнт термічного розширення 1/град	$36 \cdot 10^{-6}$
Модуль Юнга, МПа	$0,3 \cdot 10^5$
Руйнівне напруження, МПа	44
Густина, г/см³	1,99

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для фокусування лазерного випромінювання в цій фокусуючій системі використовується опукла лінза з фокусною відстанню 500 мм, яка зроблена із хлориду калію (KCl).

У такому разі пляма має форму кола з діаметром d_0 , що залежить від фокусної відстані лінзи F , від розташування поверхні обробки щодо головної площини лінзи L , величини кутової розбіжності випромінювання θ , модового складу лазерного випромінювання. Беручи формули лінійної (геометричної) оптики потрібно знайти розмір (F (величину розфокусування), щоб одержати пляму на деталі необхідного діаметра.

Діаметр плями у фокальній площині d_f

$$d_f = DF / \sqrt{(L_0 - F)^2 + L_R^2} \quad (1)$$

де D - діаметр перетяжки пучка усередині резонатора;

F - фокусна відстань лінзи;

L_0 - відстань між перетяжкою пучка й фокусуючим елементом-лінзою;

$$L_R = \frac{R^2 \pi}{\lambda} - \text{довжина Релея падаючого променя};$$

Положення діаметра фокальної плями зміщено стосовно фокусної відстані F лінзи на величину:

$$\Delta = L_i - F = (L_0 - F) \frac{F^2}{(L_0 - F)^2 + L_R^2} \quad (2)$$

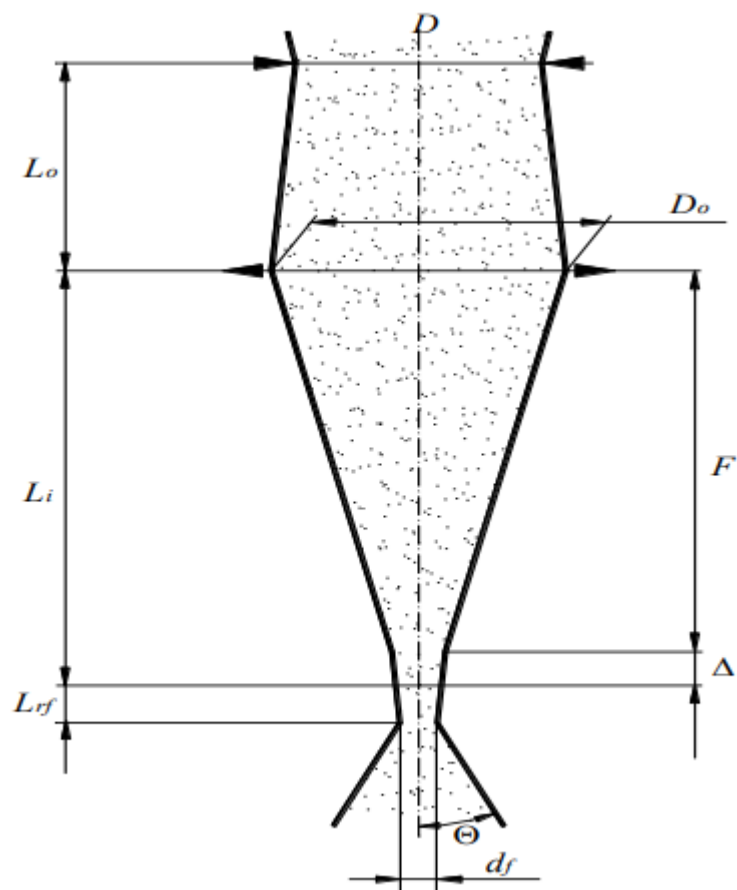


Рисунок. 3.2.4.1 Схема фокусування лазерного випромінювання.

У випадку, коли $L_0 \gg F$, а це майже завжди є при лазерній обробці, вираження (1) і (2) спрощуються:

$$d_f = \frac{2\theta_0 F}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_0}{L_R}\right)^2}} = \frac{DF}{\sqrt{(L_0^2 + L_R^2)}} \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{L_0 F^2}{L_0^2 + L_R^2} \quad (4)$$

де θ_0 – кутова розбіжність випромінювання в далекій зоні.

Беручи до уваги вплив довгої хвилі випромінювання й діаметра падаючого пучка на лінзу ϖ_0 , діаметр фокальної плями буде мати вигляд:

$$d_f = \frac{4\lambda F}{\pi D_0} \quad (5)$$

У цьому випадку для ψ поверхневого загартування ми користуємося розфокусованим пучком в будь-якій площині за лінзою (при $L_i > 0$), тобто розраховуємо його каустику:

$$d_i(L) = DF \sqrt{\frac{1}{(L_0 - F)^2 + L_R^2} + \left(\frac{L}{F}\right)^2 \frac{1}{L_R L_{RF}}} \quad (6)$$

де $L_{RF} = \frac{L_R F^2}{(L_0 - F)^2 + L_R^2}$ - довжина Ренея сфокусованого променя.

$d_i(L)$ - діаметр пучка в крапці L_i каустики;

Так як лазер має багатомодове випромінювання, то для охарактеризування розмірів плями фокусування в даному випадку можна застосувати залежності, такі, як зв'язок між діаметрами перетяжки D , D' , діаметрами фокуса d_f, d_f' , діаметрами сфальцьованого пучка в будь-якій крапці каустики відповідно багатомодового й одномодового пучка:

$$D' = Db; \quad d_f' = d_f b; \quad d_i(L) = d_i(L) b,$$

Де b - коефіцієнт враховуючий порядок поперечних мод.

Глибина різкості при фокусуванні багатомодового пучка розраховується за з формулою:

$$2L_f = \frac{1}{b^2} \sqrt{a^2 - 1} \frac{8\lambda}{\pi} \left(\frac{F}{D_0}\right)^2,$$

де $a = \frac{d_i}{d_f} \geq 1$ - коефіцієнт представляє собою відношення діаметра пучка в крапці каустики до діаметра фокуса.

Зважаючи на сферичну аберацію діаметру фокальної плями:

$$d_f = \frac{k_1 D_0^3}{F^2} + \left(\frac{4\lambda}{\pi}\right) \left(\frac{F}{D_0}\right) b^2,$$

k_1 – постійна, залежна від коефіцієнта переломлення й форми лінзи.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Фокусна відстань застосовуваної, виконаної із хлориду калію KCl лінзи -500 мм.

Відстань між перетяжкою пучка в резонаторі й фокусуючою лінзою - 2,5 м.

Діаметр перетяжки пучка усередині резонатора:

$$D = \sqrt[4]{\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 \frac{L_p(R_1-L_p)(R_2-L_p)(R_1+R_2-L_p)}{(R_1+R_2-L_p)^2}}, \text{ де}$$

L_p – довжина резонатора $L_p = 16$;

$R_1; R_2$ – радіуси кривизни дзеркал;

$R_1=R_2=30$ м, тоді:

$$D = \sqrt[4]{\left(\frac{10,6 \cdot 10^{-6}}{\pi}\right)^2 \frac{16(30-16)(30-16)(30+30-16)}{(30+30-16)^2}} = 6,69 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}$$

$$L_R = \frac{\pi R^2}{\lambda} = \frac{\pi D^2}{4\lambda} = \frac{\pi(6,69 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 10,6 \cdot 10^{-6}} = 3,6 \text{ (м)}$$

Положення діаметра плями фокуса зміщено на відстань (4):

$$\Delta = \frac{4(500 \cdot 10^{-3})}{4^2 + 3,6^2} = 0,0345 \text{ (м)} = 34,5 \text{ (мм)}$$

Як, відзначався вище діаметр фокусної плями буде:

$$d_f = \frac{DF}{\sqrt{(L_0^2 + L_R^2)}} = \frac{6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{4^2 + 3,6^2}} = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ (м)} = 0,625 \text{ (мм)}$$

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Беручи до уваги вплив довгої хвилі випромінювання й діаметра пучка, щопадає на лінзу, діаметр фокальної плями буде:

$$d_f = \frac{4\lambda F}{\pi D_0} = \frac{4 \cdot 10,6 \cdot 10^{-3} \cdot 500}{\pi \cdot 42} = 0,15 \text{ (мм)}$$

Через те, що лазер працює в багатомодовому режимі, тому відповідно до описаного вище, для розрахунку діаметра фокальної плями треба використовувати коефіцієнт враховуючий порядок поперечних мод:

$$b = \sqrt{2S + 1}, \text{ де}$$

$S = m$ або n -кількість нульових положень у напрямку X и Y .

По паспорту лазер має $m=2$, тому що TEM_{20} .

$$b = \sqrt{2 \cdot 2 + 1} = 2,24$$

Проте при фокусуванні пучків, що мають великий діаметр, оцінку розмірів плями фокусування варто проводити з урахуванням сферичної аберації лінзи:

$$d_f = \frac{k_1 D_0^3}{F^2} + \frac{4\lambda F}{\pi D_0} \cdot b^2, \text{ де}$$

$k_1=23,5_1 \cdot 10^{-2}$, для плосковипуклих лінз виконаних з КСІ з коефіцієнтом переломлення $n=1,455$.

Звертаючи увагу на те, що вплив сферичної аберації можна істотно змінити зарахунок застосування лінз раціональної форми. Адже лінзи, виготовлені з КСІ, NaCl мають найменшу аберацію якщо вони мають плосковипуклу форму.

$$d_f = \frac{23,5 \cdot 10^{-2} \cdot 42^3}{500^2} + \frac{4 \cdot 10,6 \cdot 10^{-3} \cdot 500}{\pi \cdot 42} \cdot b^2 = 0,069 + 0,7526 = 0,82 \text{ (мм)}$$

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тому, що по розрахованому нами режиму обробки необхідна пляма випромінювання діаметром 4мм, тому треба знати розмір перетину сфальцьованого пучка в будь-якій площині за лінзою, інакшими словами визначити каустику пучка, скориставшись рівнянням (6); для цього визначимо:

$$L_{RF} = \frac{L_R F^2}{(L_0 - F)^2 + L_R^2} = \frac{3.6 \cdot 0,5^2}{(2,5 - 0,2)^2 + 3,6} = 0,05056 \text{ (м)} = 50,56 \text{ (мм)}$$

Тепер для пошуку необхідного діаметра плями фокусування використаємо формулу:

$$d_i = \left[\left(\frac{F-L}{3P_L L} \right)^{3/2} 2P_L L \right] \cdot b, \text{ де}$$

$$P_L = \frac{P}{2};$$

P - параметр рівний 2,81 для опукло-плоских лінз із хромистого калію(n=1,455).

Маємо:

$$d_1(L=505)=0,36\text{мм}$$

$$d_2(L=520)=2,87\text{мм}$$

$$d_3(L=515)=2,64\text{мм}$$

Інакшими словами щоб одержати діаметр плями на поверхні заготовки рівний 2,6 мм, необхідно деталь розташувати на відстані 515 мм від лінзи, що має фокусну відстань 500мм.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

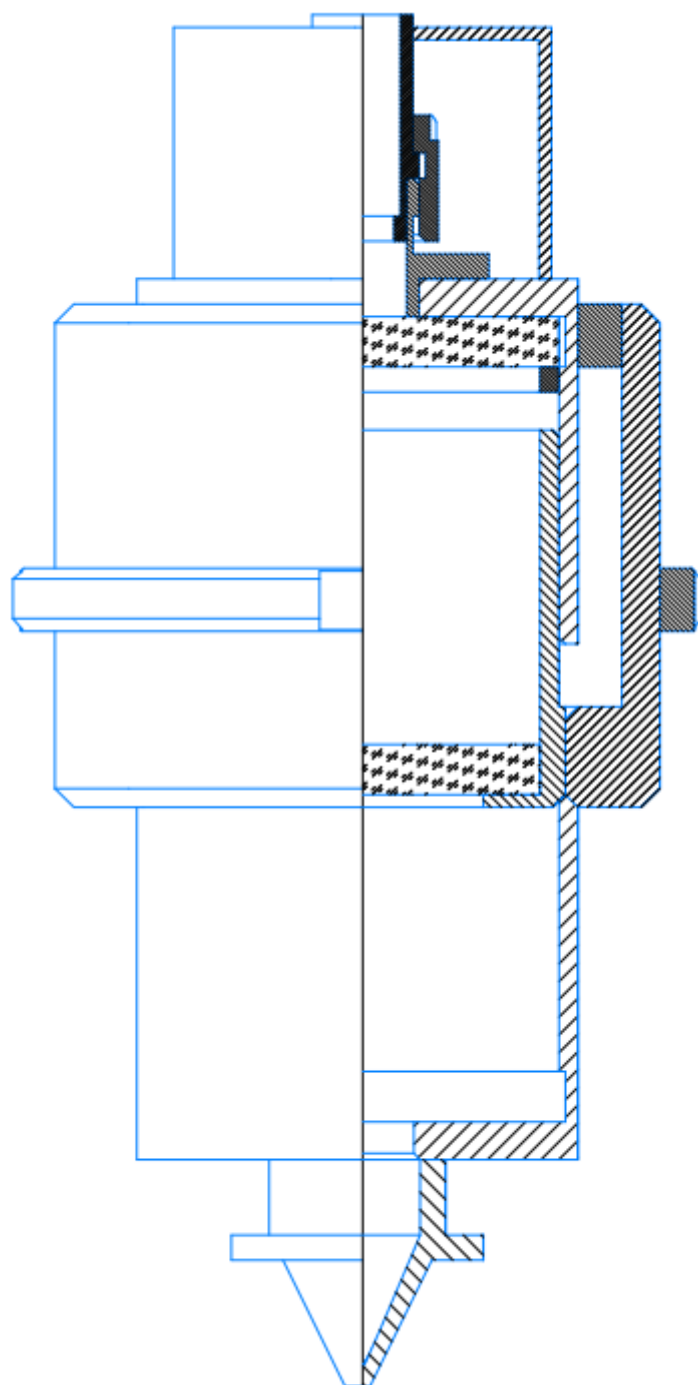


Рисунок.3.2.4.1 Розрахована фокусуюча система

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

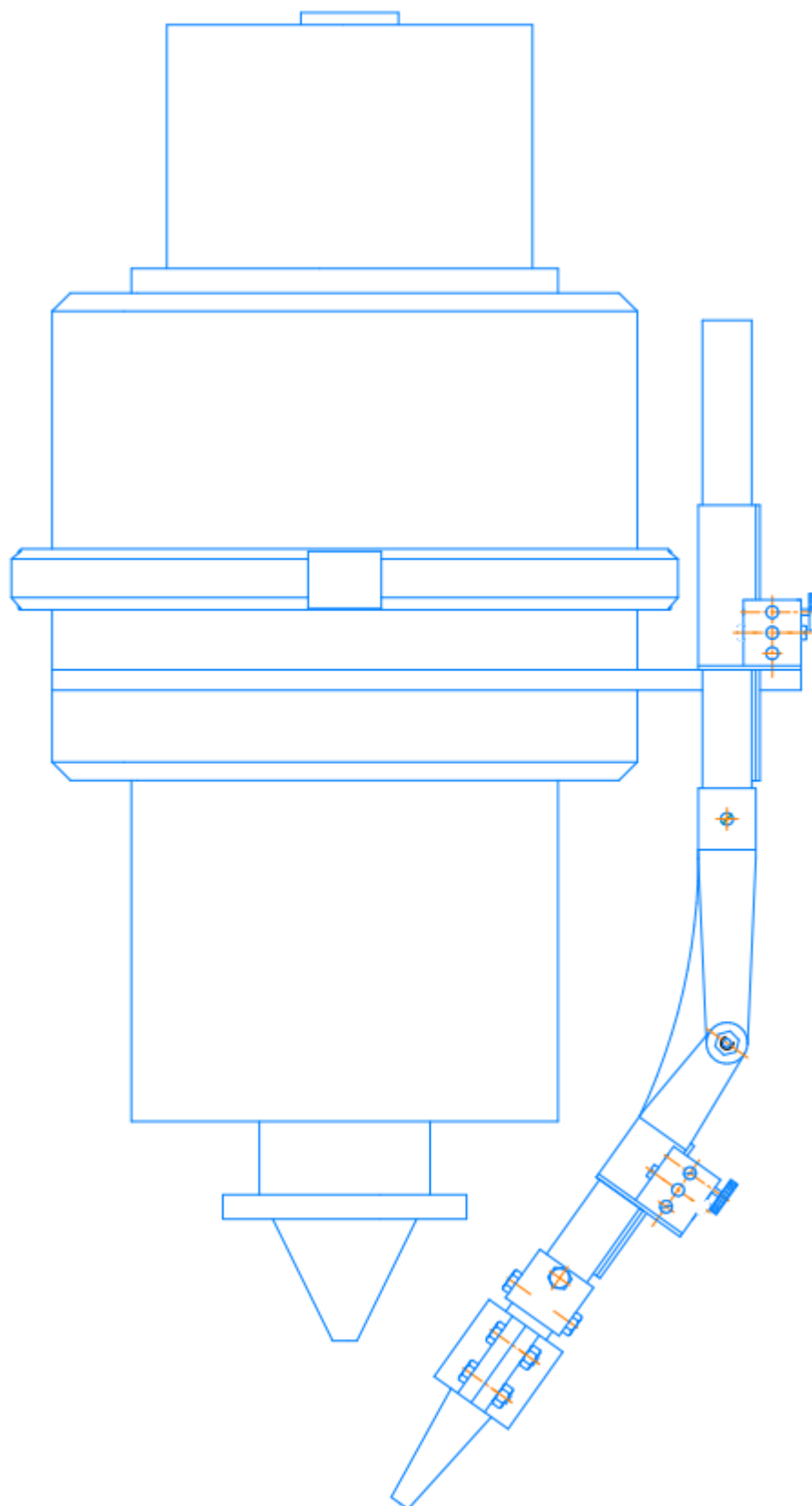


Рисунок.3.2.4.1 Розрахована фокусуєча система (продовження)

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ОХОРОНА ПРАЦІ

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4. Охорона праці

4.1 Загальні вимоги безпеки при роботі з лазерними установками

У ДЕРЖСТАНДАРТ 12.0.002-80 і ДЕРЖСТАНДАРТ 12.2.109-80 техніка безпеки визначена як система організаційних заходів і технічних засобів, що запобігають вплив на працюючих небезпечних виробничих факторів, а виробнича санітарія – як система організаційних, технічних засобів, що запобігають або зменшують вплив на працюючих шкідливих виробничих факторів.

Правила по техніці безпеки містять вимоги технічного характеру, спрямовані на захист працюючих від впливу предметів і засобів праці, безпечну роботу машин, устаткування й інструментів, постачання верстатів і машин конструктивними огороженнями й запобіжними пристосуваннями.

Норми по виробничій санітарії й гігієні праці визначають пристрій виробничих і побутових приміщень, робочих місць відповідно до фізіології й гігієною праці, а також безпечні межі змісту в повітрі виробничих приміщень пили, газів, пар.

Правила й норми по техніці безпеки й виробничої санітарії необхідно дотримувати як при проектуванні, так і при експлуатації промислових об'єктів, устаткування. Вимоги в області забезпечення безпечних і здоровіших умов праці, що втримуються в правилах і нормах по техніці безпеки й виробничої санітарії, є юридично обов'язковими як для адміністрації, так і для робітників та службовців.

Загальні правила безпеки при роботі з лазерними установками:

1.1. Робота з лазером дозволяється тільки особам, що досягли 18-літнього віку, пройшли медичний огляд і визнани гідними для роботи з ОКГ, пройшли інструктаж на робочому місці, здали екзамен з Лазерна оптика ПТБ і ПТЕ, що мають кваліфікаційну групу не нижче III і отримали допуск до роботи у встановленому порядку.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.2. При роботі на лазерній установці необхідно дотримуватися правил внутрішнього розпорядку. Забороняється курити, розпивати спиртні напої, лишати установку без нагляду.

1.3. Установка та устаткування повинні бути закріплені за відповідальною особою, яка відповідає за технічний стан що гарантує безпечну роботу з ними.

1.4. Усі придбані та утворені установки з ОКГ повинні бути представлені комісії з ОП та ТБ Інституту, яка приймає їх і видає дозвіл на право їх експлуатації.

4.2. Небезпечні й шкідливі виробничі фактори

Використання лазерних технологій приводить до утворення комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що впливають на персонал, що обслуговує лазерні установки або перебуває в одному приміщенні із працюючими лазерними установками.

У зв'язку із цим, в умовах застосування лазерів досить актуальні розробка й виконання відповідних мір і вимог, що забезпечують безпеку працюючого персоналу, що у цей час є однієї із серйозних проблем охорони праці.

У відповідності зі СНІП 2392-81 і ГОСТ 12.1.040-83 лазерні установки по ступені небезпеки випромінювання, яке генерується підрозділяються на чотири класи. При визначенні приналежності лазерного технологічного лазера до того або іншого класу по ступені небезпеки необхідно враховувати просторовий розподіл (спрямоване, відбите, сфокусоване, колімоване, розфокусоване) і тривалість впливу пучка лазерного випромінювання.

Вплив випромінювання на біологічні об'єкти залежить від щільності потужності (енергії) випромінювання, часу опромінення, довжини хвилі, тривалості й частоти проходження імпульсів. З позиції ступеня небезпеки лазери класифікуються по здатності первинного або вторинного (відбитого) випромінювання викликати біологічно значимі ушкодження очей і шкіри.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

При експлуатації лазерного технологічного комплексу обслуговуючий персонал може піддаватися впливу комплексу небезпечних і шкідливих факторів, кількість й інтенсивність яких залежать від просторово-енергетичних характеристик випромінювача, умов експлуатації й конструктивних особливостей випромінювача. Небезпечні й шкідливі виробничі фактори розділяються на основні й супутні. До основних небезпечних і шкідливих факторів відносяться монохроматичне когерентне випромінювання лазера й паразитні випромінювання (відбите й неуважне), а до супутньої - фактори, які виникають у робочій зоні при проведенні операцій наплавлення.

До них відносяться:

- утворення інтенсивного електричного поля в зоні обробки приводить до виникнення згустку високо іонізованої високотемпературної плазми, що у свою чергу, є джерелом м'якого рентгенівського випромінювання з довжиною хвилі порядку 1,0 нм;
- турбулентність атмосфери, що викликана струменем газу, що подає наплавочний матеріал у зону обробки викликає блукання променя, його розсіювання й сцинтиляцію (перерозподіл енергії усередині променя), що приводить до збільшення рівня опромінення поблизу осі випромінювання;
- висока напруга, наявна на зарядних пристроях, що живлять батарею конденсаторів великої ємності, які після розряду зберігають залишкову напругу високого потенціалу й напруга в ланцюгах керування;
- в результаті радіолізу повітря, що виникає при високих густинах потужності випромінювання й іонізації повітря іонізуючими випромінюваннями утворюються озон, оксиди азоту й інших газів, що викликають загазованість робочої зони;
- в результаті випаровування матеріалу підкладки й наплавочного матеріалу при проведенні технологічного процесу утворюються оксиди вуглецю, шкідливі газові домішки й пари летючих органічних сполук;

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- оксиди елементів, що входять до складу основного й наплавочного матеріалу, що руйнуються під впливом лазерного випромінювання, виділяються в повітря й створюють аерозолі дезінтеграції й конденсації;
- при роботі лазерної технологічної установки виникають звукові, ультразвукові й інфразвукові коливання високої інтенсивності, а при роботі механічного затвора, при переміщенні фокуруючої системи, при обертанні деталі в процесі обробки - шум.

4.3 Освітлення

При роботі на лазерній установці, освітленість приміщення має бути не менш 200 люкс – для 3 розряду зорових робіт. Приміщення де розташована лазерна установка, освітлюється люмінесцентними лампами низького тиску ДБН В 2.5-28-2006 D=30 мм. Необхідна кількість ламп N=10 штук.

Колір фарбування стін-світлий, що сприяє створенню рівномірного освітлення й розподілу яскравості в полі зору.

4.4 Електробезпека

В відповідності з "Правилами пристрою електроустановок" приміщення ділянки лазерного наплавлення не відноситься до приміщень із підвищеною електробезпечністю. Живлення лазерної установки здійснюється від мережі змінного струму з напругою 380В та частотою 50Гц із ізольованої нейтралі живильного ланцюга.

На всіх електричних ланцюгах відповідно до ПУЭ-86 передбачена ізоляція, що витримує без пробою поверхневого покриття вплив протягом 1-ої хвилини іспитової напруги.

Величина опору ізоляції - не менш 1 кОм. Всі доступні до дотику металеві неструмоведучі частини, які можуть виявитися під напругою, з'єднані з елементами захисного заземлення. Біля болта заземлення перебуває знак

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

заземлення за ГОСТ 12.4.026-76. Всі струмоведучі частини установки закриті захисними кожухами.

У корпусі пульта керування встановлені розрядні опори, що забезпечують зняття залишкових зарядів з накопичувальних конденсаторів при знятті захисних кожухів, які повинні діяти одночасно із блокувальними пристроями й забезпечити розряд конденсаторів за час не перевищуючий 10с.

В робочому режимі електробезпечність забезпечується:

- використанням комбінацій захисту - відключенням і зануленням;
- застосуванням діелектричних рукавичок, гумових ковриків СН 4997-75;
- неприступністю струмоведучих частин відповідно до ГОСТ 12.2.009- 80: розташування мережі (проводки) на недоступній висоті (не нижче 2200 мм), наявність обмежень у вигляді щитків закриваючі проведення й кінцеві вимикачі, подвійна ізоляція (що складається з робочої й додаткової);
- наявність блокувань безпеки, пристроїв, що запобігають влучення людей під напругу, використання (по можливості) малих напруг (звичайно до 36 В).

4.5 Захист персоналу від дії лазерного випромінювання

Вихідне випромінювання лазера становить небезпеку при опроміненні очей прямим, дзеркально відбитим, а також диффузно відбитим випромінюванням на відстані 10 см, а при опроміненні шкіри прямим і дзеркально відбитим випромінюванням.

Способи захисту персоналу підрозділяються на колективні й індивідуальні.

Колективні засоби захисту містять у собі:

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- захисні екрани або кожухи, що перешкоджають ЛВ потраплянню на робочі місця; екрани по можливості повинні поглинати випромінювання основної довжини хвилі й залишатися прозорими на іншій ділянці спектра;
- розміщення пульта керування ЛВ (або всього технологічного процесу) в окремому приміщенні з телевізійною або іншою системою спостереження за ходом процесу;
- екранування світла імпульсних ламп накачування й ультрафіолетового випромінювання газового розряду;
- системи блокувань і сигналізації, що запобігають доступ персоналу під час роботи лазера в межах ЛОЗ;
- фарбування внутрішніх поверхонь приміщень, а також, що перебувають у них предметів (за винятком спеціальних апаратів) у матові кольори з мінімальним коефіцієнтом відбиття, що забезпечує максимальне розсіювання світла на довжині хвилі випромінювання;
- перегородки з непроникного для ЛВ матеріалу;
- екранування відкритого променя на шляху від лазера до деталі.

ЛОЗ, якщо вона перебуває в приміщенні цеху, повинна мати огороження з маркуванням відповідними знаками. Доступ у цю зону стороннім особам забороняється. До індивідуальних засобів захисту (ЗІЗ) від ЛВ відносяться: окуляри, щитки, маски, технологічні халати й рукавички. ЗІЗ повинні входити в комплекс мер, що забезпечують безпечні умови праці тільки в тих випадках, коли інші способи захисту (колективні) не дозволяють забезпечити безпечне ведення робіт на ЛВ. Технологічні халати виготовляють із бавовняного або бязевого матеріалу ясно-зелений або блакитний кольори. Захист очей від ЛВ здійснюють за допомогою окулярів зі спеціальними світлофільтрами. Світлофільтри виконані на основі поглинаючого скла або пластмас, діелектричних тонко плівкових відбивачів, комбінованих, що складаються з поглинаючого скла і діелектричних тонко- плівкових відбивачів. Поглинаючі скло й пластмаси найбільш уживані, дешеві й на деякій довжині хвилі поглинають до 90% падаючої на них світлової енергії. На зовнішній стороні

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

поглинаючого фільтра встановлюють додатково тонко плівкові відбивачі, що перешкоджають руйнуванню фільтрів при ЛВ поглинанні й нагріванні.

Комбіновані багатошарові світлофільтри є найкращими й складаються із дзеркал, що відбивають, і поглинаючих матеріалів.

Світлофільтри проти лазерних окулярів знижують інтенсивність випромінювання до безпечної величини й не змінюють своїх властивостей при влученні на них ЛВ прямого. Форма окулярів й оправы виключає можливість влучення ЛВ крізь щілини між оправою й особою.

4.6 Протипожежні заходи

Згідно СНТБ 24-86, приміщення, де розташовується лазерний технологічний комплекс, можуть перебувати тверді горючі матеріали, що піддають обробці. Наприклад, листова пластмаса, дошки, фанера, дерев'яні стільці та стіл й інші матеріали на основі деревини. Крім того, джерелом підвищеної небезпеки можуть бути балони зі стисненими газами, використовуваними для одержання випромінювання (N_2 , CO_2 , He) або в якості технологічних (O_2 , Ar та ін.)

У конструкції лазерної установки використовуються електропроводи із хлорвініловим покриттям, гумова підводка робочих і технічних газів.

Можливими причинами виникнення пожеж є:

- Застосування відкритого вогню в недозволених місцях;
- Безперервна експлуатація установки;
- Несправне устаткування.

Згідно ОНТП 24-86, приміщення, у яких працюють лазерні установки, відносяться до категорії "В", тому що в них перебуває електропроводка з високою напругою.

Заходи щодо пожежної безпеки розділяються на: організаційні, технічні, експлуатаційні.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Експлуатаційні заходи: на ділянках установлюються засоби пожежогасіння: пісок, вода, азбестове полотно, є вуглекислотні вогнегасники марки ОУ-5у кількості 4-х штук. Передбачаються евакуаційні виходи. Ширина дверей повинна бути не менш 80 см, коридори не менш 2-х метрів. СНІП 2.09.02-85.

Організаційні заходи: передбачають правильну експлуатацію установки, а також протипожежний інструктаж робітників та службовців.

Технічні заходи: ставляться розміщення пожежних повідомлень у небезпечних місцях, теплова, рухова й звукова сигналізація.

4.7 Заходи щодо забезпечення лазерної безпеки

Лазерний технологічний комплекс розміщується в окремому, спеціально обладнаному приміщенні. Доступ у приміщення дозволяється тільки особам, що безпосередньо працюють на установці. Внутрішня поверхня приміщення не повинна мати поверхонь із коефіцієнтом відбиття більше 0,4. Стіни, стеля й підлогу мають матову поверхню, що забезпечує неухватне відбиття лазерного випромінювання. Стіни пофарбовані до стелі, фарбування дверей - під кольори стін.

Оскільки при зменшенні загальної освітленості приміщення зіниця ока відповідно розширюється існує правило, відповідно до якого приміщення повинне бути досить освітлено. Природне й штучне висвітлення повинне бути рясним, щоб зіниця ока завжди мав мінімальний діаметр. Загальне штучне висвітлення повинне створювати освітленість не менш 300 лк. Коефіцієнт мінімальної природної освітленості повинен становити не менш 1,5%.

Виробниче приміщення обладнане загально-обмінною вентиляцією, що забезпечує зниження змісту в повітрі шкідливих газів, пар і пилу. Кратність повітрообміну дорівнює 5. Для запобігання влучення в повітряне середовище шкідливих хімічних речовин і наплавочного порошку, наплавлення виконується в захисній витяжній камері, що забезпечує екранування й

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

достатню герметизацію простору робочої зони. Швидкість руху повітря в перетині отворів захисної витяжної камери дорівнює 0,5...2 м/с.

Для забезпечення належної безпеки під час експлуатації установка обслуговується двома операторами. Для обмеження доступу в приміщення сторонніх осіб на дверях, які повинні бути постійно закритими, вивіщується попереджувальний знак лазерної небезпеки й табличка "Стороннім вхід заборонений" відповідно до ГОСТ 12.4. 026-76. Попереджувальна сигналізація встановлюється усередині приміщення для того, щоб персонал вживав відповідних заходів обережності й захисту від опромінення.

Персонал, що допускає до роботи з лазерними установками, повинен пройти інструктаж і навчання безпечним прийомом і методам роботи відповідно до ГОСТ 12.0.004-79 і СНІП 2392-81. Персонал, зайнятий монтажем, налагодженням, ремонтом лазерів і дозиметричним контролем, повинен мати кваліфікаційну групу по електробезпеці відповідно до ПТЕС й ПТБ.

У конструкції установки передбачена спеціальна захисна заслінка, що дублює перекриття робітником променю технологічного лазера при проведенні юстирування оптичної системи й ремонту при включеному випромінюванні. Лінзи, призми й дзеркала поставлені з екранами (блендами), що гасять виникаючі дзеркально відбиті випромінювання. На шляху транспортування пучок каналізований. Шлях пучка випромінювання маркірований фарбуванням оправ, діафрагм, бленд і тубусів по яких проходить випромінювання.

На робочому місці є інструкції з техніки безпеки й експлуатації установки, схема зони лазерної небезпеки. Персонал повинен бути навчений методам надання першої допомоги при поразці лазерним випромінюванням, електричним струмом й іншими небезпечними факторами.

Забороняється робити орієнтацію променю на вікна, двері та ін. некапітальні спорудження, що пропускають лазерне випромінювання. Для

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

тіла мішені рекомендується темна фарба з високим коефіцієнтом поглинання,
а для навколишнього середовища - світла.

Персоналу забороняється:

- спостерігати без засобів захисту очей за роботою лазерів;
- розміщати в зоні дії лазерного променя предмети, що мають поверхні з дзеркальним відбиттям.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВИСНОВКИ

У процесі модернізації технологічного процесу було запропоновано та реалізовано можливість створення біметалевих шарів з необхідного функціонального призначення з застосуванням комбінованих лазерних процесів, що дало змогу підвищити ресурс 1,5 рази та зменшити тріщиноутворення, що у свою чергу дозволяє використати на заданих поверхнях кераміку в якості функціонального шару.

Під час виконання бакалаврської роботи було створено систему, що дозволяє реалізовувати високоефективні процеси відновлення функціональних шарів поверхонь складної конфігурації лопаток ГТД. Розраховано режими обробки та витрати дозатора.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЛІТЕРАТУРА

1. <http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1484-svarka-vzryvom.html>
2. https://studbooks.net/1422105/tovarovedenie/poluchenie_bimetallov
3. Электрошлаковая сварка и наплавка / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
4. Інженерія поверхні: Підручник / К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж — К.: Наукова думка, 2007. — 559 с. — ISBN 978-966-00-0655-3
5. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. Пер. с яп. М.: Машиностроение, 1985. — 240 с.
6. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение 1989. — 304 с. — ISBN 5-217-00432-0
7. <https://www.bankreferatov.ru/ru/vostanovlenie-shtampov/1835636>
8. Балтер М.А. Зміцнення деталей машин - М.: «Машинобудування», 1978-184с.
9. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головко Л.Ф. - Лазерне й електроерозійне зміцнення матеріалів. - М.: «Наука», 1986-276с.
10. Коваленко В.С., Котляров В.П., Дятел В.П. й ін. Довідник за технологією лазерної обробки - К.: «Техніка», 1985-167с.
11. Коваленко В.С., Головко Л.Ф., Меркулов Г.В. Зміцнення деталей променем лазера. - К.: «Техніка», 1981.-131с.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

12. Головка Л.Ф., Романенко В.В., Блощин М.С., Хорошуля М.В., Сахно Р.І., Осипенко Т.М. Особливості технології виробництва біметалів лазерно-ливарним методом / В зб. «VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти”, 29 травня - 2 червня 2017 р., м.Херсон, Україна.

13. Осипенко Т.М., Романенко В.В. Деякі підходи до реалізації процесу виготовлення біметалів потужним джерелом енергії / В зб. «Тези доповідей загально університетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, секція «Машинобудування», Київ, 31 травня 2017, стор. . // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню 2017», секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології». - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.

14. Романенко В.В., Блощин М.С., Осипенко Т.М. Способи реалізації процесу виготовлення біметалів потужним джерелом енергії / В зб. «Тези доповідей XVII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», 01 - 03 листопада 2017 р. м. Чернігів, Україна.

15. Конференція 14 травня 2018 року Київ «Інновації молоді – машинобудуванню», тези на тему : «Способи реалізації процесу виготовлення біметалів потужним джерелом енергії» , збірник доповідей.

16. Юдин Е.Я. Охорона праці в машинобудуванні. - М. «Машинобудування», 1983. - 432с.

17. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерна обробка. - Л.: Лениздат, 1973. - 192с.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

18. Коваленко В.С., Котляров В.П., Дятел В.П. й ін. Довідник за технологією лазерної обробки - К.: «Техніка», 1985-167с.
19. Розенплентер А.Э., Неммов В.Д., Щур И.С.- К.: КПИ, 1986 - 44с.
20. Степанов А.Г., Иванчук Д.Ф. й ін., Методичні вказівки по забезпеченню лазерної безпеки для студентів всіх спеціальностей. - К.: КПИ, 1986. - 44с.
21. Иванчук Д.Ф., Степанов А.Г. й ін. Методичні вказівки за курсом «Освітленість для студентів всіх спеціальностей. -ДО.: КПИ, 1986 - 44с.
22. Атаманюк В.Г., Ширшев Л.Г., Акимов Н.И. Цивільна оборона. - М.: «Вища школа», 1987. -288с.
23. Смыков, А.Ф. Развитие теории, разработка и внедрение автоматизированного проектирования технологических процессов литья по выплавляемым моделям газотурбинных лопаток: дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04 / Смыков Андрей Федорович. – Москва, 2005. – 389 с.
24. Каблов, Е.Н. Литые монокристалльные турбинные лопатки / А.Г. Братухин, Р.Е. Шалин, Е.Н. Каблов [и др.] // Литейное производство. – 1993. – № 6. – С. 13.
25. Каблов, Е.Н. Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизации / Е.Н. Каблов // Газотурбинные технологии. – 2000. – № 3. – С. 12.
26. Пат. № 2185945 Российская Федерация В 23 Р 6/00. Способ восстановления лопаток турбомашин / Ю.Б. Мошкин, Ю.С. Елисеев, В.А. Гейкин [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

унитарное предприятие «Московское машиностроительное производственное предприятие "Салют"». – заявл. 12.03.2001; опубл. 27.07.2002, – 3 с.: ил.

27. Полетаев, В.А. Автоматизированное производство лопаток ГТД / В.А. Полетаев, Е.В. Цветков, Д.И. Волков. – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 262 с.

28. Полетаев, В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин / В.А. Полетаев, Д.И. Волков. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с.

29. Идзон, М.Ф. Механическая обработка лопаток газотурбинных двигателей / М.Ф. Идзон. – М.: Оборонгиз, 1963. – 320 с.

30. Смыков, А.Ф. Развитие теории, разработка и внедрение автоматизированного проектирования технологических процессов литья по выплавляемым моделям 187 газотурбинных лопаток: дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04 / Смыков Андрей Федорович. – Москва, 2005. – 389 с.

31. Дубровская, А.С. Численное моделирование процесса изготовления отливок деталей газотурбинных двигателей методом точного литья: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Дубровская Александра Сергеевна. – Пермь, 2015. – 152 с.

32. Gell, M. The development of single crystal superalloy turbine blades / M. Gell, D.N. Duhl, A.F. Giamei // Superalloys. – 1980. – № 1. – P. 205–214.

33. 119. Шитарев, И.Л. Разработка научно-технических основ высокоэффективных технологических процессов в производстве газотурбинных двигателей: дис. ... доктора техн. наук: 05.07.05 / Шитарев Игорь Леонидович. – Самара, 1993. – 59 с.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

34. 120. Шкленник, Я.И. Литье по выплавляемым моделям / Я.И. Шкленник, В.А. Озеров. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.

35. 120. Шкленник, Я.И. Литье по выплавляемым моделям / Я.И. Шкленник, В.А. Озеров. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.

36. Гачинский, Э.Е. Оптимизация пространственного распределения припуска / Э.Е. Гачинский, Л.Н. Фицнер. – М.: Энергия, 1966. – 67 с.

					ДПБ.МЛ7118.000.001ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		