

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

**Зварювальний факультет  
Кафедра інженерії поверхні**

«На правах рукопису»  
УДК 621.382

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ І.В. Смирнов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра  
зі спеціальності 132 Матеріалознавство**

**на тему: «Дослідження якісних показників покриттів з використанням  
інтерметалідів системи Fe-Al при плазмовому напыленні»**

Виконав:  
студент II курсу, групи ЗП-71мп  
Степанович Олександр Олександрович \_\_\_\_\_

Керівник:  
Доцент, к.т.н.  
Попіль Ю.С. \_\_\_\_\_

Консультант з охорони праці:  
Зав. каф. д.т.н. проф.  
Левченко О.Г. \_\_\_\_\_

Рецензент: \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

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

**Зварювальний факультет**

**Кафедра інженерії поверхні**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою  
Спеціальність (спеціалізація) – 132 «Матеріалознавство» («Інженерія та нанотехнології покриттів»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ І.В. Смирнов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Степановичу Олександровичу**

1. Тема дисертації «Дослідження якісних показників покриттів з використанням інтерметалідів системи Fe-Al при плазмовому напиленні»,  
науковий керівник дисертації Попіль Ю.С. доцент, к.т.н.

затверджені наказом по університету від «13» листопада 2018 р. №4156-с

2. Термін подання студентом дисертації 07.12.2018р.

3. Об'єкт дослідження

4. Вихідні дані

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

7. Орієнтовний перелік публікацій

### 8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Левченко О.Г. зав.каф д.т.н. проф.		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

Степанович О.О.

Науковий керівник дисертації

Попіль Ю.С.

\_\_\_\_\_

## АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація вміщує 85 сторінок машинописного тексту, 31 рисунок, 5 таблиць, 57 джерел літератури, посилань (конструктивно-технологічний, літературний огляд, розробка технологічного процесу, економічний та охорона праці) та графічна частина до якої увійшло 12 плакатів.

Об'єктом дослідження є нанесення захисного покриття на вироби що працюють в умовах ерозійного зношування та тепло навантажень плазмовим напиленням. На основі проведеного аналізу умов роботи, методів плазмового напилення встановлено, що найбільш перспективними матеріалами для напилення є покриття на основі інтерметалідів системи Fe-Al.

В процесі роботи розглянуті результати досліджень вибору матеріалу та технологічних параметрів напилення, та вплив їх на механічні властивості напиленого шару покриття.

Ключові слова: плазмове напилення, теплостійке покриття, інтерметаліди системи Fe-Al.

## ANNOTATION

The master's dissertation contains 85 pages of typewritten text, 31 figures, 5 tables, 57 sources of literature, references (constructive-technological, literary review, development of technological process, economical and occupational safety) and graphic part 12 posters

The object of the study is the application of protective coating for products that work in conditions of erosion wear and heat loads by plasma spraying. Based on the analysis of working conditions and plasma spray methods, it has been established that the most promising materials for spraying are coatings based on intermetallics of the Fe-Al system.

In the course of work, the results of research on the choice of material and technological parameters of the spray, and their influence on the mechanical properties of the spray coating layer are considered.

Keywords: plasma spraying, heat-resistant coating, intermetallics of the Fe-Al system.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень	7
Вступ	8
1. Досвід розробки покриттів на основі інтерметалідів системи Fe-Al отримуваних методами плазмового напилення	10
1.1. Аналіз застосування данного матеріалу	10
1.2. Вибір та обґрунтування способу нанесення покриття	15
1.3. Обґрунтування вибору обладнання для плазмового напилення	21
1.4 Вибір режиму плазмового напилення	24
1.5. Спосіб отримання порошку Fe-Al	32
2. Дослідження технологічних режимів напилення	35
2.1. Обладнання що використовується	35
2.2 Вибір допоміжного обладнання	37
2.3 Обладнання для вимірювання твердості	37
3. Методи дослідження	38
3.1 Вид і структура частинок порошків з водяної ванни	38
3.2. Вид і структура сплетів	45
3.3 Структура і фазовий склад покриттів	52
4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	56
5. Інноваційні показники при використанні інтерметалідних покриттів	74
Загальні висновки	78
Перелік посилань	79

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГТД-газотурбінний двигун

ДВЗ – двигун внутрішнього згорання

ККД – коефіцієнт корисної дії

$\delta_v$ - границя тимчасової міцності

$\delta_t$ - границя пропорційності(границя текучості для залишкової деформації)

$u$  - відносне звуження

KCU - ударна в'язкість

HV- твердість по Віккерсу

T - температура

E - модуль пружності

$\rho_{ch}$  - щільність частки

$W_{ch}$  - швидкість частинки

$d_{ch}$  - діаметр частинки

$\eta_p$  – в'язкість розплаву

## ВСТУП

В умовах сучасної ринкової економіки важливу роль відіграє розробка нових сучасних технологій, як гарантій конкурентоспроможності підприємств на внутрішньому та зовнішньому ринках.

Розвиток машинобудування визначається головним чином, можливістю створення і отримання в достатній кількості конструкційних матеріалів, здатних протистояти дії агресивних газових середовищ, високих температур і механічних навантажень. Особливо гостро ці питання стоять для виробів(вал турбіни ДВС, ланка сопла ГТД, клапана впуск, випуск ДВС, тощо) які працюють тривалий час в умовах теплосмін, випробовують додаткову дію компонентів топлива і продуктів його згорання, а також твердих частинок, що поступають разом з повітрям, що зрештою приводить до невиправданих втрат матеріальних, паливно-енергетичних, трудових і фінансових ресурсів.

Одним з шляхів рішення вказаних проблем є застосування високоефективних ресурсозберігаючих технологій нанесення захисних (ерозійностійких та теплостійких) покриттів з використанням інтерметалідів системи Fe-Al. Нанесення захисних покриттів на деталі газових турбін, або двигунів внутрішнього згорання забезпечує істотне підвищення ресурсу їх роботи. Завдяки цьому вдається досягти багатократної економії матеріальних, сировинних, трудових ресурсів.

В цілому в промисловості, авіа і судно-машинобудуванні, завдяки використуванню захисних покриттів на деталях, досягається визволення значної частки виробничих ресурсів (сировина, матеріали, паливно-енергетичні, трудові, фінансові ресурси та транспорт) в циклі „добування руди – чорна та кольорова металургія – транспорт – машинобудування – експлуатація машин”.

Необхідно відзначити, що нанесення покриттів мало змінює структуру і властивості початкового виробу. Тому для досягнення найбільшого ефекту використання плазмових захисних покриттів, необхідно надати особливу увагу вибору матеріалу, підготовці поверхні виробу, режиму напилення.



Таким чином можна зробити висновок, що нанесення захисних покриттів на основі інтерметалідів Fe-Al це високоефективна, ресурсозберігаюча технологія, застосування якої дозволяє подовжити ресурс роботи виробів.

# 1. ДОСВІД РОЗРОБКИ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ СИСТЕМИ Fe-Al ОТРИМУВАНИХ МЕТОДАМИ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ

## 1.1. Аналіз застосування данного матеріалу

Розвиток робіт по створенню покриттів на основі інтерметалідів Fe-Al було пов'язано з формуванням міжнародних програм, присвячених вирішенню двох екологічних проблем - організації спалювання відходів з забезпечення надійної роботи котлів сміттєспалювальних заводів [12] і переході бойлерів теплоелектростанцій на роботу зі зниженим надлишком повітря, що призведе до скорочення викидів  $\text{NO}_x$  в атмосферу [1]. В обох випадках це пов'язано з необхідністю вирішення питання забезпечення достатньої стійкості труб поверхонь нагріву в умовах дії агресивного газового середовища і підвищених термічних навантажень.

Формування інтерметалідів системи Fe-Al з продуктів МХС (МЛ) відбувається при їх ТО при температурі  $\geq 700$  °C. Інтерметаліди Fe-Al були обрані в якості матеріалу захисних покриттів унаслідок їх високої жаро- і корозійної стійкості в інтервалі робочих температур труб поверхонь нагріву (до 600 ° - 700 ° C). Роботи проводилися в рамках Європейських програм і на замовлення Департаменту енергії уряду США із залученням провідних дослідницьких центрів -OakRidgeNationalLab, IdahoNationalLab. Великі огляди по нанесенню покриттів з інтерметаллідів Ni, Fe і Ti методами газотермічного напилення були підготовлені N.Cinca і J.M.Guilemany, Барселонський університет [13, 14].

Метою досліджень, проведених групою співробітників IdahoNat. Lab. під керівництвом Т.С.Totemeier`а, був аналіз впливу швидкостей частинок порошків Fe-28Al-2Cr, і Fe-24Al з розміром частинок - 38 мкм, отриманих методом розпилення розплаву, на структуру і властивості напилених покриттів [7, 20-23]. Покриття наносили методом високошвидкісного газополум'яного напилення

(установка Jp-5000, що працює на суміші газу з киснем). В результаті зміни тиску в камері згоряння зі 107 до 340 і 620 кПа швидкість частинок зростала з 390 до 630 м / с при зміні температури 1600 ° С (при 390 м / с) до 1650 ° С (при 570 і 630 м / с) . Було встановлено зв'язок між швидкістю частинок і змістом в покритті нерозплавлений частинок, пористістю і модулем пружності (Е) покриття. Підвищення тиску в камері згоряння веде до зниження частки нерозплавлених частинок з 31 до 6 ат.%, Пористості з 7 до 0%, значення Е зростає з 70 до 150 ГПа. Дослідження високотемпературної (при 500 ° -800 ° С) корозії покриттів з Fe<sub>3</sub>Al- і FeAl-покриттів в середовищі продуктів згоряння вугілля (N<sub>2</sub>- 9% CO-4,5% CO<sub>2</sub>-1,8% H<sub>2</sub>O-0,12H<sub>2</sub>S) протягом 25 і 100 ч показало, що швидкість корозії FeAl-покриттів Fe<sub>3</sub>Al і FeAl становила (4-9) - 10<sup>-6</sup> (мг / см<sup>2</sup>) - / с проти (1-1,5) 10<sup>-4</sup> у сталей X9MF і X18H9, причому кращі показники отримані в разі покриття FeAl.

Основна маса досліджень в області плазмового напилення інтерметалідних Fe-Al-покриттів в Західній Європі ведеться у Франції колективом лабораторії досліджень матеріалів і властивостей поверхні

(LERMPS), лабораторії металофізики Лілльського університету, лабораторії матеріалознавства університету м Метц (LETAM), а також співробітників Комісаріату атомної енергетики та ін. під керівництвом проф. T.Grosdidier [6, 7, 8-10, 17-19].

Напрямок робіт в області Fe-Al-покриттів, що проводяться цим колективом, пов'язане з дослідженням структури і властивостей газотермічних покриттів, одержуваних з порошку наноструктурного алюмінідами заліза. В якості базового матеріалу для нанесення покриттів використовується порошок сплаву Fe-40Al-0,05Zr-0,01B (ат.%) з розміром частинок 40-63 мкм, що виготовляється CEA-CEREM. Для переходу його в наноструктурний стан застосовується операція розлому в кульовій мельниці, що призводить до зменшення розміру доменів зі 100 до 9 нм [8]. У процесі розмелювання виробляють добавку в порошок 0,2 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (мол.%) Для підвищення міцності частинок. Для нанесення покриттів використовують плазмовий (Ar / He) (APS) і високошвидкісний газополум'яний метод напилення (HVOF).

Експерименти з нанесенням покриттів з порошків з розміром частинок 40-63, 20-40 і 20-100 мкм на установці CDS 100 показали, що частка нерозплавлених частинок в покритті становить 12,3; 2,4 і 5,8%, відповідно, пористість - 7,8; 6,3 і 5,8 об.%; зміст Fe<sub>3</sub>Al - 4,5; 2,8 і 4,3%; оксидів 13,3; 15,4 і 14,5%, твердість HV300 - 395, 307 і 349 [9]. У разі плазмового напилення цього покриття з порошку 40-80 мкм пористість склала 9,1%, частка Fe<sub>3</sub>Al - 2,5%, вміст оксидів - 2,3% і HV300 = 195. Причиною такої різниці в значенні HV300 вважають наклеп поверхні покриття при HVOF-методі нерозплавлених частинками порошку [10].

Відзначається, що природа пір в Fe-Al-покриттях, нанесених APS і HVOF методами, різна. У першому випадку вона розташована на кордонах сплетів, тоді як при HVOF формується в зоні контакту з нерозплавленою часткою [10].

Велика увага в цій групі робіт приділено дослідженню тонкої структури Fe-Al-покриттів, механізмів формування нанозерен з використанням скануючої і просвічує електронної мікроскопії. Виявлено, що структура HVOF-покриття з порошку інтерметаліда FeAl, що формується при швидкості охолодження розплаву 107Кс-1, є стовпчастий характер В2-фази розмірністю 50-160 нм, а також спостерігається разупорядоченості фаза (bcc) FeAl з розміром нанозерен 20 нм і менше [3]. Показано, що для формування наноструктурного FeAl-покриття в умовах HVOF-процесу слід зберігати в структурі максимальну кількість нерозплавлених частинок вихідного нанопорошку FeAl, але це веде до збільшення пористості [18].

Група співробітників Барселонського університету під керівництвом J.M.Guilemany веде дослідження структури і властивостей HVOF-покриттів з інтерметаллідів Fe і Nb [20-23]. Як напилюваного порошку також використовується Fe-40Al-0,05Zr-0,01B. Проведено дослідження поведінки покриття в умовах тертя ковзання. Показано, що показники величини зносу і коефіцієнта тертя при переході від кімнатної температури до 400 °С знижуються [20]. Вивчено процес окислення зразків з покриттям при 900 °, 1000 ° і 1100 °С, структура і склад утворюється окалини [21-22]. Результати експерименту з напилювання наноструктурних порошків, отриманих шляхом розмелювання

вихідного Fe-40AlCEA-DTEN і Fe40AlMecachrome, що відрізняються тим, що в другому випадку він проходить перед напиленням віджигання при 700 ° С, показали, що в покриттях повніше впорядкування В2-структури спостерігається в Fe40AlMecachrome .

Дослідження корозійної поведінки HVOF-покриттів з порошків FeхAlу + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeAl + TiC + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, отриманих СВС-методом, в середовищі N<sub>2</sub>-8% O<sub>2</sub>-0,02SO<sub>2</sub>-0,01% HCl були виконані в Сілезькому технологічному університеті, ПНР [11 , 24]. Для усунення пористості покриття були ущільнені фосфатною зв'язкою. Досліджено хід процесу корозії, склад продуктів.

Роботи, проведені в Харбінському технологічному інституті [4], Пекінському інституті аерокосмічних матеріалів [25] і групі університетів з Нанчанг, КНР [4], присвячені розробці газотермічних композиційних покриттів на базі інтерметаліда Fe40Al з введенням в покриття CeO<sub>2</sub> [25, 2] і WC [ 5]. Мета добавки CeO<sub>2</sub> полягає в підвищенні стійкості покриття в середовищі H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Ar при 700 ° С [25] або в умовах ерозійного і абразивного зношування [4].

Покриття формувалися при HVOF-напиленні механічних сумішей FeAl з CeO<sub>2</sub>. Встановлено склади композиційного покриття FeAl-CeO<sub>2</sub>, що забезпечують підвищення стійкості покриттів.

Застосування WC в композиції з FeAl призначене для підвищення зносостійкості покриття. Однак у даній роботі досліджено поведінку цього покриття в умовах нагрівання до 650 ° С. Встановлено, що склади Fe-40Al-12WC мають гарну жаростійкість.

Розробки в напрямку застосування методу плазмового напилення Fe-Al-покриттів були виконані у Франції CLERMPS, LETAM [26], КНР (Далиан Марітім Університет) [27], Індії (Бхаратіар Університет) [28]. Порівняння мікроструктури, фазового складу і механічних властивостей покриттів з порошку інтерметаліда Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, отриманих методами APS, LPPSiHVOF [27], показало, що структура в разі APS має звичайну ламелярну структуру, яка містить оксиди; при LPPS формується щільна гомогенна структура з малим вмістом оксиду; при HVOF покриття в основному складається з нерозплавлених сферичних частинок. Це

відбивається на механічні характеристики шарів. Величина модуля пружності ( $E$ ) змінюється від 84 ГПа (HVOF) до 176 ГПа (LPPS). Встановлено різниця в величинах  $E$  при вимірюванні її в поздовжньому і поперечному перерізі структури покриття із співвідношенням  $E_p / E_{pr} = 0,7-1,2$  в залежності від методу напилення.

В роботі [28] для отримання порошку 85Fe-15Al використаний метод МХС з наступною обробкою продукту в плазмовому струмені з отримання сфероїдизированих частинок. Досліджено вплив потужності плазмотрона в межах 5-20 кВт на фазовий склад, структуру і мікротвердість покриттів, а також на їх адгезійну міцність.

В результаті дослідження, проведеного LETAM і CLERMPS [26], встановлено вплив структурного стану вихідного порошку Fe<sub>60</sub>Al<sub>40</sub> (мікро і наноструктурний) на мікроструктуру і ступінь атомної впорядкованості плазмових покриттів. У роботі були використані методи РСФА і Мессбауєрської спектроскопії.

Комплекс дослідницьких робіт з дослідження процесу детонаційного напилення (ДН) Fe-Al-покриттів, вивчення тонкої структури формулює шарів, властивостей покриттів був проведений в 2001-2010 р.р. до Військовому Технологічному Університеті, Варшава, ПНР, Шендеровський [29-34]. У роботах були використані як Fe-40Al-0,02Zr-0,01B порошок, отриманий розпиленням розплаву, так і порошки інтерметаллідів Fe-Al, виготовлені з використанням СВС-технології та отримані шляхом саморуйнування виливків Fe-Al-C. Вивченню були піддані формування детонаційних Fe-Al-покриттів із застосуванням підшару NiCrNiAl, розвиток напруженого стану в Fe-Al-покриттях при ДН, особливості тонкої будови детонаційних Fe-Al-покриттів з утворенням аморфної структури і нерівноважних фаз, поведінка Fe-Al- покриттів в умовах абразивного зносу.

Процес напилення Fe-Al-покриттів з використанням методу високошвидкісної електродугової металізації (HVAS) при розпилюванні порошкового дроту розглянуто в статті [37], представленої фахівцями КНР (StateKeyLab. OfRemanufacturing, Пекін і Інститут хімічної фізики, Lanzhai).

Розглянуто результати поведінки Fe-Al- і Fe-Al / WC покриттів, отриманих методом HVAS, в умовах зносу при терті ковзання. Для нанесення покриттів використані порошкові дроти. Встановлено, що покриття мають високу міцність зчеплення, а введення WC підвищує їх зносостійкість. Інший шлях формування інтерметаллідних Fe-Al-покриттів при методі електродугової металізації полягає в спільному розпиленні дротів Fe і Al з наступною термообробкою покриттів при 650 ° C [36]. В результаті утворюється покриття, що складається з інтерметаллідів  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Fe}_3\text{Al}$  і  $\text{FeAl}$ .

Результати використання методу холодного напилення для отримання Fe-Al-покриттів висвітлені в публікаціях [6, 37, 38], представлених співробітниками State Key Laboratory for Mechanical Behaviour of Materials, КНР. Для цієї мети були використані механічні суміші порошків Fe і Al з наступною термообробкою при 600 ° C [38], наноструктурні порошки Fe / Al або  $\text{FeAl} / \text{Al}_2\text{O}_3$ , отримані методом механічного легування [6, 37]. При напиленні механічно легованих порошків отримується покриття яке зберігає розмір зерна на рівні 27 нм [37].

## **1.2. Вибір та обґрунтування способу нанесення покриття**

Розглянемо детально методи формування захисних покриттів.

### **Дифузійний метод**

Процес формування покриттів на металах і сплавах дифузійним методом включає три основні стадії: доставка насичуючої речовини покриття, адсорбція і реакційна дифузія. У деяких способах отримання покриттів дифузійним методом стадія доставки здійснюється механічно. По суті основна відмінність методів нанесення покриттів полягає в реалізації того або іншого механізму доставки.

Найбільш широкого поширення набув процес доставки з газової фази. Як газова фаза розглядаються або газоподібні хімічні з'єднання, молекули яких вступають на поверхні деталей в хімічні реакції і вивільняють атоми насичуючої речовини, або атоми, молекули, іони або їх агрегати, які випаровуються з поверхні матеріалу покриття і конденсуються на поверхні деталей .

Перевагами дифузійного методу, які зумовили його широке застосування в промисловості, є наступні характеристики:

- простота методу, що не вимагає складних пристосувань і устаткування;
- покриття, одержувані методом дифузійного насичення, відрізняються високою адгезією;
- для дифузійних покриттів характерна практично нульова пористість;
- метод легко застосовний для отримання рівномірних однорідних покриттів на виробках складної конфігурації.

Недоліки:

Оскільки процес нанесення покриття проводиться при високих температурах, то для збереження жароміцним сплавом своїх механічних характеристик необхідна додаткова термообробка після нанесення покриття, яка ускладнює технологію. Ще одним недоліком методу є складність отримання дифузійних покриттів на деталях великих розмірів. Тому для нанесення теплозахисних покриттів на основі інтерметалідів Fe-Al треба застосовувати більш перспективний метод.

### **Катодне розпилювання**

Катодне розпилювання здійснюється шляхом бомбардування негативно зарядженої мішені, виготовленої з матеріалу покриття, позитивно зарядженими іонами, наприклад нейтрального газу. При бомбардуванні відбувається розпилювання матеріалу мішені і конденсація частинок на поверхні деталей, що покриваються, на які подається позитивний заряд.

Одним з недоліків методу є низька продуктивність процесу, швидкість осадження складає близько 2000 нм/хв.

### **Лазерне осадження покриттів**

При використанні лазерів швидкість осадження покриттів досягає 5-10 мм/с. Процес відрізняється високою продуктивністю. Для захисту від окислення при нанесенні покриттів потрібне застосування захисних газів. Поліпшення адгезії спостерігається при деякому підплавленні поверхні підложки. До недоліків процесу слід віднести утворення пір, пов'язане з явищем кавітації, і значних



розтягуючих залишкових напруг в покритті, які приводять до розтріскування шарів, роблять негативний вплив на циклічну довговічність сплавів.

### **Електронно-променеве напилення**

При електронно-променевому способі нанесення захисних покриттів випаровування напилюваного матеріалу здійснюється шляхом бомбардування потоком електронів. Основна частка енергії електронів, що летять, витрачається на нагрів випаровуваного матеріалу (приблизно 85 %) в тонкому поверхневому шарі. Матеріал, що випарувався, конденсується на поверхні деталі. Для забезпечення задовільного зчеплення (адгезія) плівки покриття деталі підігрівають. Підігрів забезпечує також формування необхідної структури покриття. Покриття формується з парового потоку, що складається в основному з нейтральних атомів. Для отримання однорідних по складу і структурі покриттів деталі здійснюють обертальний або зворотно-поступальний рух.

### **Плазмове напилення**

При плазмовому напиленні покриття формується з дрібних розплавлених частинок, які переносяться на поверхню при розпилюванні плазмою дроту, стрижнів або з порошку. У технологіях плазмового напилення велике значення мають час перебування частинок в плазмі і час доставки нагрітих частинок до підложки, вдосконалення плазмових установок, знання процесів, що протікають в низькотемпературній плазмі при напиленні покриттів. У потоці плазми частинки порошку нагріваються приблизно до 10000 К. Передача теплоти від плазми до порошкових частинок здійснюється в основному теплопровідністю і конвекцією.

Слід зазначити, що швидкість частинок, падаючих на деталь по перетину плями напилення, розподіляється у край нерівномірно і на периферії може бути в 3-4 рази менше, ніж в центрі плями [53].

Під дією поверхневого натягнення розплавлені частинки набувають форми сфери. Сферичні частинки на шляху до підложки остигають і, падаючи на поверхню деталі, розтікаються і кристалізуються. Чергові порції розплавлених частинок падають на частинки покриття, що вже закристалізовувалися, тобто розплавлені частинки практично за весь час напилення падають на затверділу

поверхню і утворюють пластинчасту структуру. Покриття формується шляхом послідовного укладання частинок, що деформуються. Процес супроводжується утворенням мікропорожнин, які заповнюються газом. Для зменшення пористості і підвищення однорідності напилюваних покриттів зменшують розмір напилюваних частинок. Проте дуже дрібні частинки (розмір фракції менше 10-20 мкм) часто виявляються непридатними.

Швидка кристалізація частинок на поверхні деталі дозволяє одержувати покриття із структурою пересичених твердих розчинів. Якість покриття залежить від процесів, що протікають при взаємодії частинок з плазмою, і від процесів при формуванні покриття на поверхні деталі (якість контактів між частинками, швидка кристалізація і деформація частинок, взаємодія напилюваної речовини із зовнішнім середовищем). Найважливіше значення має середовище, в якому здійснюється процес осадження тих або інших покриттів.

Плазмове напилення може здійснюватися на повітрі або у вакуумі.

Як плазмоутворюючі гази можуть використовуватися  $\text{Ar}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{N}_2$  або їх суміші. Істотне поліпшення властивостей покриттів досягається при використанні плазмового напилення.

Плазмова технологія має ряд переваг.

1. Швидкість частинок напилюваних речовин в 2-3 рази вища, ніж при інших методах напилення. Це забезпечує вищу щільність покриттів, менш ніж до 0,5 % зменшує пористість, підвищує якість поверхонь.

2. Покращуються умови для взаємодифузії між покриттям і підложкою і підвищення адгезії.

3. При нанесенні покриттів відсутні реакційні гази, які можуть приводити до окислення металів, погіршення зчеплення і сколювання кераміки. Склад покриття на деталях повністю відповідає складу початкового матеріалу для покриття.

4. Високий відсоток використання матеріалів для покриття (до 40 %). При плазменному напиленні одержують покриття щільніші, ніж в установках електронно-променевого випаровування.

5. Найбільш висока точність контролю складу покриття, чим при будь-якому іншому процесі.

- застосування матеріалів тільки в порошковій формі;
  - застосування матеріалів із стабільною рідкою фазою;
  - мінімальна товщина покриттів обмежена розмірами частинок порошків;
- [52].

Із усіх розглянутих методів нанесення теплозахисних покриттів на втулки газотурбінних двигунів в наш час застосовують переважно два методи: електронно-променеве осадження і плазмове напилення, оскільки вони краще, ніж інші методи, забезпечують необхідні властивості та характеристики покриттів. Кожному з цих методів властиві певні переваги і недоліки, що дозволяє диференціювати можливість їх застосування [52].

При електронно-променевому осадженні відбувається випаровування матеріалу, що наноситься, за допомогою електронного променя і подальше його осадження на втулку. Втулки обертаються із заданою частотою для отримання рівномірного по товщині покриття по всій поверхні. Недолік цього процесу - труднощі відтворення властивостей покриттів (хімічного складу, мікроструктури, товщини). Стабільну структуру від партії до партії можна забезпечити лише при підтримці у вузьких межах швидкості осадження і температури підложки. Електронно-променеве осадження дає покриття практично з 100 %-ною щільністю, рівноосною структурою, що запобігає дифузії кисню і сірки по межах зерен до основного матеріалу.

Катодне травлення (процес дії на виріб дуги, що переміщається, між соплом плазматрону і підложкою) забезпечує попередній нагрів і очищення поверхні підложки, подачу додаткової енергії для розплавлення частинок напилюваного матеріалу і нагрів поверхні підложки під час напилення для поліпшення адгезії. В цілому процес катодного травлення значно покращує якість напилюваного покриття.

Слід зазначити, що, на відміну від альтернативного електронно-променевого методу, плазмовий метод дозволяє одержувати майже на 50 %

пластичніші металеві складові теплозахисних систем покриттів, зокрема при низьких температурах у зв'язку з відсутністю міжзерен, перпендикулярно розташованих по відношенню до поверхні деталі; і майже на 50 % вище по жаростійкості, чим у електронно-променевих покриттів того жтскладу. Проте плазмове напилення не дозволяє одержувати столбчатую структуру керамічного покриття [53].

Одним з найважливіших чинників, що впливають на експлуатаційні характеристики, є якість і склад використовуваних для напилення порошків.

Міцність зчеплення покриття з підложкою значною мірою визначається підготовкою поверхні перед напиленням. У сучасній зарубіжній практиці установки для нанесення плазмових покриттів оснащуються маніпуляторами, що забезпечують складні переміщення втулки і плазмотрона. Управління маніпуляторами здійснюється комп'ютером. Комп'ютеризація установки дозволяє одержувати рівномірні по товщині покриття і проводити швидку переналадку на відмінний від попереднього профіль втулки .

Покриття, напилені плазмовим методом, мають певні переваги перед електронно-променевими: ширші можливості введення легуючих елементів в покриття; можливість покривати деталі великих розмірів; устаткування для плазмового напилення в істотно дешевше, ніж для електронно-променевого випаровування. Останнє обходиться в 4-5 разів дорожче, ніж плазмове напилення.

Плазмові жаростійкі покриття, мають приблизно такий же розподіл легуючих елементів, як і електронно-променеві. Порівняння для систем Fe-Al показало, що плазмові покриття по жаростійкості не поступаються, а по пластичності перевершують електронно-променеві покриття, які мають такий же склад.

Випробування на циклічне окислення при 1394 К покриттів Fe-Al показали, що довговічність електронно-променевого покриття склала 655 годин, плазмового - 635 годин і вакуум-плазмового - близько 1000 годин. Введення у плазмове покриття додатково від 1 до 2% Si приводять до збільшення довговічності приблизно в 2 рази. Покриття з 1,6% Si витримує 1785 год.

випробувань. Випробування на сульфідну корозію показали, що всі покриття мають помірну стійкість до сульфідної корозії.

### **1.3. Обґрунтування вибору обладнання для плазмового напилення**

В наш час існує велика кількість установок для плазмового напилення покриттів. До основних признаков обладнання можна віднести:

1. Ступінь автоматизації (установки з ручним, полуавтоматичним та автоматичним програмним керуванням).
2. Число робочих позицій (однопозиційні, багатопозиційні установки).

При виборі обладнання для плазмового нанесення порошкових матеріалів необхідно дотримуватися наступних вимог:

- обладнання повинно забезпечувати отримання рівномірних по товщині покриттів з високою якістю та міцністю, необхідній пористістю та шорсткістю;
- обладнання повинно відповідати вимогам санітарно-гігієнічних умов праці та охорони навколишнього середовища;
- обладнання повинно мати достатньо високу ефективність використання енергоресурсів, матеріалу, що напилюється, високу продуктивність та володіти низькою вартістю;
- габарити та вага обладнання повинні бути мінімально можливими.

В даний час створено кілька промислових установок для плазмового напилення, які дозволяють одержувати покриття із широким спектром властивостей із різних матеріалів. Розглянемо основні із них.

Установка УМП-6 серійно випускається Барнаульским апаратно-механічним заводом з 1980 р. Укомплектована джерелом живлення АПР-402. Застосовано низьковольтну уелектромеханічну систему підпалювання дугового разряду. Плазмотрон комплектується електродами на весь ресурс роботи (2100 ч). Пульт керування установки обладнаний аварійними і технологічними системами блокування.

До недоліків установки УМП-6 відносяться нестабільність режимів плазмотрона на кінцевому етапі гарантованого ресурсу, внаслідок зміни конфігурації електродів і недостатньо надійна система підпалювання дугового разряду.

На базі установки УМП-6 розроблена і прийнята до серійного виробництва серія плазмотронів для напилення внутрішніх поверхонь деталей діаметром від 40 мм і більше.

Розроблені плазмотрони цієї серії мають назви ППП-1600, ППП-1-1000 і ППП-1-1500 у залежності від глибини порожнини оброблюваної деталі в міліметрах.

Універсальна плазмова установка УПУ-3 серійно випускається Ржевским РПКО "Електромеханіка". Поставляється в комплекті з джерелом живлення ИПН 160/600, призначеним для підживлення силового ланцюга як при металізації дротом, так і при нанесенні порошкових покриттів.

Установка має модифікації: УПУ-3М, УПУ-3Д. Комплектується пультом керування, дозатором порошку, плазмотронами ГН-5Р, ГН-5М.

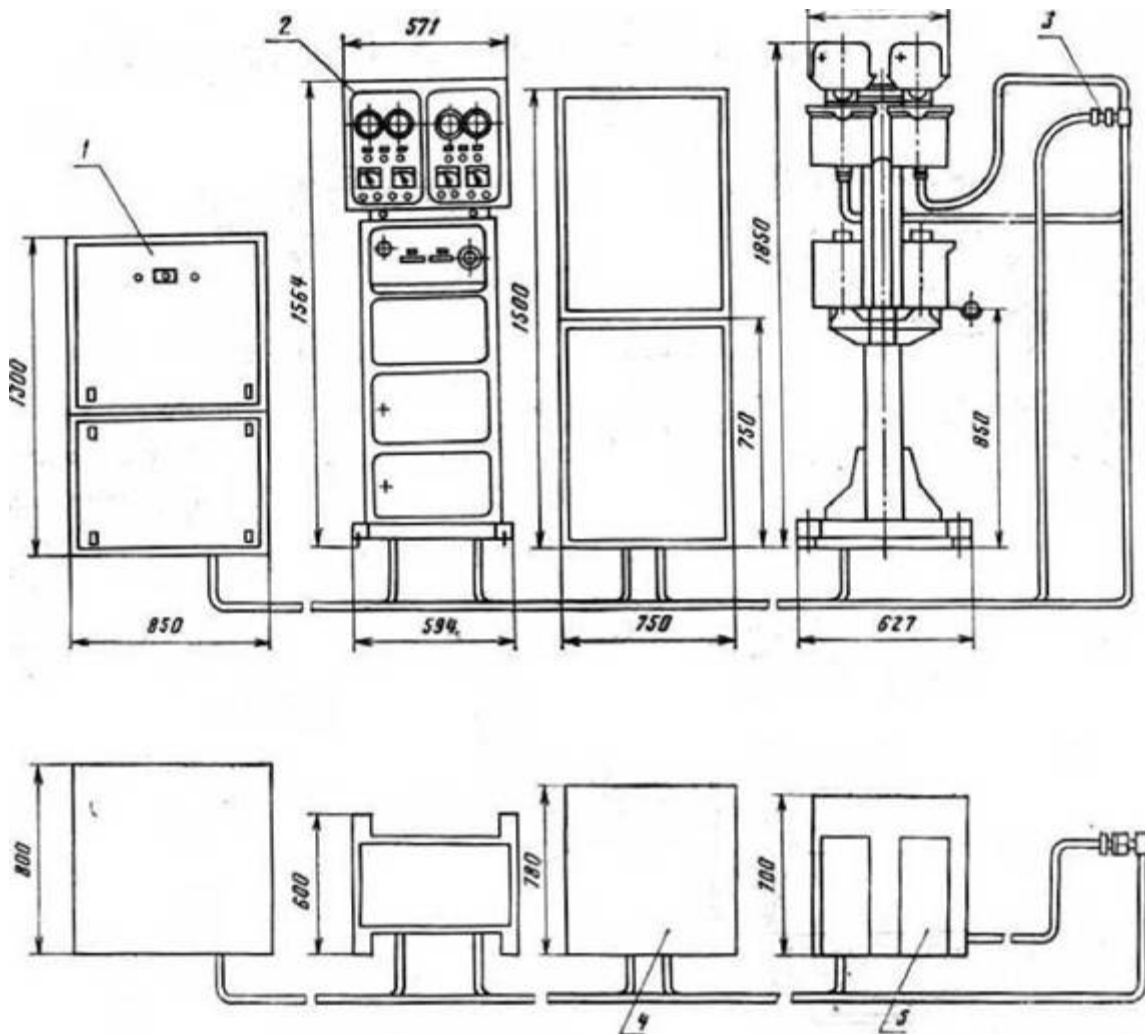
В установці УПУ-3Д замість плазмотронів ГН-5Р и ГН-5Н розроблений ряд плазмотронів загального і спеціального призначення (ПП-125; ПП-25; ПМ-25; ПВ-25), що при високій надійності мають малі розміри і масу. Дозатори ДР-2 і ДШ-1 забезпечують рівномірну подачу порошкових матеріалів. Розроблено прилад для контролю витрат порошку (РПЗ-1) і газу, а також температури охолоджуючої води.

Установка плазмового напилення АПР-403, розроблена ВНИИЭСО, призначена для плазмового напилення порошками і дротом; максимальна продуктивність 15 кг/год.

З урахуванням досвіду експлуатації усіх вищезгаданих установок, їх недоліків та вимог, що до обладнання для плазмового нанесення порошкових матеріалів, в ІЕЗ ім.Патона створена і успішно експлуатується установка плазмового напилення «Київ-7» При її конструюванні був врахований досвід по створенню аналогічних установок і реалізовано ряд положень:

1. Всі комунікації, які живлять плазмотрон і механізми маніпулятора знаходяться зовні камери. При цьому немає необхідності захисту комунікацій від перегріву і запиленості. Введення комунікацій виконано через вакуумні ущільнення.

3. В установці передбачений пристрій, що дозволяє позбутися шкідливого впливу низькочастотних пульсацій плазмового струменя і забезпечую оптимальний режим модуляції.



- 1 - блок електроживлення; 2 - блок управління;
- 3 - плазматрон;
- 4 - блок автономного охолодження;
- 5 - блок подачі порошків

**Рисунок.1.1. Принципова схема установки Київ-7**

## 1.4 Вибір режиму плазмового напилення

Формування покриттів при плазмовому напиленні багато в чому залежить від стану частинок в процесі напилення. Для вибору режимів плазмового напилення необхідно враховувати енергетичний стан частинок в струмені плазми, яке залежить від великої кількості параметрів. З одного боку, це характеристики самого плазмового струменя - її швидкість і температура, в'язкість і теплопровідність газового середовища, ступінь дисоціації і іонізації молекул газу. З іншого боку, це стан, виходячи із загальних закономірностей газодинаміки і теплообміну, визначається такими теплофізичними властивостями матеріалу частинок, як щільність, теплоємність, теплопровідність, теплота плавлення, а також рядом геометричних факторів - розміром частинок, їх формою.

Мінімальну електричну потужність (в разі аргонової плазмового струменя), необхідну для розплавлення частинок дисперсного матеріалу при русі їх в обсязі плазмового струменя, можна оцінити виходячи з наступного виразу [39]:

$I$  - струм;

$U$  - напруга;

$V_{\Gamma}$  - витрата плазмообразующего газу;

$d_{\text{ч}}$  - діаметр частинки;

$D$  - параметр труднощі плавлення;

$R_0$  - радіус сопла анода;

$L_{\text{вн}}$  - положення точки введення порошку;

$\epsilon$  - відносне відстань траєкторії руху частинки від осі струменя ( $\epsilon = R / R_0$ ).

Загалом в вигляді виразу для попередньої інженерної оцінки режиму плазмового напилення конкретного дисперсного матеріалу може бути представлено в наступному вигляді:

$K_p$  - постійна плазматрона, що залежить від складу газу;

$n$  і  $m$  - статечні показники при  $I$  і  $V_{\Gamma}$ , обумовлені видом залежності  $\eta_T = f(I, V_{\Gamma})$ .



Оскільки напруга (U) в основному визначається конструкцією плазмотрона і складом плазмообразуючого газу (ПГ), то при наявності матеріалу певної дисперсності вибір режиму його наплення полягає у встановленні оптимальної комбінації сили струму і витрати плазмообразуючого газу при вихідному мінімальному рівні відносини.

Нижній рівень витрат газу в багатьох випадках пов'язаний з умовами роботи анода і оцінюється в межах 25-35 дм<sup>3</sup> / хв.

Для вибору режимів плазмового наплення покриттів на основі інтерметалідів Fe-Al в даній роботі використовувалася програма комп'ютерного моделювання плазмового наплення CASPSP [40]. Однак в базі даних цієї програми відсутні характеристики інтерметаллідів Fe-Al. Тому було проведено розрахунок параметра труднощі плавлення для інтерметаллідів Fe<sub>3</sub>Al, FeAl, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> для вибору найбільш близьких за значенням параметра труднощів плавлення матеріалів, з наявних в базі даних програми.

У повному вигляді з урахуванням поправки Б.І. Китаєва до коефіцієнта теплопередачі на внутрішнє тепловий опір частки, а також можливого внеску екзотермічних ефектів взаємодії в обсязі частки вираз для визначення параметра тугоплавлення плавлення має такий вигляд [39]:

$$D = (\text{іпл} - nQ_{\text{екз}}) / \rho_{\text{ж}} (1 + 0,2Bi)^2 \quad (4.4)$$

Де іпл - питома ентальпія розплаву при температурі плавлення (Тпл);

nQ-ступінь використання екзотермічної ефекту на ділянці нагріву матеріалу до розплавлення;

Qекз-питома масовий екзотермічний ефект взаємодії;

ρж - щільність матеріалу в рідкому стані;

Bi - критерій Біо (для аргонної струменя при напленні більшості матеріалів становить <0,2).

У разі відсутності теплового ефекту взаємодії і при нагріванні в умовах Bi <0,2 параметр труднощі плавлення може бути розрахований за спрощеною формулою:

$$D = i_{пл}^2 P_{ч} = \frac{i_{пл}^2}{P_{ч}} = C_{\Xi}^2 P_{ч} T_{пл}^2 \quad (4.5)$$

Параметр туго плавлення виражає відношення кількості тепла, необхідного для розплавлення одиниці об'єму частинки, до часу перебування частинки в зоні нагріву (мірою останнього служить щільність матеріалу, що визначає інерційність частки по відношенню до оточуючої газовому струмені). Для більшості напилюються дисперсних матеріалів цей показник є основним.

Для визначення параметра туго плавлення інтерметалідів FeAl проведено розрахунок питомої ентальпії іпл даних матеріалів з урахуванням питомої теплоємності Ср .

Характеристики інтерметалідів FeAl і результати розрахунків параметра труднощі плавлення наведені в табл. 2.1.

**Таблиця 2.1. Теплофізичні характеристики інтерметалідів FeAl [55, 56]**

	$\rho_{тв.},$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{ж.},$ кг/м <sup>3</sup>	$T_{пл.},$ К	$-i_{298.},$ кДж/кг	$-i_{пл.},$ кДж/кг	$C_p, \text{Дж/кг}\cdot\text{К}$			$D\cdot 10^{-10},$ кДж <sup>2</sup> /кг·м <sup>3</sup>
						a	b	c	
FeAl	5510	4260	1483	607	262	510	250	5,6	2,9

Найбільш близьким за значенням параметра туго плавлення для інтерметаліда FeAl є чавун (2,1 10<sup>-10</sup>, кДж<sup>2</sup> / кг м<sup>3</sup>), а для Fe2Al5 - алюміній (0,66 10<sup>-10</sup>, кДж<sup>2</sup> / кг м<sup>3</sup>). Тому попередній вибір режимів плазмового напилення покриттів з інтерметаллідів за допомогою програми CASPSP проводився для чавуну і алюмінію.

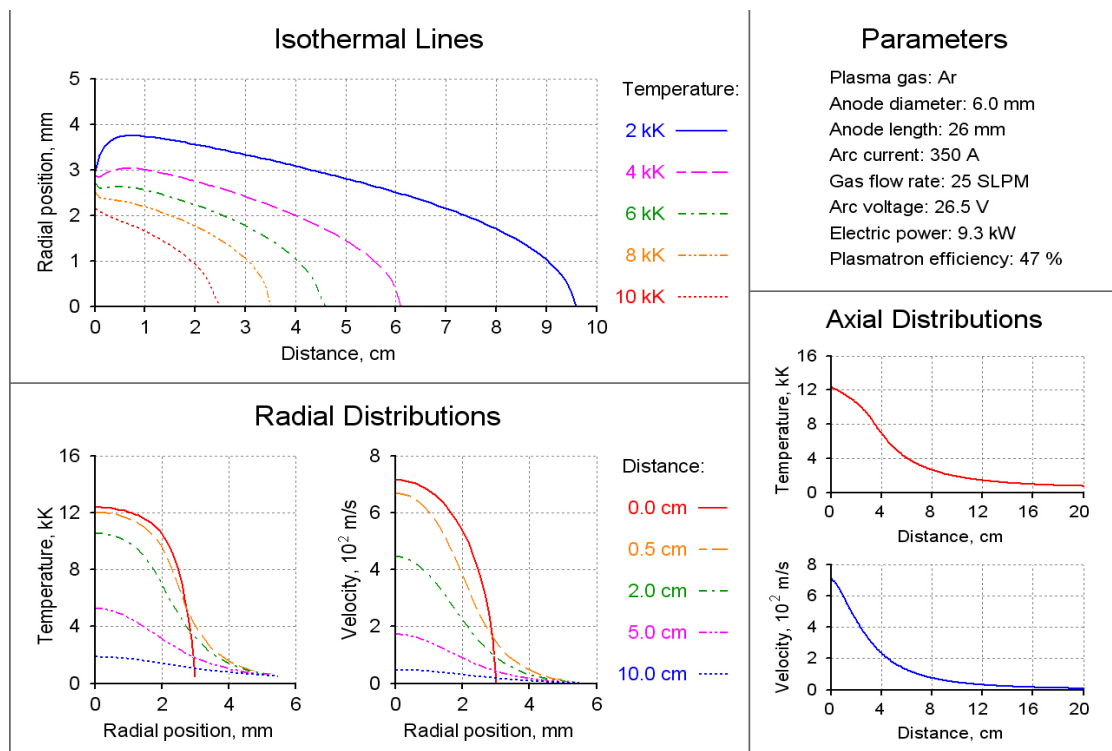
Для комп'ютерного моделювання процесу плазмового напилення порошків використано програмне забезпечення CASPSP (версія 3.1), розроблене в ІЕЗ ім. Є.О.Патона [40]. Воно призначене для комп'ютерного моделювання турбулентних плазмових струменів, що використовуються при нанесенні покриттів, а також моделюванні процесів нагріву і руху напилюваних частинок в таких струменях.

CASPSР є пакет прикладних програм, що складаються з двох модулів:

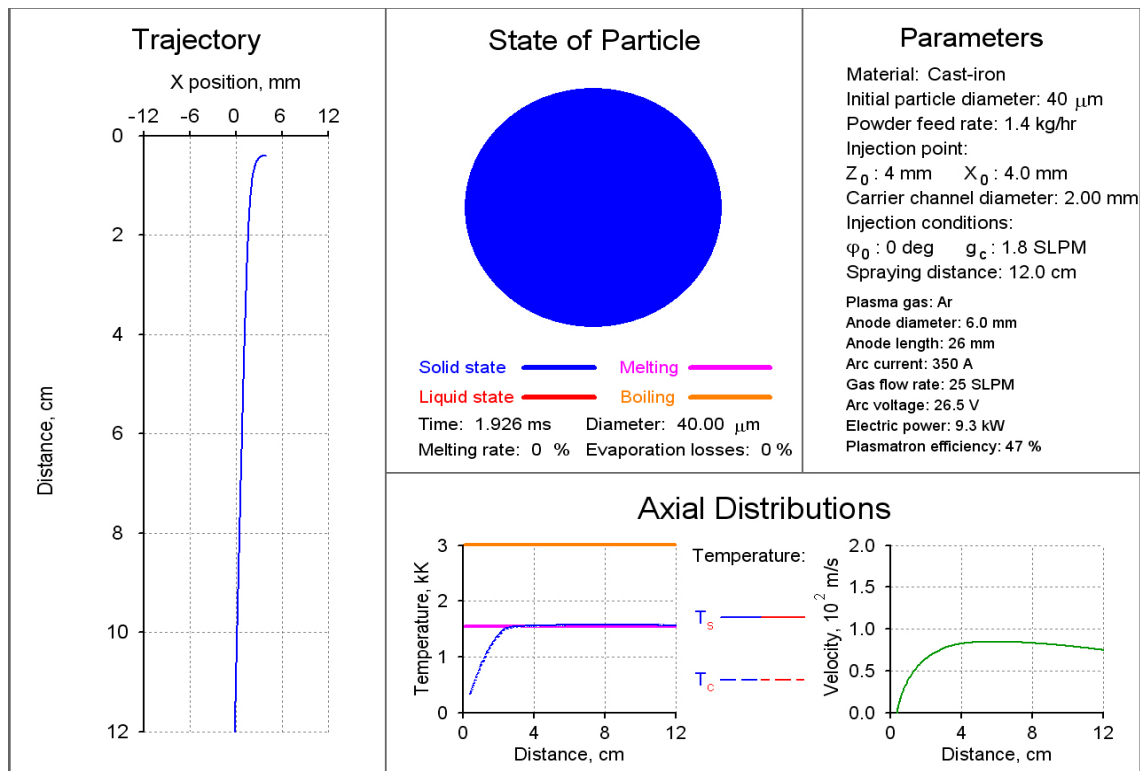
- моделювання плазмового струменя;
- моделювання напильюються частинок;

Перший модуль призначений для моделювання дозвукових плазмових струменів, що генеруються плазмотронами побічної дії і стікали у відкритий простір.

Цей модуль дозволяє розраховувати і відображати на дисплеї просторовий розподіл температури і швидкості плазмової струї св залежності від розмірів сопла-анода і режиму роботи плазмотрона (струму дуги, складу і витрати плазмообразующего газу) (рис.2.1).



**Рисунок.2.1. Графічне представлення результатів моделювання плазмового струменя**



**Рисунок.2.2. Графічне представлення результатів моделювання процесу плазмового напилення частинок**

Другий модуль служить для моделювання поведінки напилюються частинок в плазмовому струмені з попередньо обчисленими просторовими розподілами температури і швидкості. Він дозволяє розраховувати і відображати траєкторію, швидкість і параметри теплового стану частинки, в залежності від складу її матеріалу, його теплофізичних характеристик, початкової діаметра частинки і умов її введення в струмінь, витрати напилюваного матеріалу (рис.2.2).

Метою чисельного експерименту проведеного з використанням CASPSP, було встановити вплив умов роботи плазмотрона (сила струму, напруга, потужність), складу і витрати плазмообразуючого газу, розміру часток порошку на результати процесу плазмового напилення порошку FeAl (ступінь проплавлення і випаровування частинок), швидкість і температуру нагрівання частинок. Крім того було досліджено вплив складу і витрати ПГ, сили струму дуги на розмір ефективної зони нагріву плазмовим струменем частинок порошку FeAl з  $T_{пл} = 1483\text{K}$  (табл.4.2)

Умови експерименту:

1. Плазмообразующий газ - Ar, N<sub>2</sub>
2. Сила струму - 350-500А (при Ar), при 350А (N<sub>2</sub>)
3. Витрата плазмообразующего газа - 25-35 л / хв (при Ar), 30-35 л / хв (N<sub>2</sub>)

Розмір частинок порошку - 40-60 мкм.

Постійні параметри:

- витрата порошку-1,4 кг / год;
- умови введення частинок:  $Z_0 = 4$  мм,  $X_0 = 4$  мм,  $\theta = 0^\circ$ ;
- діаметр інжектора 2мм;
- витрата транспортує газу 1,8 л / хв;
- дистанція напилювання 120мм.

Аналіз впливу складу плазмообразующего газу на нагрів і рух частинки FeAl, показав, що найбільш сприятливим виявилось використання в якості ПГ чистого Ar. При вибраних параметрах (струму - 350-500А, витрати ПГ - 25-35 л / хв) випаровування частки відсутня при повному її проплавлення. Підвищення потужності аргонової плазмового струменя з 10,5 до 14,5 кВт шляхом збільшення сили струму (з 400 до 500 А) підвищує температуру і швидкість часток, але створює небезпеку випаровування матеріалу. Вона реалізується при використанні частинок різного діаметра. При використанні струму менш 400А частки не досягають рідкого стану з огляду на зниження температури плазмового струменя (з 13000К до 12000К). Прімененіє як ПГ азоту веде до підвищення напруги на дузі і зростання електричної потужності плазмотрона при постійному струмі ( $I = \text{const}$ ). Це інтенсифікує процес теплообміну, що призводить до швидкого перегріву поверхні і розвитку процесу випаровування матеріалу частинки FeAl, особливо значним, якщо траєкторія руху частинок розташована поблизу осі плазмового струменя (для частинок розміром 40-60мкм).

$$q = \alpha \Delta T \quad (4.8)$$

$q$ -щільність теплового потоку, Вт / м<sup>2</sup>;

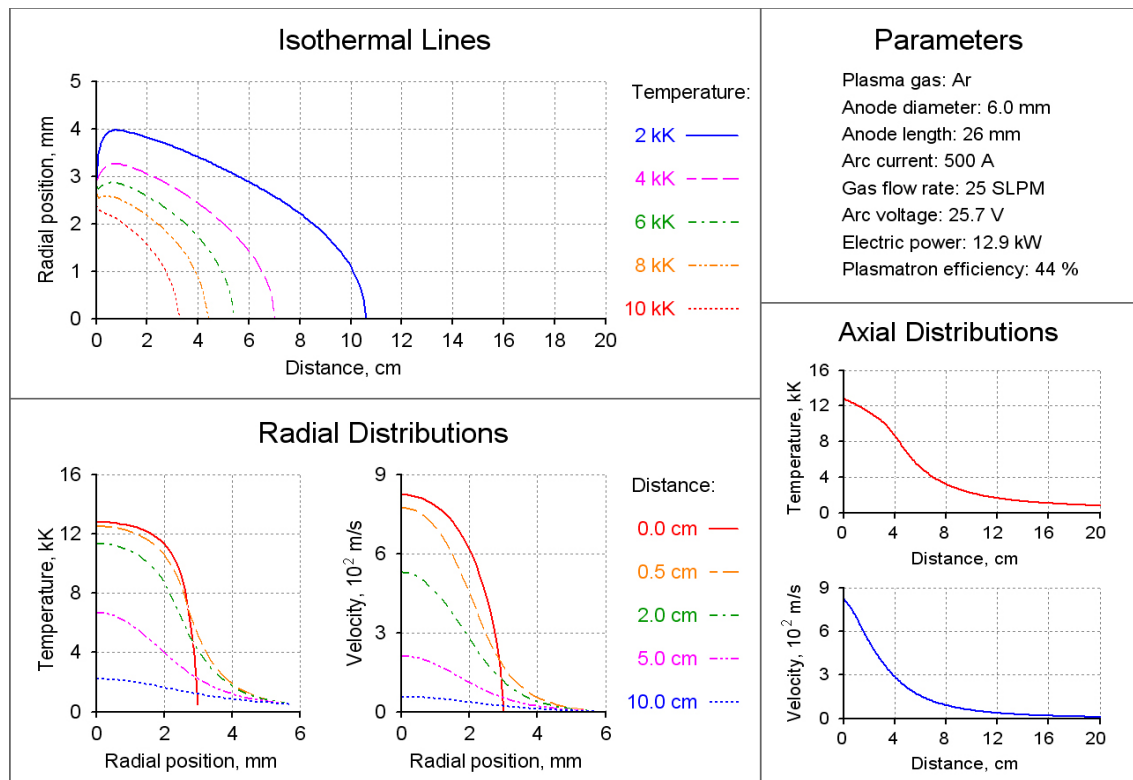
$\alpha$ -коефіцієнт теплопередачі плазмообразующего газу (для аргону  $\alpha = 0,016$  Вт / (м<sup>2</sup> · К), а для азоту  $\alpha = 0,024$ Вт / (м<sup>2</sup> · К)).

Також слід зазначити, що з застосуванням азоту в якості плазмообразуючого газу, розмір зони ефективного нагріву плазмового струменя (довжина і ширина) більше, ніж у випадку застосування аргону. Тому доцільно застосовувати аргон-азотну суміш в якості плазмообразуючого газу для збільшення ефективної зони нагріву.

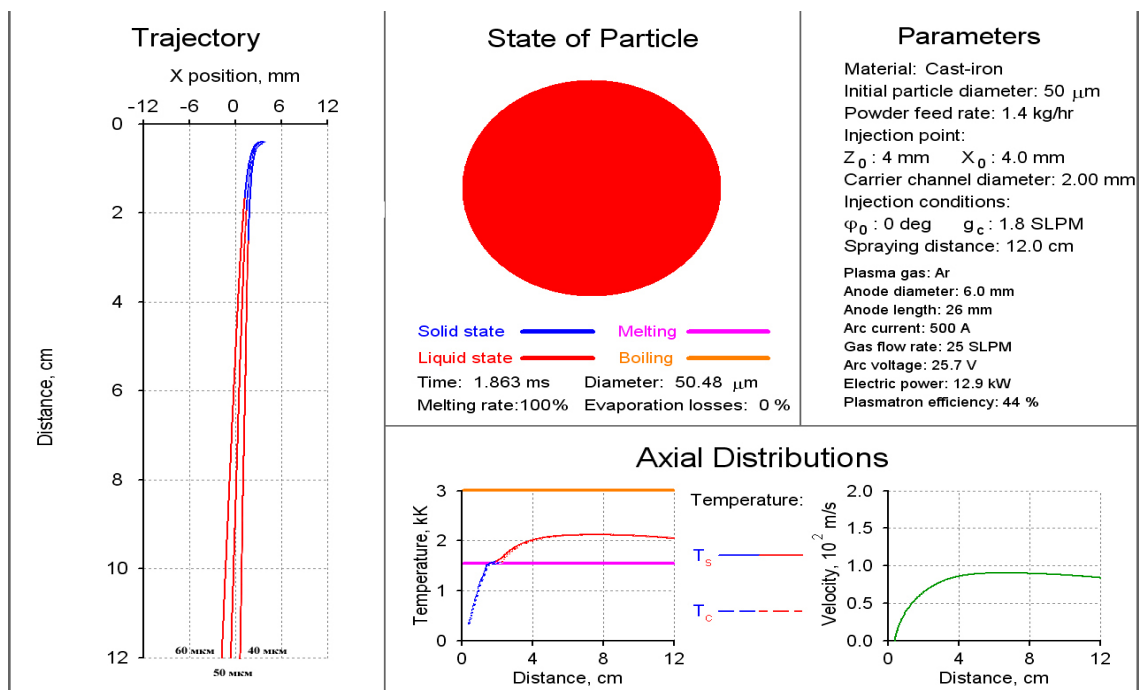
Аналіз впливу витрати плазмообразуючого газу на плазмового напилення порошку FeAl, виконаний на прикладі Ar-плазми зі зміною витрати аргону від 25 до 35 л / хв, показав, що збільшення витрат робочого газу в даних межах при силі струму 350-450А призводить до того, що частки не досягають рідкого стану з огляду на зменшення температури плазмового струменя зі збільшенням витрати плазмообразуючого газу. Однак при струмі 350А і мінімальних витрат газу частинки розміром менше 40 мкм не потрапляють в центральну частину плазмового струменя і не проплавляються, тоді як при струмі вище 450А частинки потрапляють в гарячу область струменя і повністю проплавляються. Дистанція напилення вибиралася виходячи з довжини активної зони плазмового струменя для ПГ Ar при струмі 500А.

Таким чином, виходячи з отриманих даних комп'ютерного моделювання для плазмового напилення порошку FeAl, за умов введення частинок:  $Z_0 = 4$  мм,  $X_0 = 4$  мм,  $\theta = 0^\circ$ , діаметрі інжектора 2мм, витраті транспортує газу Ar - 1,8 л / хв , рекомендуються такі параметри процесу напилення:

1. Плазмообразующий газ - Ar
2. Сила струму -500А
3. Витрата плазмообразующего газу - 25 л / хв
4. Розмір частинок порошку - 40-60 мкм.
5. Дистанція напилення - 120 мм
6. Витрата порошку-1,4 кг / год



**Рисунок 2.3. Результати чисельного експерименту по плазмовому напиленню порошку FeAl**



**Рисунок 2.4. Результати чисельного експерименту по плазмовому напилюванню порошку FeAl**

Розподіл температури, швидкості, розмір активної зони плазмового струменя відображені на рис.4.3, а на рис.4.4 показана траєкторія, швидкість і параметри теплового стану частинок FeAl розміром 40,50,60 мкм при даних параметрах напилення.

Для дослідження фізико-хімічних процесів, що відбуваються при плазмовому напиленні порошків інтерметаллідів Fe-Al, отриманих методом МХС, шляхом аналізу впливу параметрів напилення на форму, розміри і мікротвердість напилюються частинок, форму і розміри формуються пліток, структуру, фазовий склад і мікротвердість покриттів були обрані режими показані в табл. 2.2.

**Таблиця 2.2. Режими плазмового напилення для дослідження часток порошків і сплетів**

	I, А	U, В	W, кВт	h, мм	$Q_{Ar+N_2}$ , л/мин	$-i_{пл.}$ , МДж/кг
Режим 1	400	40	16	120	25(22+3)	21
Режим 2	450		18			24
Режим 3	500		20			27

### 1.5. Спосіб отримання порошку Fe-Al

Для формування порошків інтерметаллідів системи Fe-Al методом МХС або МЛ з вихідних порошків процес проводиться в високоенергетичних кульових млинах (планетарна або вібромельниці). При цьому для захисту шихти від окислення процес необхідно проводити в захисному середовищі. З метою усунення налипання шихти на розмельні тіла і стінку барабана в суміш додається поверхнево активна речовина (ПАР).

Встановлено, що в процесах МХС і МЛ відбувається формування твердого розчину Fe (Al) з розміром зерна ~ 12-20 нм. На час формування твердого розчину Fe (Al) впливає тип млина і швидкість обробки. При цьому проведення процесу в



низькоенергетичних млинах призводить до гомогенізації продуктів МХС (МЛ) і формування твердого розчину Fe (Al). Використання високоенергетичних млинів дозволяє отримати інтерметаліди з низьким ступенем дальнього порядку. Крім того, на час утворення твердого розчину Fe (Al) в процесі МХС (МЛ) впливає дисперсність вихідних порошків. Використання дрібнодисперсних порошків з розміром частинок  $<20$  мкм призводить до інтенсифікації утворення твердого розчину Fe (Al) в процесі МХС (МЛ).

**Таблиця 1.1.База даних за технологією отримання порошків інтерметаллідів FeAl методом МХС і МЛ**

Синтезовані порошки	Метод отримання	Вихідні компоненти	ПАВ	Устаткування	м.ш./	Швидкість обробки,	Розмельні тіла	Середовище	Час	Харак-ка продуктів синтезу	Літ-ри
					м.п.*	об/хв					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FeAl	МЛ	Fe (99,9%) –325 mesh,	-	Вібраційний млин SPEX 8000D	8:01	-	-	Аргон	30 год	Формування тв. Розч-уFe (Al) відбувається не за рахунок розчинення Al вFe. Середній розмір ОКР: 15 нм	7
		Al(99,9%) - 400 mesh									
FeAl	МХС	Fe (99,96%) – 40-100мкм,			Енергія J, Вт/бар			Аргон	0,5-	Низькоенергетична обробка призводить до утворення твердого розчину Fe (Al)	9
				Вібраційний планетарний млин FritchPulversette 7	1				28 год		
		Al (99,96%) – 40-100 мкм			20					ітерметаліди FeAl з низьким ступенем дальнього порядку	
				Планетарний млин МАПФ-2М	98-120						

## 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ НАПИЛЕННЯ

### 2.1. Обладнання що використовується

В данній магістерській дисертації використовується модернізований багатосекційний плазмотрон, який має шість міжелектродних вставок, за рахунок чого робоча напруга може бути підвищена до 150 В. В якості матеріалу катода при роботі в аргоні в даному плазмотроні використовуються прутки лантанового вольфраму марки ВЛ-15 (ТУ 48-18-27-72) [54].

Плазмотрон ПН-7М дозволяє одержувати покриття з різних матеріалів з високою міцністю зчеплення і густиною.

Основні технічні дані плазмотрона ПН-7М:

Діаметр дугового каналу, мм .....10,0

Діаметр вихідного сопла, мм .....12,0

Довжина дугового каналу, мм .....75,0

Максимальна робоча напруга, В .....150

Максимальний робочий струм, А.....450

Включення плазмотрона, регулювання транспортуючого газів здійснюється з пульта керування установки «Київ-7». Водяне охолодження плазмотрона, джерел живлення.

Для обертання та пересування деталі в процесі напилення використовується маніпулятор. Управління маніпулятором здійснюється з пульта. Обертання напилюваної деталі, поперечний і поворотно-поступальний рух забезпечується двома двигунами постійного струму (Д-90).

Найбільшу стабільність подачі порошку забезпечує порошкоживлювач з механічним дозуванням і саме він є більш перспективним при проведенні процесу нанесення порошкових матеріалів плазмовим напиленням інтерметалідного покриття.

В установці для плазмового напилення «Київ-7» для рівномірної подачі порошку розроблений і виготовлений спеціальний живлювач роторного типу. Порошок з бункера потрапляє в канал над ротором у вигляді шестерні і заповнює її пази, а потім при обертанні ротора висипається в нижню порожнину і транспортує газом подається в плазмотрон. Наявність ущільнень запобігає підсосу повітря. Дозування подачі напилюваного матеріалу здійснюється зміною швидкості обертання ротора.

Для уловлювання частинок порошку встановлений фільтр.

Джерело живлення постійного струму ВДУ-500, служить для живлення силового ланцюга при нанесенні покриттів порошковими матеріалами.

Джерело живлення являє собою полу провідниковий випрямляч з падаючою зовнішньою вольт-амперною характеристикою. Джерело складається із трифазного силового трансформатора; блоку випрямлячів, зібраного на кремнієвих діодах В-320 по трифазній мостовій схемі (схема Ларіонова); блоку сигнальної, пускової та регулюючої апаратури. Принцип регулювання робочого струму в ВДУ-500 заснований на переміщенні магнітних шунтів, при якому змінюється доля магнітного потоку, який створений первиною обмоткою трансформатора.

Для створення різних напруг холостого ходу первина обмотка трансформатора поділена на три секції. Дві секції обмотки розміщені над вторинною обмоткою. Третя секція розміщена по другу сторону шунта. Ступені переключують переносом перемички на вивідній панелі трансформатора.

Джерело живлення забезпечує плавне регулювання зварювального струму в межах 160—600 А та може працювати при напрузі холостого ходу від 80 до 160 В [54].

## **2.2 Вибір допоміжного обладнання**

Одна із найважливіших характеристик плазмових покриттів, яка визначає їх експлуатаційні властивості – міцність зчеплення напиленого шару з деталлю.

Для активації поверхні основи (підвищення її здатності до утворення міцного зв'язку з покриттям) та для видалення з поверхні виробу залишків газоциркуляційного покриття, перед напиленням застосовують струменево-абразивну обробку, яку виконують за допомогою установки марки АС-50 для сухої струменево-абразивної підготовки поверхні.

Для рівномірного транспортування порошку в плазмовий розпилювач він повинен мати гарну сипучість. З метою покращення сипучості порошку його сушать. Сушку перед напиленням виконують в сушильній шафі з регулюванням температури до 300°C типу ШСВ 3,5.3,5.6/3, прокалювання порошку виконують в електричній муфельній печі СНОЛ-1,6.2,5.1/9-114.

Для термічної обробки після процесу плазмового напилення використовується електровакуумна піч СНВ-1-3-1/16И1 по ТУ16-531.594-76.

## **2.3 Обладнання для вимірювання твердості**

Визначення мікротвердості покриттів виконувалося на приборі ПМТ-3, методом вдавлення алмазної пірамідки Віккерса з навантаженням 50 г.

Мікротвердомір ПМТ-3 призначений для вимірювання мікротвердості матеріалів, сплавів, скла, кераміки і мінералів методом вдавлення в випробовуваний матеріал алмазного наконечника Віккерса з квадратною основою чотиригранної піраміди, що забезпечує геометричне і механічне подібну відбитків у міру поглиблення індентора під дією навантаження.

Вимірювання діагоналей відбитків роблять за допомогою фотоелектричного окулярного мікрометра та електронно-обчислювального пристрою (Еву), а також

за допомогою гвинтового окулярного мікрометра МОВ-1-16х. Мікроскоп мікротвердомере дозволяє здійснювати перегляд випробуваного об'єкта в світлому і темному полі.

Технічні характеристики мікротвердоміра ПМТ-3

- Діапазон навантаження 0,0196 ... 4,9 Н.
- Управління навантаженнями - ручне.
- Збільшення мікроскопа мікротвердомере 130, 500, 800.
- Габаритні розміри, не більше 270х290х470 мм.
- Маса, не більше 22 кг.

Виходячи з наведених характеристик приладу даний метод є доцільним для дослідження плазмово напиленого покриття так як є найбільш точним, та більш швидкий.

### **3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

#### **3.1 Вид і структура частинок порошків з водяної ванни**

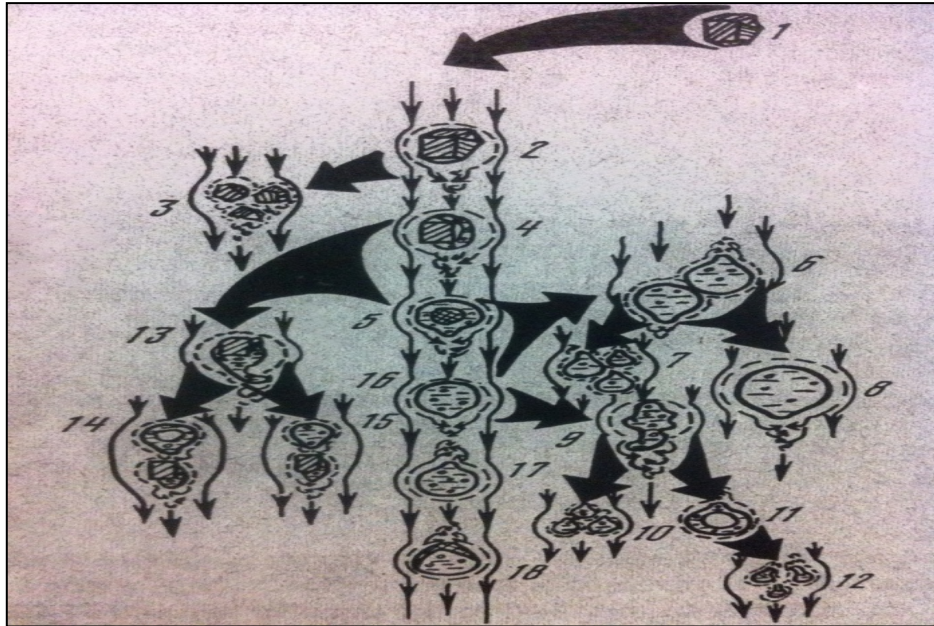
На рис. 3.1 приведена схема, що описує явища, які можуть відбуватися з частинками в плазмовому струмені при напиленні. До них відносяться:

- 1) зміна реальної форми частинок;
- 2) зміна дисперсності частинок матеріалу;
- 3) зовнішні приповерхневих явища, які супроводжують розпилення часток;
- 4) зміна структури і агрегатного стану частинок дисперсної фази.

Дослідження розміру і структури частинок напилюються порошків, зібраних в водяну ванну, проводили з метою визначення процесів, що відбуваються з частинками порошків в плазмовому струмені, від яких залежить подальше формування структури покриттів.

Для дослідження мікроструктури, мікротвердості і гранулометричного складу порошків FeAl, отриманих предметом МХС, проводився збір частинок,

пропущених через плазмову струміль, в водяну ванну на відстані 120 мм від торця плазмотрона до поверхні води. Розпилення порошоків проводилося на режимах, з різними показниками ентальпії плазмового струменя (-і) і швидкості польоту частинок ( $V_{ч}$ ).



**Рисунок 3.1. Схема перетворень, які можуть відбуватися з частинками дисперсної фази в процесі плазмового напилення [57]:**

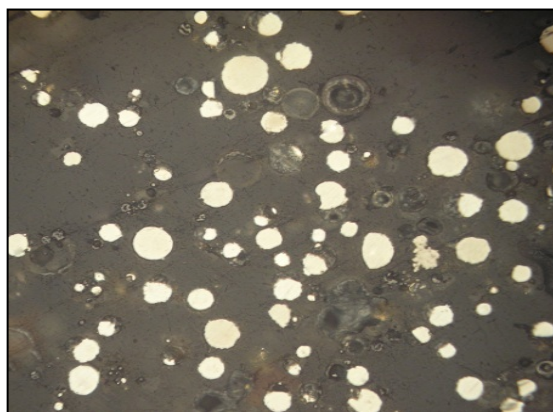
- 1 - вихідна частка матеріалу до потрапляння в плазмовий струміль;
- 2 - тверда частинка матеріалу в струмені плазми;
- 3 - механічне пошкодження твердої частинки при попаданні в високотемпературний струміль;
- 4, 5 - процес плавлення частинки до утворення суцільної розплавленої оболонки;
- 6 - зіткнення розплавлених частинок в потоці;
- 7 - диспергування;
- 8 - коагуляція часток внаслідок удару;
- 9 - втрата квазісферичної форми внаслідок перегріву або високошвидкісного обтікання;

- 10 - розпорошення внаслідок явища 9;
- 11 - схлопування оболонки із захопленням маси газу внаслідок явища 9;
- 12 - розпорошення порожнистої частки (міхура);
- 13 - Сдув розплаву з твердого ядра;
- 14 - утворення дрібних розплавлених частинок із захопленням міхуром газу і твердих оплавлених з поверхні частинок внаслідок явища 13;
- 15 - утворення дрібних, повністю розплавлених частинок і твердих оплавлених з поверхні внаслідок явища 13;
- 16 - повністю розплавлена частка зі швидкістю, меншою швидкості несучого потоку газу;
- 17 - повністю розплавлена частка зі швидкістю, більшою швидкості несучого потоку газу;
- 18 - початок вторинного затвердіння повністю розплавленої частинки несе потоці.

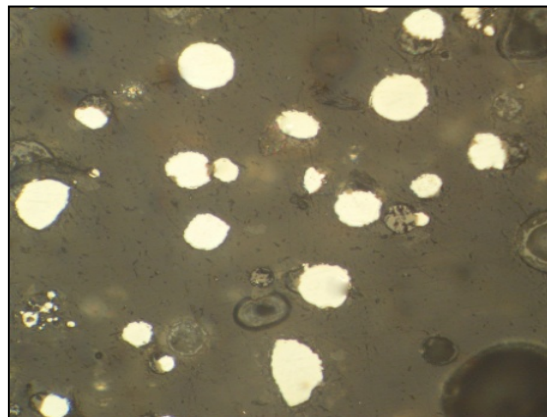
Травлення металографічного шліфу порошку FeAl розпорошеного в воду, проводили 10% -ним спиртовим розчином азотної кислоти протягом 4-5 хв; шліф порошку Fe-TiAl, розпорошеного в воду, труїли розчином HF + HCl + HNO<sub>3</sub> + вода протягом 2-3 хв. Травлення проводилося для порошків, розпорошених на режимі 3.

Дослідження гранулометричного складу порошку, розпорошеного в воду, проводилося металографічним методом шляхом вимірювання діаметрів частинок на металографічних шліфах за допомогою оптичного мікроскопа. На рис. 3.2 наведені мікроструктури і зовнішній вигляд порошку FeAl розпорошеного в воду при різних показниках ентальпії плазмового струменя і швидкості частинок.

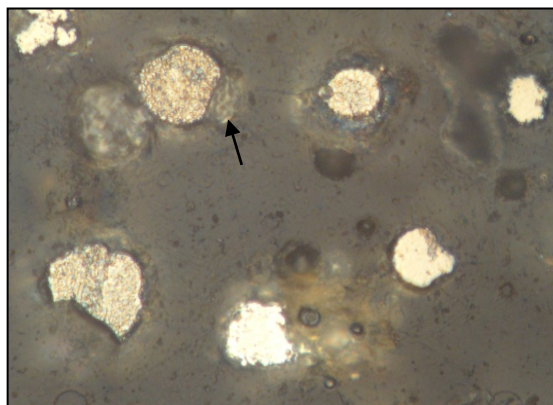




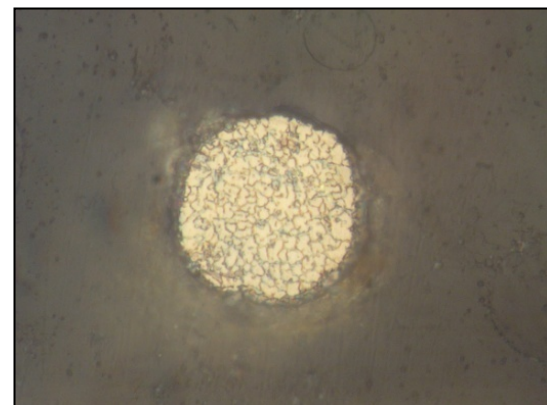
**X200**



**x400**



**X400**



**x800**

**Рисунок 3.2. Мікроструктура порошку FeAl, розпорошеного в воду при  $-i = 27$  МДж / кг і  $V_{ch} = 112$  м / с**

Аналіз мікроструктури і зовнішнього вигляду порошків, розпорошених в воду, показав, що більшість частинок мають сферичну форму, що говорить про повне їх розплавлення в струмені плазми. Зустрічаються також частки неправильної форми, що може свідчити про їх неповне проплавлення або про сплав декількох частинок. Кількість часток неправильної форми становить 1-5% у разі розпилення порошку FeAl і 20-30% при розпилюванні порошків Fe-AlMg, Fe-TiAl.

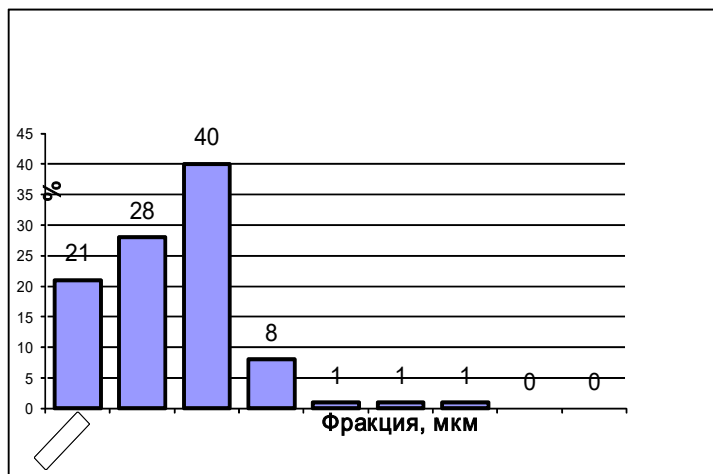
Після травлення на частинках порошку FeAl видно куполоподібні з'єднання суцільні і порожнисті структури, які розташовані по краях часток (вказані стрілками на рис.3.2в). Аналіз літературних джерел свідчить про те, що ці утворення являють собою оксид алюмінію. Відомо [41], що при вході частки в

киснево вмістні зони плазмового струменя на поверхні частинки, що містить алюміній, розвивається процес окислення алюмінію з виникненням плівки оксиду алюмінію на поверхні частинки. На рис. 3.3 представлена схема окислення при плазмовому напиленні порошків, що містять алюміній, на прикладі композиційного порошку Ni-Al [41].

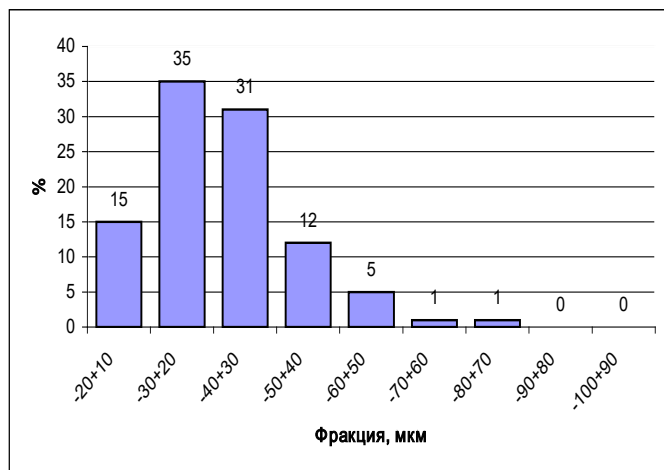
Ідентичність матеріалів частинок NiAl і FeAl дозволяє припустити аналогічну схему поведінки частинок інтерметалідів FeAl при русі в кисневмісних зонах плазмового струменя. Це дозволяє вважати, що куполоподібні освіти, що утворюються на поверхні частинок в процесі розпилення порошків Fe<sub>3</sub>Al, FeAl, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> і Fe-AlMg, являють собою оксид алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

При розпилюванні порошку Fe-TiAl оксидна фаза, яка містить оксиди як Al, так і Ti, відрізняється за кольором і характером розташування на поверхні частинок, очевидно в зв'язку зі зниженими значеннями температури плавлення і поверхневого натягу в порівнянні з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

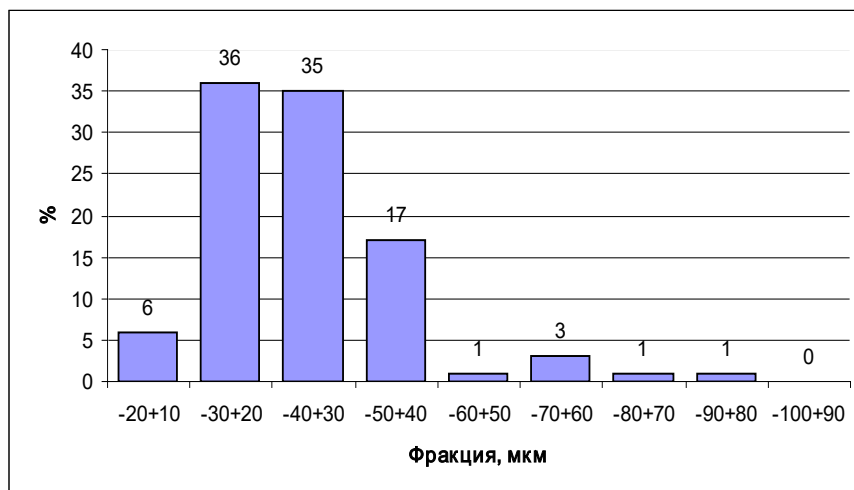
На рис. 3.4. наведені гістограми розподілу за розмірами частинок порошку FeAl розпорошеного в воду при різних показниках ентальпії плазмового струменя і швидкості частинок.



а

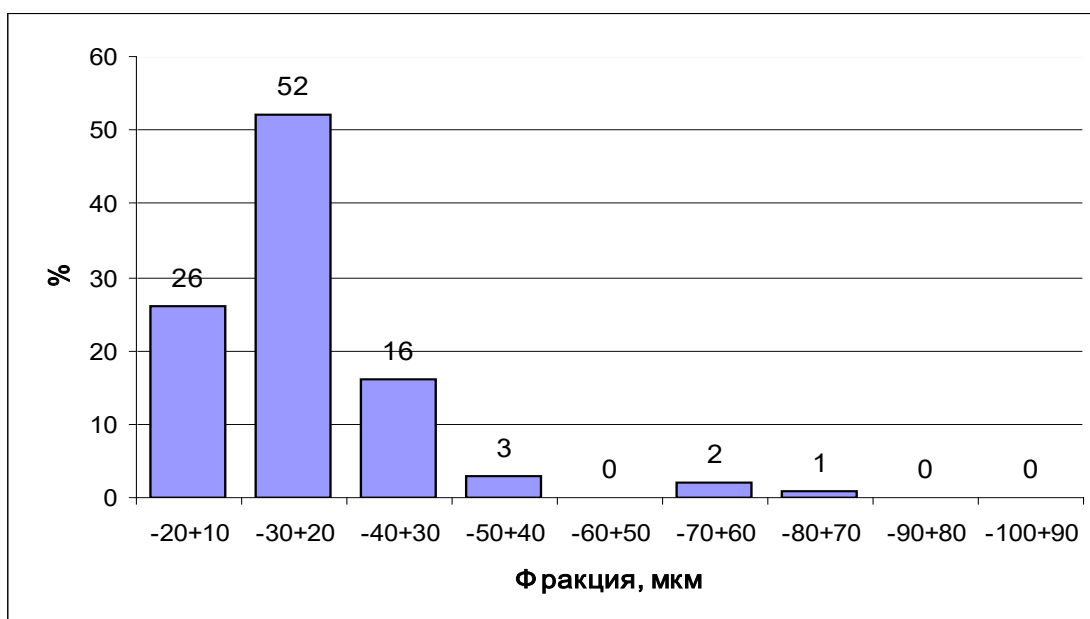


б



В

**Рисунок 3.3. Схема окислення порошку Ni-Al**

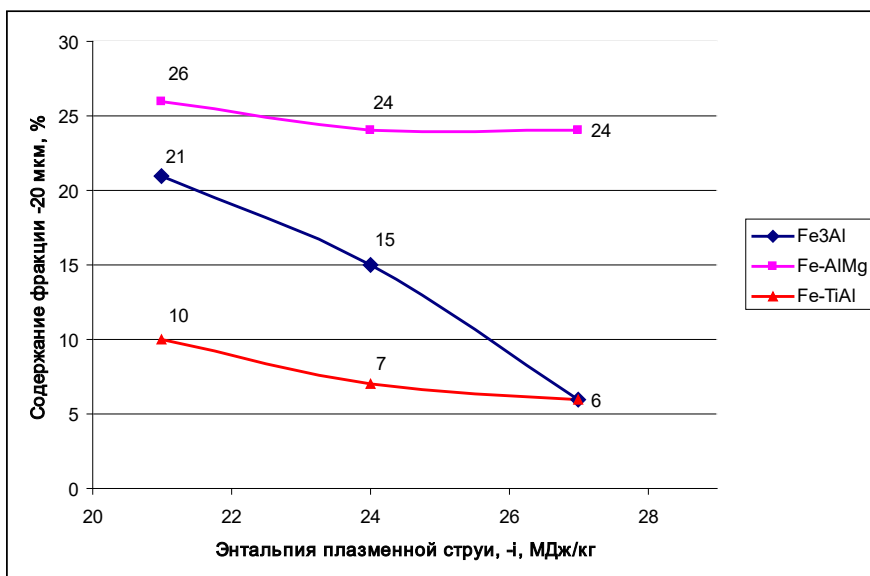


**Рисунок 3.4. Гістограма розподілу за розмірами частинок порошку, розпорошеного в воду при  $-i = 27$  МДж / кг і  $V_{ч} = 112$  м / с: FeAl**

Дослідження гранулометричного складу порошків показало, що розмір часток всіх розпорошених в воду порошків, як і вихідних порошків після МХС, становить  $<40$  мкм. При цьому після проходження через плазмовий струмінь частки порошку, які формуються при руйнуванні конгломерату розміром 40-80 мкм, що складається з продуктів МХС розміром 10-20 мкм, мають середній розмір 25-40 мкм. Збільшення середнього розміру частинок після розпилення в

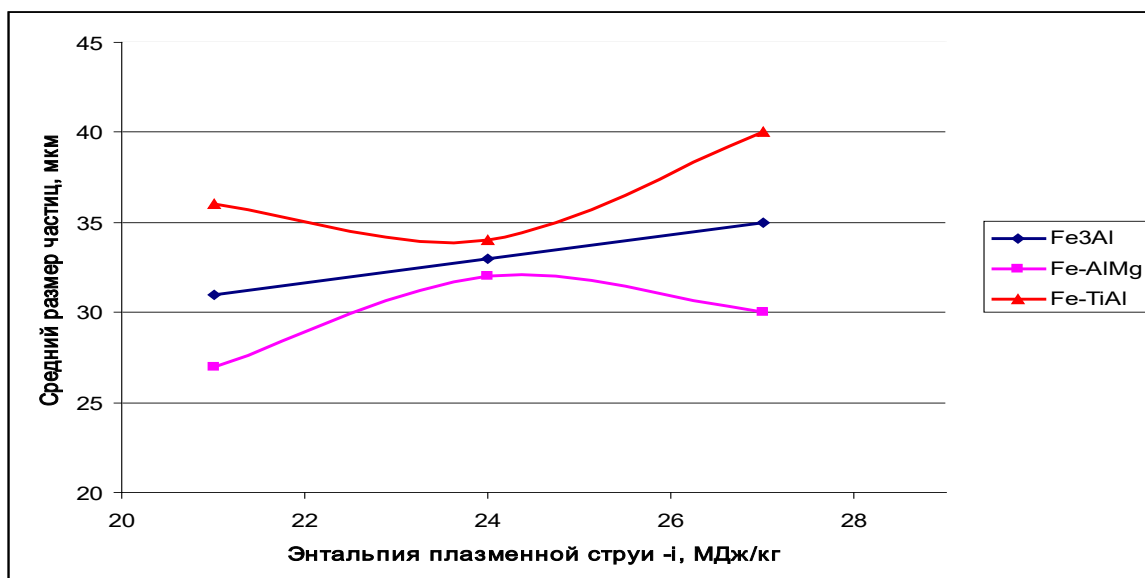
порівнянні з продуктами МХС пов'язано з тим, що одночасно з руйнуванням конгломератів відбувається утворення зв'язків (спіканням, сплавом) між частинками МХС між собою.

Збільшення температури плазмового струменя, яка підвищується зі зростанням показника ентальпії плазмового струменя, веде до зменшення кількості частинок, розміром  $<20$  мкм, при цьому в разі порошків Fe<sub>3</sub>Al і Fe-AlMg зростає вміст частинок розміром 40-60 мкм, а в разі порошку Fe-TiAl зростає вміст частинок розміром 20-40 мкм. Середній розмір частинок також зростає зі збільшенням температури струменя, що може бути пов'язано з випаровуванням дрібних частинок при підвищенні ступеня їх нагрівання.



**Рисунок 3.5. Вплив зміни ентальпії плазмового струменя на вміст часток, розміром  $<20$  мкм.**

При розпиленні порошків FeAl мікротвердість частинок збільшується, в порівнянні з вихідними порошками, на 1320 МПа, 1030 МПа і 1200-1400 МПа відповідно. Зміна мікротвердості може бути пов'язано зі зміною фазового складу частинок і утворенням в них оксидів в процесі розпилення.



**Рисунок 3.6. Вплив зміни ентальпії плазмового струменя на середній розмір частинок порошків**

При збільшенні температури плазмового струменя мікротвердість частинок істотно не змінюється з огляду на те, що підвищується швидкість і скорочується час перебування частинок у високотемпературній струмені.

### 3.2. Вид і структура сплетів

Розвиток теорії і практики газотермічного напилення покриттів в області аналізу процесу формування шару покриття, розвитку сил зчеплення як на кордоні розділу покриття з основою, так і в обсязі покриття привело до появи поняття «Splat (сплет)», що позначає форму частинки напиляного матеріалу, деформованої при ударі об поверхню. Така частка стала розглядатися як одиниця обсягу шару покриття, сформованого в результаті нашарування безлічі пліток. Аналізу факторів, що визначають формоутворення сплетів, і ролі сплету у формуванні структури і властивостей покриттів за останнім часом присвячено багато теоретичних і експериментальних робіт [42-44] і проведення пліток-тесту

вводиться при постановці сучасних дослідницьких робіт в області газотермічного напилення.

Використання моделі зіткнення в разі деформації сферичної розплавленої частинки в диск призводить до формування декількох видів сплетів утворилися в результаті такої взаємодії (рис. 3.7 [45]).

Ступінь деформації частинки  $D / d$  при ударі об напилювану поверхню є одним з факторів, що визначають площу контакту частинки з поверхнею. Чим більше розмір деформованої частки  $D$  по порівнянні зі своїми розмірами частинки  $d$  в газовому потоці перед напиляемой поверхнею, тим більша ймовірність міцного зчеплення контактуючих матеріалів при інших рівних умовах.

$$D / d = 1.2941 (\rho_{\text{ч}} W_{\text{ч}} d_{\text{ч}} / \eta_{\text{р}}),$$

де  $\rho_{\text{ч}}$  - щільність частки;

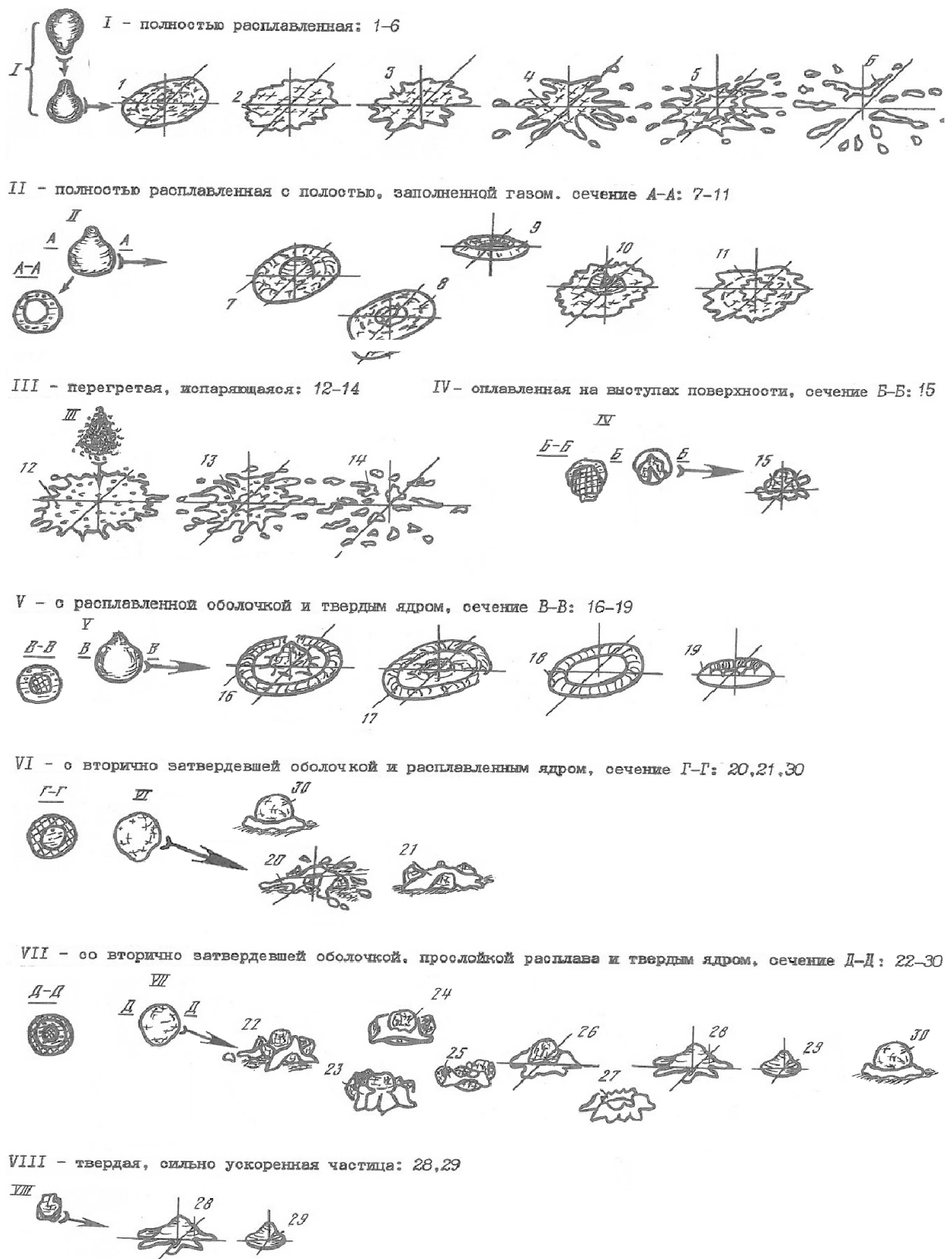
$W_{\text{ч}}$  - швидкість частинки;

$d_{\text{ч}}$  - діаметр частинки;

$\eta_{\text{р}}$  – в'язкість розплаву.

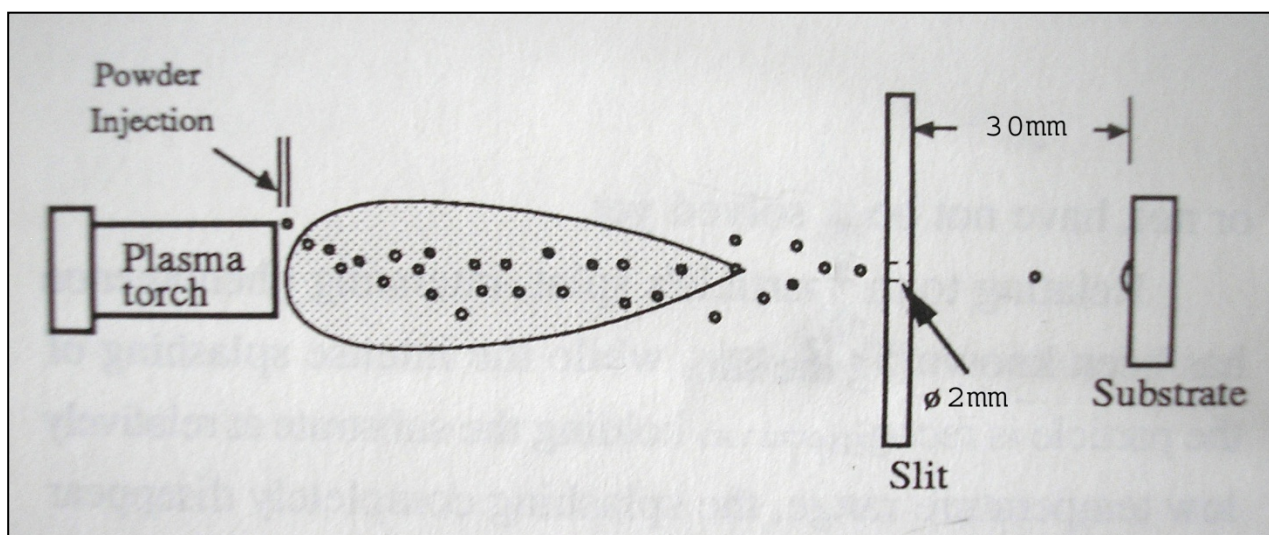
Зміна в процесі напилення агрегатного стану частинок і їх швидкості сприяє тому, що напилювані частки не тільки деформуються при ударі об поверхню основи, але і руйнуються. Тому доцільно вивчити фізичну картину зіткнення часток з поверхнею.

Дослідження стану частинок напилюваного матеріалу після зіткнення з основою проводилося з використанням сплет-тесту, описаного в роботах [46, 47]. Напилення сплетів проводили за допомогою переміщення пластин з полірованої нержавіючої сталі розміром - 50x30x0,5 мм, в площині перпендикулярній осі струменя (рис. 3.8).



**Рисунок 3.7. Схема взаємодії дисперсної фази з основою в залежності від агрегатного стану**

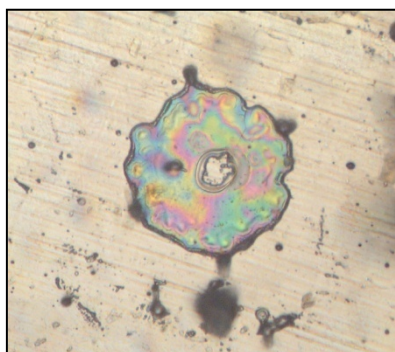




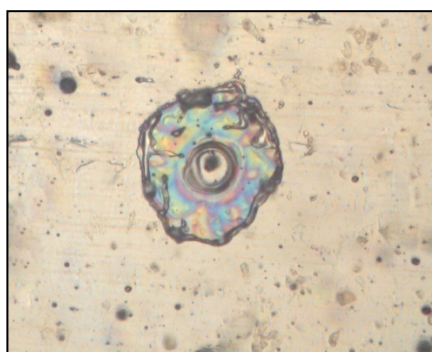
**Рисунок 3.8. Схема проведення сплет-тесту**

Режими напильня вибиралися згідно з планом експерименту. В результаті на зразках закріплювалися поодинокі частинки напильованого матеріалу, деформовані при контакті з поверхнею основи сплету. За допомогою мікроскопа Jenavert був проведений візуальний аналіз, замір діаметрів плиток (D), класифікація сплетів за зовнішнім виглядом і їх фотозйомка за допомогою цифрового фотоапарата, закріпленого на окулярі мікроскопа.

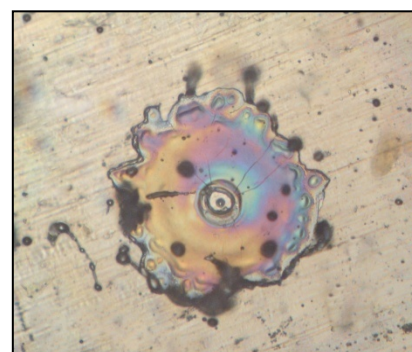
На рис. 3.9 наведено зовнішній вигляд сплетів, отриманих при напильні МХС порошоків FeAl (x400) в залежності від ентальпії плазмового струменя. У таблицях 3.1 наведено хімічний склад сплетів, отриманих розпиленням при ентальпії струменя 27 МДж / кг.      а      б      в



**а**

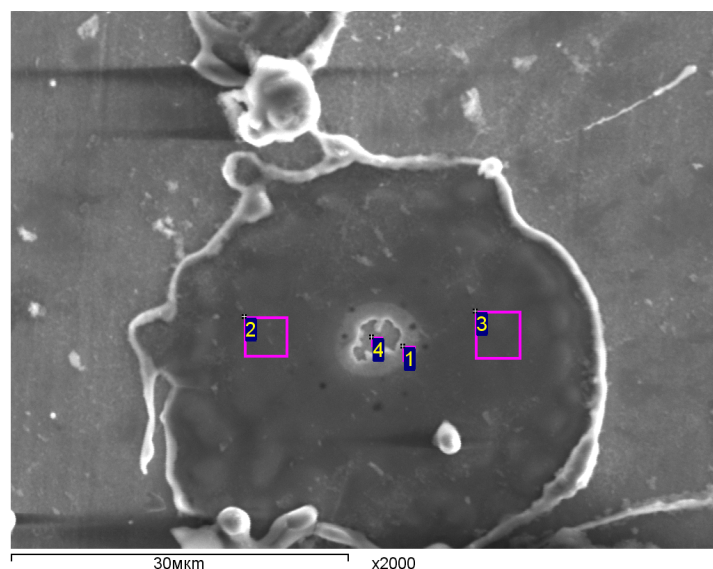


**б**



**в**





В

**Рисунок 3.9. Сплети порошку FeAl, отримані розпиленням:**

- а - при  $-i = 21$  МДж / кг і  $V_{ч} = 89,9$  м / с;
- б - при  $-i = 24$  МДж / кг і  $V_{ч} = 91,6$  м / с;
- в - при  $-i = 27$  МДж / кг і  $V_{ч} = 112$  м / с

**Таблиця 3.1. Хімічний склад (мас.%) сплетів порошку FeAl**

Спектр	O	Al	Cr	Mn	Fe	Ni	Підсумок
1	1.96	8.61	6.32	0.00	81.70	1.40	100
2	18.24	20.13	2.08	0.00	59.13	0.42	100
3	16.54	20.24	2.27	0.43	60.52	0.00	100
4 основа	1.02	0.94	18.54	1.53	70.43	7.55	100

За характером сплетів, отриманих при взаємодії частинок порошків з основою на всіх трьох режимах, можна зробити висновок, що частинки в момент зіткнення з основою знаходяться в повністю розплавленому стані [48]. Всі отримані сплети мають форму диска. Після зіткнення часток з основою і їх розтікання по поверхні центральна частина виявляється незаповненою

матеріалом. Це пояснюється тим, що всередині краплі під час її удару о тверду поверхню виникають кавітаційні процеси, тобто утворюються і ростуть бульбашки через зниження тиску до величини тиску насиченої пари. Бульбашки проривають рідку оболонку краплі і утворюють кратероподібні отвори в деформованій частці порошку [46, 49].

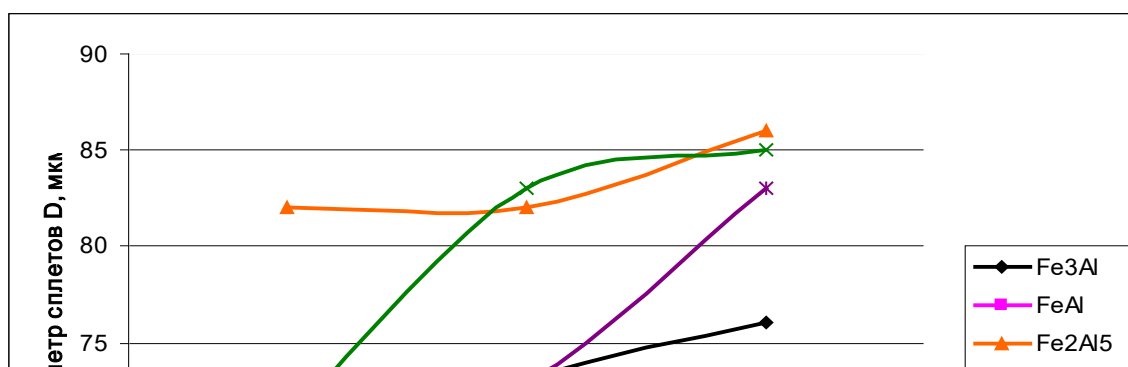
У табл. 3.2 наведені результати визначення ступеня деформації частинок  $D / d$  після зіткнення з основою, де  $D$  - середній діаметр сплетів,  $d$  - середній розмір часток порошків, пропущених через плазмовий струмінь.

Як видно з таблиці, середній діаметр сплетів і ступінь деформації частинок змінюється зі зміною режиму напilenня. Це пов'язано зі збільшенням ентальпії плазмового струменя, в результаті чого збільшується її температура і швидкість, що веде до зменшення в'язкості розплавленої частинки і збільшення ступеня її деформації при зіткненні з основою.

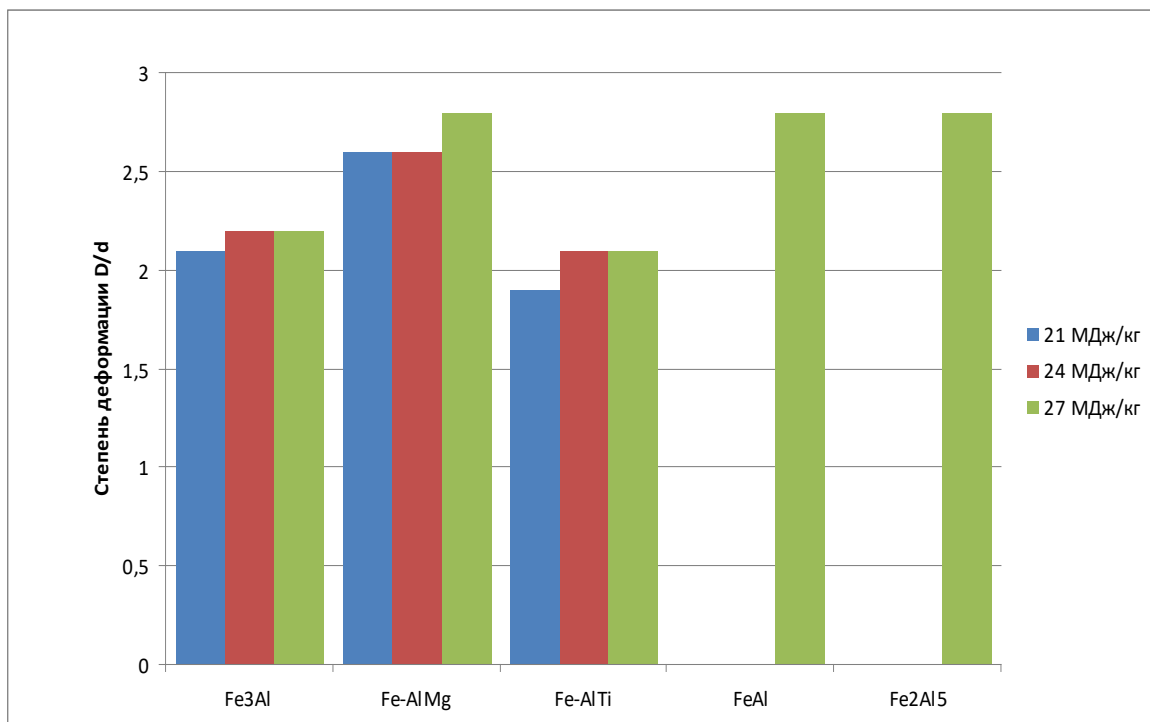
**Таблиця 3.2. Ступінь деформації частинок  $D / d$  після зіткнення з основою**

Ентальпія плазмового струменя -і., МДж / кг	Швидкість частинок $V_{ch}$ , м / с	Матеріал порошку	Середній розмір частинок $d$ , мкм	Середній діаметр пліток $D$ , мкм	Ступінь деформації частинок $D / d$
21	89,9	FeAl	-	66	-
24	91,6	FeAl	-	70	-
27	112	FeAl	25	71	2,8

Зміна діаметрів сплетів для різних складів порошків, в залежності від ентальпії плазмового струменя, представлений на рис. 3.10. На рис. 3.11. представлена ступінь деформації частинок при різних показниках ентальпії плазмового струменя.



**Рисунок 3.10. Залежність діаметрів сплетів від показника ентальпії плазмового струменя для різних складів порошків**



**Рисунок 3.11. Ступінь деформації частинок після зіткнення з основою при різних показниках ентальпії плазмового струменя**

Таким чином, для отримання покриттів з високою міцністю зчеплення і когезійною міцністю, напилення даних складів порошків доцільно проводити при ентальпії плазмового струменя рівній 27 МДж / кг.

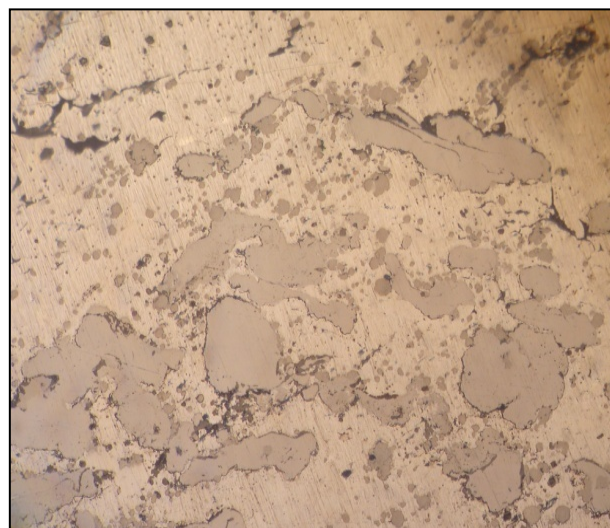
Слід зазначити також, що ступінь деформації частинок порошків FeAl, на 21-28% вище, ніж ступінь деформації частинок порошків Fe<sub>3</sub>Al і Fe-TiAl. Це може говорити про наявність в частинках порошків Fe<sub>3</sub>Al і Fe-TiAl інтерметалічних фаз, які погіршують розтікання розплавлених частинок по поверхні [50].

### 3.3 Структура і фазовий склад покриттів

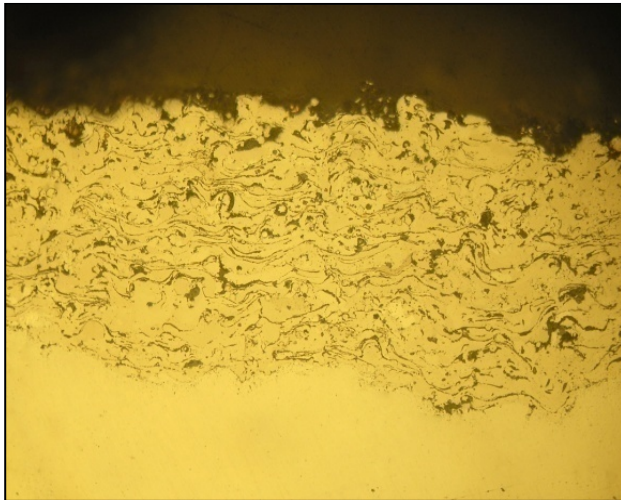
Для дослідження структури і фазового складу плазмових покриттів використовували порошки інтерметаллідів FeAl порошки інтерметаліда FeAl, легovanі магнієм, хромом, цирконієм, титаном, синтезовані методом МХС, а також механічні суміші порошків, розраховані на отримання інтерметалідів зазначеного складу. Технологічні режими нанесення покриттів відповідали встановленим на підставі результатів комп'ютерного моделювання процесу (4.1.1), а також аналізу проб порошків з водяної ванни і сплетів (розділи 4.1.2, 4.1.3).



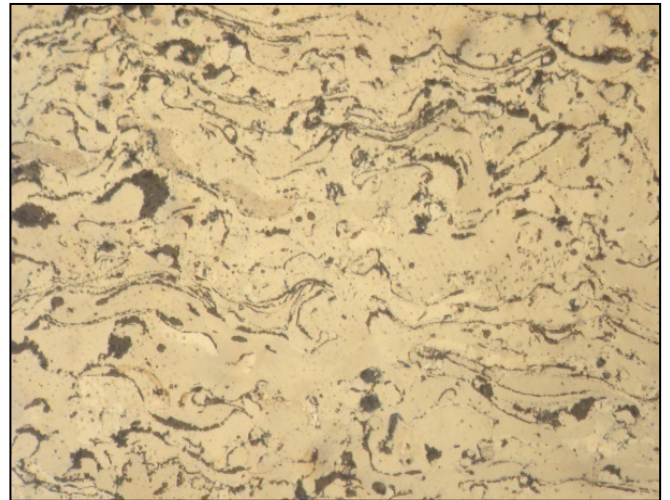
a) X200



a)x400



б)X200



б)х400

**Рисунок 3.12. Мікроструктура плазмових покриттів:**

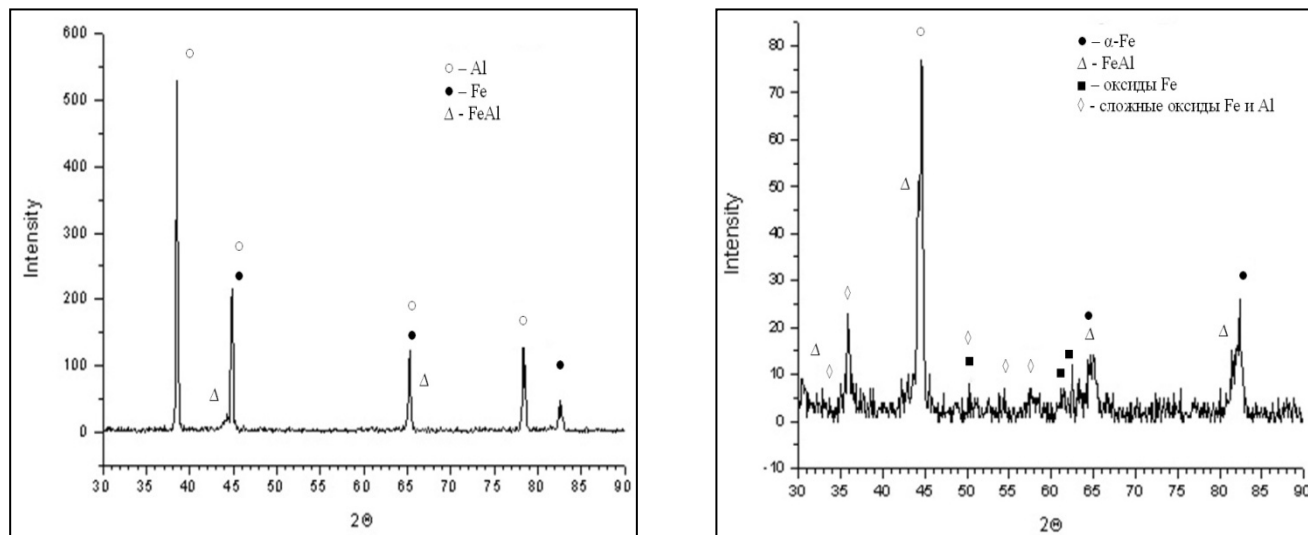
а - з механічної суміші  $67\text{Fe} + 33\text{Al}$  (мас.%); б - з порошку інтерметаліда FeAl

В результаті металографічного аналізу напилених покриттів було встановлено, що в разі напилення покриттів з механічної суміші порошків структура покриттів грубозерниста, в якій можна легко розрізнити залізо і алюміній як у вигляді окремих частинок, так і у вигляді включень заліза в алюмінієвій матриці.

При використанні порошків інтерметалідів у всіх випадках формується щільна ламелярна структура без тріщин і відшарувань від основи (рис. 3.12, б).

Рентгеноструктурним фазовим аналізом було встановлено, що при напиленні механічних сумішей заліза і алюмінію синтез інтерметалідів не встигає завершитися і в покриттях або зовсім не виявляються інтерметалідні фази, або вони з'являються у вигляді слідів (як у випадку напилення сумішей, розрахованих на отримання FeAl і  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ , причому фаз, що не відповідають очікуванню за розрахунком).

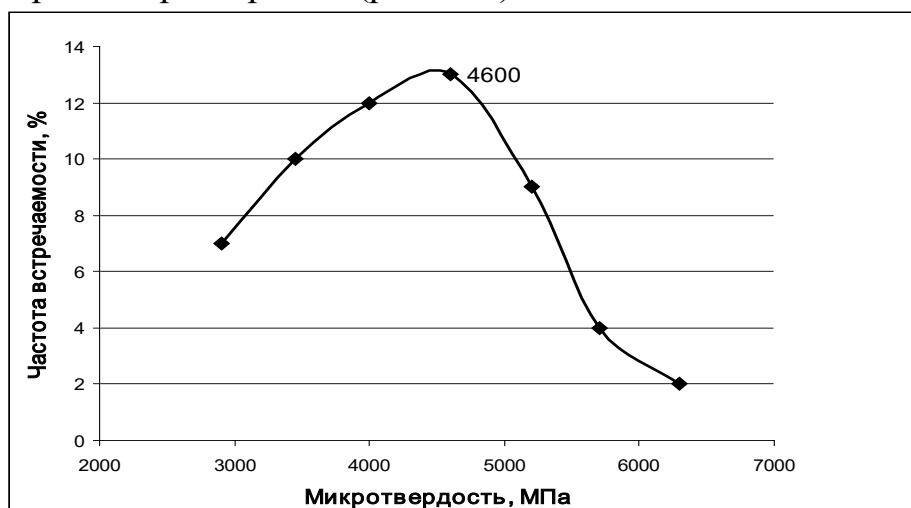
При нанесенні покриттів з порошків інтерметалідів їх фазовий склад, як правило, не збігається зі складом вихідних порошків. У всіх покриттях присутні оксиди. У покритті Fe<sub>3</sub>Al присутній оксид алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; в покритті FeAl - оксиди заліза Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і складний оксид Al<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>.



**Рисунок 3.13. Рентгенограми плазових покриттів:**

а - з мех. суміші 67Fe + 33Al (мас.%); б - з МХС порошку FeAl

Для покриттів, отриманих з МХС порошків FeAl були побудовані варіаційні криві мікротвердості (рис.3.14).



**Рисунок 3.14. Варіаційна крива мікротвердості плазових покриттів: а**  
**FeAl**

Вимірювання мікротвердості плазмових покриттів показало, що як середні, так і найбільш ймовірні значення мікротвердості, вище у покриття з МХС порошку  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ , в порівнянні з покриттями з МХС порошоків  $\text{Fe}_3\text{Al}$  і  $\text{FeAl}$ , що узгоджується з літературними даними, згідно з якими твердість всіх інтерметаллідних фаз зменшується з ростом вмісту заліза [51].

В результаті аналізу мікроструктури плазмових покриттів було встановлено, що в разі напилення покриттів з механічної суміші порошоків структура покриттів грубозерниста, в якій можна розрізнити частинки заліза і частки на основі алюмінію. У разі напилення покриття з механічної суміші  $\text{Fe} + \text{TiAl}$  частинок алюмінідами титану в покритті не спостерігається

Результати РСФА плазмових покриттів показали, що в разі напилення механічних сумішей заліза з алюмінієвими сплавами, як і в випадку сумішей заліза з алюмінієм, реакція утворення інтерметаллідних фаз не проходить до кінця. У покриттях, крім очікуваної фази інтерметаллида  $\text{Fe}_3\text{Al}$  (для перших трьох складів) або  $\text{Fe}_{1-x}\text{TiAl}_x$  (для четвертого складу), виявлені тверді розчини на основі заліза, алюмінію, оксиди алюмінію і заліза.

Покриття з порошоків, отриманих методом МХС з суміші заліза з сплавами алюмінію  $\text{AlCrZr}$ ,  $\text{AlMg}$  і  $\text{AlMgLa}$ , містили велику кількість оксидів (до 30 об.%), причому, крім оксидів алюмінію і заліза, також складні оксиди, наприклад  $\text{MgFeAlO}_4$ . Цим, мабуть, можна пояснити, що замість очікуваного інтерметаллида на основі  $\text{Fe}_3\text{Al}$ , що містить легуючі елементи, в покритті виявлені фази на основі  $\text{FeAl}$  і тверді розчини  $\text{Al}$  в  $\text{Fe}$ . Тільки в покритті системи  $\text{Fe-TiAl}$  основною фазою є  $\text{Fe}_3\text{Al}$ . Крім цієї фази покриття містить  $\text{FeTi}$  і оксиди заліза.



## **4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Метою розділу є забезпечення належними умовами праці при нанесенні плазмовим напиленням покриття з використанням інтерметалідів Fe-Al.

### **4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при плазмовому напиленні виробів**

При відсутності захисту можливі ураження органів зору та опіки шкіряних покривів.

Джерелами шуму при наплавочних роботах є:

- трансформатор;
- вентиляція;
- механізми подачі електродного дроту;
- механізми переміщення і т.д.

Неправильне експлуатування електрообладнання або його несправність приводять до ураження електричним струмом.

Застосування у промисловості автоматів зменшує обсяг ручної праці та поліпшує її умови. Автомати знижують травматизм на підприємствах. Проте під час їх роботи можливий вплив на працюючих фізично-небезпечних виробничих факторів: рухомих пристроїв автоматів, пересувного матеріалу (виробів, заготовок, інструменту). Рухомі машини, механізми і вироби, при відсутності захисних пристроїв, можуть привести до травмування робітників. Для захисту від рухомих частин обладнання місця установки указанного обладнання необхідно огорожувати. Особлива небезпека виникає, коли існує можливість захопленню одягу чи волосся працюючого рухомими частинами обладнання. Також небезпечними є затискуючі пристрої.



До систем, які працюють під тиском, не рівному атмосферному відносяться балони. При наплавленні в середовищі захисного газу, крім описаних вище можливостей ураження електричним струмом і променистою енергією, опіків тіла, обличчя, очей, шкідливої дії газів на організм, існує ще небезпека травмування при експлуатуванні балонів з газами. Порухення правил їх експлуатування може привести до вибуху.

## 4.2 Шкідливі речовини

Незалежно від кліматичних умов у робочій зоні виробничого приміщення вміст шкідливих речовин не повинен перевищувати ГДК.

Основним шкідливим фактором ГОСТ12.1.005-88 при наплавленні є: забруднення повітря шкідливими аерозолями. При зварюванні нагріті до високої температури і тому більш легкі, ніж оточуюче повітря, пари метала, і компоненти зварювального матеріалу піднімаються над місцем зварювання і потрапляють в зону температур одного порядку з оточуючим повітрям, тому швидко конденсуються і твердіють. Утворюється тверда фаза частинок зварювального пилу – аерозоль конденсації. Більшість частинок зварювального аерозолю (приблизно 90%) мають розмір менш 5мкм.

*Марганець у зварювальній аерозолі-* утворюється при електродуговому наплавленні сталей утримуючих марганець, чи при виконанні цих робіт дротами до складу яких входить марганець. Потрапляючи в організм людини через органи подиху чи травлення, окисли марганцю викликають хронічні, а при високих концентраціях і гострі отруєння. Вони уражають центральну нервову систему, викликаючи в ній важкі органічні зміни. Крім того, зміни виникають у легень, печінки. Характерні ознаки отруєння: головний біль, запаморочення, печія, болі в кінцівках. Гранично припустима концентрація марганцю і його з'єднань у перерахуванні на окис марганцю в робочій зоні виробничого приміщення не

повинна перевищувати  $0,2 \text{ мг/м}^3$  повітря, при концентрації  $10 \text{ мг/м}^3$  уже можливі гострі отруєння.

*Окис вуглецю* – газ, що зустрічається усюди, де є умови не повного згоряння речовин, що містять вуглець. Гранично припустима концентрація не повинна перевищувати  $20 \text{ мг/м}^3$  повітря. Систематичне перебування людини в зоні підвищених концентрацій може обумовити отруєння. Характерні ознаки отруєння – головний біль, біль у скронях, запаморочення, блювота, утрата свідомості.

*Озон* – газ, утворюється в місцях електричних розрядів під дією ультрафіолетових променів при електродуговому наплавленні в середовищі захисних інертних газів. Гранично припустима концентрація не повинна перевищувати  $0,1 \text{ мг/м}^3$  повітря. Перевищення припустимої концентрації впливає на органи подиху. Найбільш характерні ознаки отруєння: сухість у роті, загрудні болі, кашель, печіння в шлунку. Токсичність озону сильно підвищується при наявності в повітрі азоту: спільні їхні дії на організм у багато разів сильніше, ніж порізно.

Повітря в робочій зоні не перевищує допустиму граничну концентрацію і умови праці відповідають II-му класу [9].

#### **4.3 Засоби захисту працюючих**

Горіння зварювальної дуги супроводжується випроміненням видимих осліплюючі-яскравих світлових променів і невидимих для ока так званих ультрафіолетових та інфрачервоних променів. Інтенсивність променистої енергії в головному залежить від зварювального струму і величини напруги.

Потужне ультрафіолетове випромінення спостерігається при зварюванні в середовищі захисного газу.

Видимі світлові промені осліплюють, так як яскравість їх перевищує фізіологічно допустиму дозу. Короткі ультрафіолетові промені навіть при

короткочасному впливі можуть викликати електрофтальмію. Інфрачервоні промені володіють головним чином тепловим ефектом, їх інтенсивність залежить від потужності дуги.

Інтенсивність випромінення зварювальної дуги в оптичному діапазоні і його спектр залежать крім потужності також від використаних матеріалів і захисного газу. При відсутності захисту можливі пошкодження органів зору (катаракта) і опіки шкіряних покривів.

Для захисту від випромінення дуги і зниження контрасту між дугою та оточуючими предметами, інтер'єр приміщень, обладнання цехів і діляниць електродугового наплавлення необхідно фарбувати у світлі тони (сірий, жовтий, голубий). Місця виконання електрозварювальних робіт відкритою дугою слід огорожувати не згоряючими ширмами та щитами.

Шкіра та очі зварника повинні бути захищені від впливу променів дуги.

Незахищені ділянки тіла захищаються спеціальною робочим одягом, обличчя захищається щитком або шоломом, кисті рук - рукавицями, а очі – спеціальним склом-світлофільтрами, вставленими в щиток або шолом. В масках або шоломах між темними і прозорими склом повинен бути зазор 0,5-1мм, щоб захищати очі від перегріву.

Наплавлення може бути причиною травмування робітників, при цьому можуть мати місце пошкодження очей, опік тіла, забоїв, поранень.

Робітники повинні використовувати засоби індивідуального захисту:

- спецодяг (ТУ17-98-69-77);
- спеціальні рукавиці типу Тр;
- маски щитки з світлофільтрами С8;
- спеціальне взуття по ГОСТ-12.4.032-77.

Для захисту людей не зв'язаних з наплавленням, робоче місце повинне бути огорожене екранами і ширмами висотою не менш 1,6мм. Підлеглі зварника які знаходяться недалеко від місця наплавлення або працюючих в недостатньо

огорожених місцях зварювання, повинні використовувати відкідні маски і спецодяг. Підлога в приміщенні, де проводяться роботи повинні бути виконані із не горючих матеріалів. Об'єм промислового приміщення на одного робітника не менш 15 м<sup>3</sup>, а площа не менше 4,5 м<sup>2</sup>, виключаючи площу яке займає обладнання і проходи. Промислові приміщення де виконуються складально – зварювальні роботи повинні відповідати вимогам ДСТУ-2456-94.

#### **4.4 Вентиляція**

Системи вентиляції повинні забезпечувати у цехах і на ділянках метеорологічні умови, а також вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони у відповідності з ДСП 379/1404 Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів, МОЗ України, 19 червня 1996 р. № 173.

Складально-зварювальні цехи і ділянки потрібно забезпечувати місцевою і загальною вентиляційними установками. Потік повітря в холодний період року (зимовий і перехідний) повинен бути обов'язково механічним з підігрівом зовнішнього повітря, повністю компенсуючи об'єм видаленого повітря. Для цього використовується вентилятор Ц470 №3.2 з електродвигуном серії А02 потужністю 1,5 кВт, та калорифер КФС №6. В теплий період року потрібно забезпечити природне постачання зовнішнього не забрудненого, вентиляційними і технологічними викидами, повітря через вікна.

Найбільш ефективним засобом для зниження концентрації забруднень у робочій зоні робітника являються місцеві відсмоктувачі, які мають в порівнянні з загальною вентиляцією наступні переваги: а) локалізують шкідливі речовини безпосередньо в зоні їх виникнення, вони запобігають розповсюдженню їх по всьому об'єму промислового приміщення; б) завдяки близькому розміщенню до джерела шкідливих виділень місцеві відсмоктувачі можуть видаляти їх за

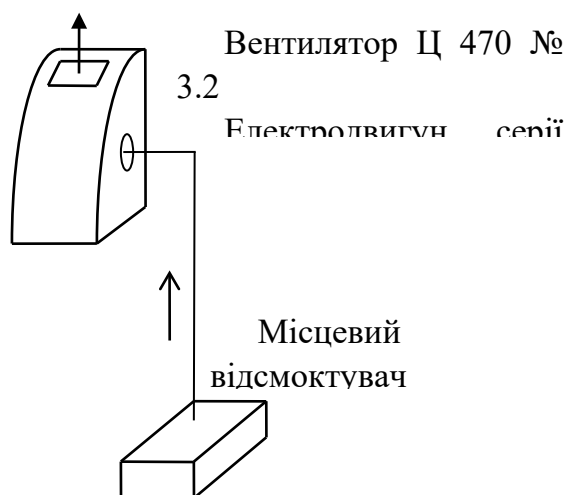
допомогою мінімальних об'ємів повітря, що має велику економічну перевагу по зрівнянні з загальною вентиляцією.

Специфічною складністю устрою місцевих відсмоктувачів при наплавленні в середовищі захисного газу являється необхідність утворення швидкостей повітря в зоні зварювальної дуги, ефективне видалення утворюючих в процесі наплавлення шкідливих речовин, не порушуючи захисне газове покриття дуги (забезпечуючи одночасно високу якість зварювального шву). В зв'язку з цим до місцевої вентиляції при зварюванні в середовищі захисного газу пред'являється технологічна вимога у відношенні обмеження рухливості повітря в зоні дуги: при наплавленні сталі в середовищі аргону не більше 0,5м/с. Збільшення витрат захисного газу не рекомендується, так як може привести до роздування шкідливих викидів, а збільшення кількості видаленого повітря вентиляцією – до зниження якості наплавленого металу.

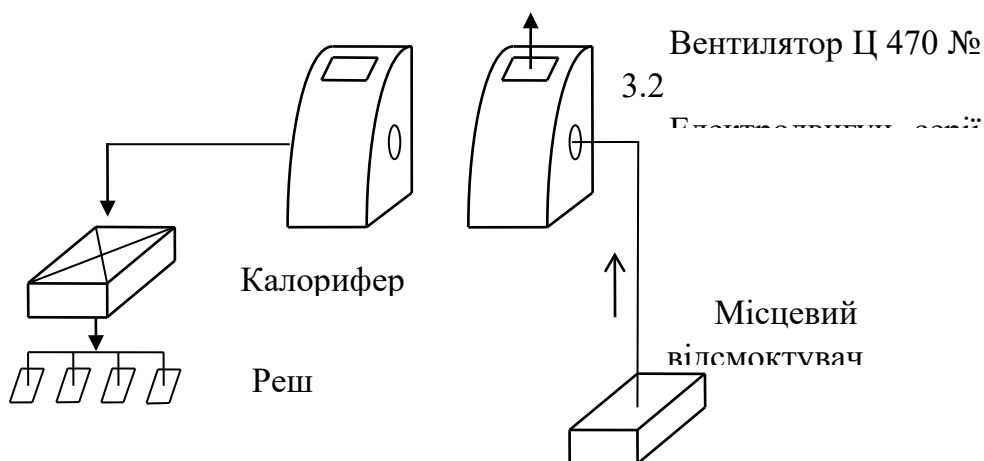
При виконанні робіт в умовах цеху на стаціонарно розміщених зварювальних установках для очищення робочого простору від аерозолів, найбільш оптимальним являється застосування місцевої витяжної вентиляції.

Схема вентиляції яка використовувалася показана на рис.4.1 Для покращення мікроклімату на робочому місці запропоновано поліпшену схему вентиляції: припливну з калорифером з повітрообміном рівній витяжці рис.4.2.

В теплий період року можливо знехтувати притоком, оскільки баланс виконується за рахунок використання вікон. При цьому отримуємо сприятливі умови праці.



**Рисунок 4.1 - Схема вентиляції яка використовувалася**



**Рисунок 4.2 - Схема вентиляції яка запропонована мною**

## 4.5 Освітлення приміщення

Штучне освітлення:

Штучне освітлення передбачається у всіх виробничих та побутових приміщеннях для компенсації нестачі природного світла та для освітлення приміщень у темний період доби. Від того, наскільки кваліфіковано воно спроектовано залежить безпека праці та самопочуття працівників, продуктивність їхньої праці та якість продукції. Відомо, що раціонально виконане штучне

освітлення приміщень при одній і тій же витраті електроенергії підвищує продуктивність праці на 15- 20%. Разом з тим неправильно вибране та недостатнє освітлення робочих місць може бути причиною функціональних зорових порушень у працівників.

Загальне освітлення (незалежно від системи освітлення) повинно відповідати встановленим нормам стосовно нерівномірності освітлення в зоні розміщення робочих місць. Відповідно до вимог ДБН Б.2.5-28-2006 відношення максимальної освітленості до мінімальної допускається не більше: для робіт I-III розрядів при люмінесцентних лампах – 1,5; при інших джерелах світла – 2; для робіт IV-VII розрядів – відповідно 1,8 та 3. Під розряд роботи зору – 6 (фон середній, контраст об'єкта з фоном – малий).

Штучне освітлення здійснюється лампами освітлення люмінесцентного типу ЛД-40

Технічні характеристики люмінесцентної лампи ЛД-40 наведені в таблиці 4.1.

**Таблиця – 4.1 Технічні характеристики люмінесцентної лампи ЛД-40 [10].**

Потужність,Вт	Напруга мережі на лампі, В	Світловий потік Номінальне, лм.	Колірна Температура, К
40	220	2340	4000

З метою оптимізації виробничого освітлення передбачають:

- обмеження прямої блискучості за рахунок добору світильників;
- очищення світильників, вікон від забруднень один раз на 3 місяці;
- фарбування стін титановими або цинковими білилами з високим коефіцієнтом відбиванням для видимого світла за низьким коефіцієнтом для ультрафіолетових променів.

## 4.6 Шум

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ДСН 3.36.037-99. У ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням .

Джерелами шуму при наплавочних роботах являються:

- трансформатор;
- вентилятор, вмонтований в випрямляч;
- механізми подачі електродного дроту;
- механізми переміщення і т.д.

Для захисту слухових органів оператора від шуму використовуються противошумні шоломофони, навушники за ДСТУ EN 812:2005

## 4.7 Електробезпека

Широке використання в промисловості електричної енергії зобов'язує приділити увагу профілактиці електротравматизму. Невірне експлуатування електрообладнання або його несправність приводить до ураження електричним струмом. При протіканні електричного струму через тіло людини може виникнути небезпека ураження його окремих органів або організму в цілому. Основними видами ураження являються: опік електричною дугою; так званий удар при доторканні до струмоведучих частин; розрив тканин та ін. Велику небезпеку мають також місцеві підвищення температури на ділянках малої провідності електричних ланцюгів і спалахів, котрі можуть викликати пожежу або вибух.

Все устаткування для нанесення покриттів працює з напругою 220 чи 380 вольт. Тому небезпека завжди актуальна, і виникає при торканні людиною незахищених струмоведучих частин трансформаторів, випрямлячів, електропроводів і іншого устаткування під напругою. Все електроустаткування



повинне відповідати ПУЕ-2017. Також виникає небезпека і при торканні частин устаткування, що не знаходиться під напругою, але випадково у результаті порушення чи ушкодження ізоляції, знаходиться під ним. Опір ізоляції окремої ділянки мережі не менш ніж 0,5 МОм.

Для захисту від ураження електричним струмом корпус будь-якої електрозварювальної установки необхідно заземляти. Послідовне включення в заземлюючий провідник декілька апаратів заборонена.

Окремі елементи зварювального ланцюга, відрізки зварювальних кабелів при нарощуванні потрібно з'єднувати роз'ємними з'єднувальними муфтами. Струмоведачі кабелі зварювального ланцюга повинні бути ізольовані по всій довжині і захищені від механічних пошкоджень. Забороняється залишати на робочому місці зварювальний інструмент, який знаходиться під напругою.

Приєднання і від'єднання від мережі електрозварювальних установок, перевірки зварювального струму, рукоятками, розміщених всередині установки не маючої блокування, а також спостереження за налагодженим станом установок в процесі експлуатування повинно проводитись електротехнічним персоналом. Персонал, обслуговуючи електрозварювальні установки, повинен періодично проходити інструктаж по безпеці електричного струму і методах надання першої допомоги.

Перелік засобів безпеки:

1. Для обслуговуючого персоналу, а також для всіх робітників, пов'язаних з експлуатуванням випрямляча, обов'язково дотримання правил технічного експлуатування електроустановок, техніки безпеки при експлуатуванні електроустановок, а також ДСТУ 2456-94 Зварювання дугове і електрошлакове.
2. Допуск до експлуатування випрямляча повинен бути дозволений людям відповідної кваліфікації.
3. Напруга в мережі являється небезпечною, тому :

1) корпус випрямляча повинен бути надійно заземлений. Для цієї мети випрямляч оснащений болтом заземлення із знаком „Земля”, розміщеним на задній стінці випрямляча.

2) один із вихідних зажимів випрямляча, до якого під'єднується провід, який іде до виробу (зворотній провід), і зварювальний стіл також повинні бути надійно заземлені.

4. Забороняється робота випрямляча без кожуха, з відкритими боковими стінками і переміщення випрямляча без відключення його від мережі.

#### **4.8 Загальні вимоги безпеки праці при експлуатації вантажопідійомних механізмів**

До управління кран-балкою і підвішування вантажів на гак допускаються особи не молодше 18 років з числа робітників основних професій, які мають посвідчення на право обслуговування вантажопідійомних пристосувань, після отримання інструктажу.

Перед початком роботи необхідно перевірити справність вантажозахоплювальних пристроїв. Наявність на них бірок або клейма із зазначенням номера, вантажопідійомності та дати виготовлення.

Наявність витяжки та спрацювання не більше 10% первісного діаметра ланки або тріщин для строп з ланцюгів, робота таких ланцюгових строп заборонена. Вони повинні бути здані в інструментальну комору

Перевірити:

- справність основних деталей і вузлів кран-балки;
- наявність і надійність кріплення захисного заземлення до корпусу кнопочового управління;
- відсутність заїдання кнопок управління в гніздах;
- стан сталевих канатів і правильність його намотування на барабані;

-стан гака (спрацювання в зоні від вантажозахоплювального пристрою не більше 10%); відсутність тріщин і розігнути; наявність шплинтовки гайки і легкість повертання гака в крюкової підвісі.

Після зазначених перевірок включити рубильник.

Роботу гальма кнтролюємо контрольним вантажем близьким до вантажопідйомності механізму підйому даної кран-балки, шляхом підйому на висоту 200-300 мм з наступною витримкою в такому положенні протягом 10 хв.

Під час роботи користуватися тільки спеціальними вантажозахоплювальними пристроями.

Не допускати підйому гака кран-балки до обмежувача висоти підйому. Металобрухт переміщати в спеціально призначеній для цього тарі, при цьому завантаження допускається не вище 200-300мм від верхнього краю борту.

Справна тара має маркування (номер, вантажопідйомність, власну масу і призначення).

При підйомі вантажу, по масі близького до дозволеної вантажопідйомності, попередньо підняти його на висоту 200 -300мм і перевірити надійність дії гальма.

У всіх випадках перед підйомом вантажу переконатися в тому, що вантаж надійно закріплений.

При виявленні неправильної або ненадійною стропування вантажу відпустити його і зробити строповку знову. Пам'ятати, що утримувати стропи, зісковзували з вантажу при його підйомі або транспортуванні, а також поправляти їх ударами молотка або лому забороняється.

Вантаж кріпитися згідно технологічної карти вантажно-розвантажувальних робіт.

При переміщенні вантажу в горизонтальному напрямку, підняти його не менше ніж на 0,5 м вище що зустрічаються на шляху. Вантаж піднімати і переміщати плавно, без ривків і розгойдування.

Не перемикати рух механізму кран - балки з прямого ходу на зворотний до повної його зупинки.

Не переміщати вантаж над людьми. Під час переміщення вантажу в горизонтальному напрямку знаходиться від нього на безпечній відстані, не проходити в обмежених місцях і по захаращених проходах.

Перед опусканням вантажу оглянути місце, на яке вантаж опускається і переконатися в неможливості падіння, перевертання або сповзання встановлюваного вантажу.

Під час перерв у роботі та після закінчення її не залишати вантаж у підвішеному стані.

Знімати вантажозахоплювальні пристрої тільки після того як вантаж буде надійно встановлений.

Після закінчення роботи необхідно підняти гак кран-балки і вимикати рубильник.

Прибрати знімні вантажозахоплювальні пристрої в спеціально відведене для їх зберігання місце [11].

#### **4.9 Інженерні рішення для забезпечення безпеки обладнання**

Виходячи з аналізу шкідливих та небезпечних факторів при напівавтоматичному наплавленні в середовищі захисного газу ми застосуємо такі вирішення цих проблем.

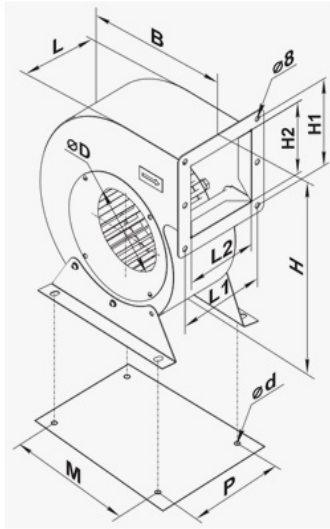
Місцевими повітроприймачами необхідно видаляти повітря: - під час дугового зварювання в  $\text{CO}_2$  – не менше ніж 50 м<sup>3</sup> /год;

Для забезпечення цих умов у робочому приміщенні необхідно бути встановлена витяжка рекомендованої потужності. Оберемо центробіжний вентилятор ВЕНТС ВЦУ 2Е (рис 4.3)

## Описание

Габаритные размеры вентилятора Вентс ВЦУ 2Е 140х60:

РАЗМЕРЫ:	ØD	B	H	H1	ØD	H2	L	L1	L2	M	P
Тип:	140	243	287	125	9	93	85	107	75	150	116



**Рисунок 4.3 - Вентилятор Вентс ВЦУ**

для забезпечення захисту від ультрафіолетового і видимого випромінювання я пропоную забезпечити зварювальника спеціальною маскою : Delta Plus Barrier(рис 4.4)



**Рисунок 4.4. - Маска зварювальна**

## Технічні характеристики : Зварювальна маска «Delta plus barrier»

Тип – маска

Вид - Електрозварювання/Газозварювання

Захист від перегріву - ні

Додаткові характеристики - Тип світлофільтра: автоматичний

Розмір світлофільтра: 100x60mm

Ступінь затемнення в режимі очікування: din4

Ступінь затемнення в режимі роботи: din9-13

Час спрацьовування світлофільтру: 0.0003мс

Захист від УЧ і ІЧ променів.

Електроживлення: Сонячні і літієві батареї

Вага 0.52кг

Від ураженням електричним струмом всі уробочі і не робочі установки повинні бути обов'язково заземлені; на робочому місці зварника повинен знаходитися резиновій килимок, стоячи на якому дає безпеку при роботі з струмопроводячими частинами установки.

### **4.10 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях**

#### **Пожежна безпека**

Зварювальні і інші роботи повинні проводитися у відповідності з Сніп II-90-81, Сніп II-2-80, з типовими правилами пожежної безпеки для промислових підприємств. Цех і дільниця, де виконуються зварювальні роботи відносяться згідно (ОНТП 24-86) до категорії Г виробництва по вибухопожежної небезпеки (негорючі речовини й матеріали у гарячому, розжареному, розплавленому станах процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор, полум'я, горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива). У приміщенні виділяються (згідно з ПУЕ) клас II-III – зони

приміщень, в котрих є тверді або волокнисті горючі речовини. Місця, відведені для проведення робіт, установки і обладнання повинні бути очищені від легко займистих матеріалів в радіусі не менш ніж 5м.

Місця проведення наплавочних робіт повинні бути оснащені засобами вогнегасіння (сухий пісок, вогнегасники тебрахлорні, порошкові або вуглекислотні).

Ступінь вогнестійкості будівлі – І (не допускається поширення вогню на основні будівельні конструкції), мінімально припустиме обмеження вогнестійкості -2,5 год, максимально припустиме обмеження поширення вогню для внутрішніх стін -25см.

Категорія захисту від блискавки - І (СН 305-77), від прямих ударів використовується стержневі громовідводи.

Пожежна безпека (ГОСТ 12.1.004-85) забезпечується:

- запобігання загоранню ізоляції при КЗ за рахунок максимального струмового захисту;

- запобігання виникнення горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеження використання і зберігання вибухонебезпечних речовин;

- використання пожежної сигналізації з датчиком ( ІДФ-1, ДПІД та ін.);

- використання вогнегасників для класу пожеж Е типу УО, ОП-10А.

При організації технологічного процесу дотримуються всіх вимог електростатичної електробезпеки( ГОСТ 12.1.018-79).

Рекомендоване періодичне очищення робочого місця цеха, апаратури від відходів, відкладення пилу, заміна ЛЗР і ГР на вогнебезпечні технічні миючі засоби.

Передбачені пристрої, котрі забезпечують обмеження розповсюдження пожежі. Приміщення обладнується пристроями колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі і димового захисту.

Тип виконання електрообладнання в приміщенні повинен відповідати класу зони пожежо- і вибухобезпечності.

При виникненні пожежі повідомити майстра чи бригадира. При використанні (вуглекислотними, порошкоподібними) вогнегасниками струмінь (порошку, вуглекислоти) направляти в сторону від людей.

При користуванні вуглекислотним вогнегасником не братися рукою за розтруб вогнегасника. Внутрішніми пожежними кранами необхідно користуватися розрахунком з 2-х чоловік: один розгортає рукав від крана до місця пожежі, другий - по команді відкриває кран. При гасінні полум'я повстиною його накривають так, щоб вогонь не потрапив на гасящого.

При гасінні полум'я піском совок, лопату і т.п. не піднімати на рівень очей, щоб уникнути попадання в них піску. Гасити палаючі предмети, що знаходяться на відстані не менше 2 м від контактної мережі, дозволяється тільки вуглекислотними, аерозольними або порошковими вогнегасниками.

Гасити палаючі предмети водою, хімічними, пінними та повітряно-пінними вогнегасниками можна тільки після вказівки керівника робіт або іншої відповідальної особи про те, то напруга з контактної мережі знято і вона заземлена (тролеї крана, освітлення, кран - балки).

Гасіння предметів, розташованих на відстані більше 7 м від контактного проводу, що перебуває під напругою, може бути допущено без зняття напруги. При цьому необхідно стежити, щоб струмінь води або піни не торкалася проводів і обладнання, що знаходяться під напругою [12].

### **Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

У випадку пробою електричної напруги на корпус зварювального агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника ділянки.



У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, не обхідно відключити зварювальний агрегат від мережі, покласти потерпілого на деревинний настил, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити постраждалому штучне дихання.

У випадку загорання зварювального агрегату необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника.

Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

- негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за телефоном 101;
- приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на ділянці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран, тощо);
- викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, ділянки).

У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника ділянки та звернутися в медпункт.

## 5. ІННОВАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ ПОКРИТТІВ

Розділ магістерських дисертацій «Розроблення стартап-проекту» присвячено реалізації першого етапу розроблення стартап-проекту, а саме висвітленню маркетингових аспектів створення стартапу: відбору ідей, створенню концепції продукту, визначення перспектив ринкової реалізації проекту та розроблення маркетингової стратегії. Розділ є завершальною частиною магістерської дисертації і виконується у вигляді оцінювання можливостей та формування заходів із ринкового впровадження інноваційних пропозицій магістранта.

**Метою розділу** є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

**Завдання розділу** полягає в маркетинговому аналізі перспектив реалізації запропонованих магістрантом науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження.

### 5.1. Опис ідеї проект

В межах підпункту послідовно проаналізовано та подані у вигляді таблиць

- зміст ідеї;
- напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати користувач товару;
- чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників;

**Таблиця 5.1. Опис ідеї проекту**

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Дослідити якісні показники покриттів з використанням інтерметалідів системи Fe-Al при плазмовому напиленні та застосування для нанесення ерозійно та теплостійких покриттів.	Сміттєпереробна галузь	Збільшується енергоефективність та ресурс обладнання
	Авіа будування	За рахунок відновлення вживаних деталей значно зменшуються економічні витрати на ремонт через відсутність потреби закупки нових комплектуючих.
	Машинобудування	Завдяки використуванню інтерметалідних захисних покриттів на деталях, досягається визволення значної частки виробничих ресурсів

## 5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею данного проекту.

**Таблиця 5.2. Технологічна здійсненність ідеї проекту**

<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
Дослідити якісні показники покриттів з використанням інтерметалідів системи Fe-Al при плазмовому напиленні та застосування для	Плазмове напилення захисного покриття на основі ітерметалідів Fe-Al на вироби що працюють в умовах	Данна технологія була розроблена в ІЕЗ ім. Е.О. Патона.	Данна технологія має широкий доступ до загалу.

нанесення ерозійно та теплостійких покриттів.	теплонавантажень та ерозійного зношування.		
За результатами аналізу можна зробити висновок: що дана технологія має можливість реалізації на ринку, шляхом плазмового напилення захисного покриття на основі інтерметалідів Fe-Al.			

### 5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Проведення визначення потенційної групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог (табл. 5.3).

**Таблиця 1.3. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту**

<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
Відновлення та нанесення захисного покриття.	1.Авіаремонтні заводи; 2.Станції тех обслуговування. 3.Сміттє спалювальні заводи.	Якість виконаної роботи(відновленого або напиленого покриття). Певний ресурс напиленого покриття.	- до продукції: Відповідність технічним вимогам виробу - до компанії: Виконання замовлення в строк.

В данній таблиці був проведений SWOT- аналіз(матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) стартап-проекту. Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей .Можливостей маркетингового середовища.

**Таблиця 5.4. SWOT- аналіз стартап-проекту**

1.Ефективність методу; 2.Економічна складова; 3.Широкий спектр застосування.	1.Метод не дозволяє покривати внутрішні поверхні. 2. Застосування матеріалів із стабільною рідкою фазою.
Ведеться робота нат покращенням данної технології та виключення недоліків в майбутньому.	1.Винаходження більш ефективних технологій. 2.Відмова від данної технології на користь крупно вузлової заміни агрегатів замість подетального ремонту.

**Висновки:**

Виходячи з проведеного аналізу в данного проекту є можливість ринкової комерціалізації та подальший розвиток та розвиток в даному ринковому сегменті.

В цілому в промисловості, сміттєспалювальній авіа і судно-машинобудуванні, завдяки використуванню захисних покриттів на деталях, досягається визволення значної частки виробничих ресурсів (сировина, матеріали, паливно-енергетичні, трудові, фінансові ресурси та транспорт) в циклі „добування руди – чорна та кольорова металургія – транспорт – машинобудування – експлуатація машин”.

Необхідно відзначити, що нанесення покриттів мало змінює структуру і властивості початкового виробу. Тому для досягнення найбільшого ефекту використування плазмових захисних покриттів, необхідно надати особливу увагу вибору матеріалу, підготовці поверхні виробу, режиму напилення.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті розробки магістерської дисертації по темі «Дослідження якісних показників покриттів з використанням інтерметалідів системи Fe-Al при плазмовому напиленні» зроблені наступні висновки:

- Випробування зносостійкості покриттів при використанні інтерметалідів системи Fe-Al показали, що напилене покриття володіє покращеними властивостями нанесеного шару до ерозійної стійкості. Загалом, зносостійкість може збільшитись до 6 разів. Підтверджено позитивний вплив інтерметалідів системи Fe-Al на структурні зміни, та відповідно мікротвердість і зносостійкість напиленого покриття. Данний метод є економічно та ефективно обґрунтованим.
- Враховуючи склад інтерметалідів системи Fe-Al, де Fe-20%, Al-80% такі матеріали струмені плазми створюють екзотермічний ефект, що збільшує продуктивність і к.к.д процесу напилення.
- Такі композиції можуть давати мікротвердість 4600МПа.
- Можуть застосовуватись для нанесення теплозахисних, жароміцних, ерозійностійких функціональних покриттів.
- Для напилення теплозахисних покриттів обрана плазмова установка Київ-7
- Зроблено аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів при плазмовому напиленні та розроблені заходи, щодо їх усунення або зменшення до нормативних значень. Проведений розрахунок місцевої вентиляції;
- Проведений аналіз інноваційних показників при використанні інтерметалідних покриттів, та визначенні ринкові можливості технології

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. N.S. Stoloff. Iron aluminides: present status and future prospects // Materials Science and Engineering. -A258. -1998. -P.1-14.
2. Gang Ji, T.Grosdidier, H.L.Liao, J-P.Morniroli. Surface Engineering by Thermal Spraying Nanocrystalline Coatings: the case of iron aluminide // Materiaux. -2002. P. 1-3.
3. Gang Ji, J-P.Morniroli T.Grosdidier. Nanostructures in Thermal Spray Coatings // Scripta Materialia. -48. -2003. -P. 1599-1604.
4. Y.Wang, M.Yan. The effect of CeO<sub>2</sub> on the erosion and abrasive wear of thermal sprayed FeAl intermetallic alloy coatings // Wear. 261. -2006. -P. 1201-1207.
5. J.Xiang, X.Zhu, G.Chen, Z.Duan, Yan Lin, Ying Lin. Oxidation behavior of Fe<sub>40</sub>Al-xWC composite coatings obtained by high-velocity oxygen fuel thermal spray // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 19. -2009. -P. 1545-1550.
6. H.-T.Wang, Ch-J.Li, G.-J.Yang, Ch-X.Li. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Property of Cold-Sprayed Nanostructured FeAl / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Intermetallic Coating // Vacuum. 83. -2009. -P. 146-152
7. R.N.Wright, T.C.Totemeier. Microstructure and Properties of Iron Aluminide Coatings // Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. -2002.
8. T.Grosdidier, A.Tidu, H.L.Liao. Nanocrystalline Fe-40Al Coating Processed by Thermal Spraying of Milled Powder // Scripta Materialia. -44. -2001. -P. 387-393.
9. Gang Ji, O.Elkedim, T.Grosdidier. Deposition and Corrosion resistance of HVOF Sprayed Nanocrystalline Iron Aluminide Coatings // Surface&Coatings Technology. -190. -2005. -P. 406-416.
10. Gang Ji, T.Grosdidier, H.L.Liao, J-P.Morniroli, C.Codder. Spray Forming thick Nanostructured and Microstructured FeAl Deposits // Intermetallics. -13. -2005. -P. 596-607.

11. B.Szczucka-Lasota, B.Formanek, A.Hernas. Growth of corrosion products on thermally sprayed coatings with FeAl intermetallic phases in aggressive environments // 13<sup>th</sup> International Scientific Conference on Achievements in Mechanical and Materials Engineering, 16<sup>th</sup>-19<sup>th</sup> May 2005, Gliwice-Wisla, Poland. -2005. –P. 619-624.
12. Magnee A., Offergeld E., Leroy V. Lefort A. Fe-Al Intermetallic Coatings Applications to Thermal Energy Conversion Advanced Systems // Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Spray Conference, Nica, France. -25-29 May/ -1998. –P. 1091-1096.
13. N.Cinca, J.M. Guilemany. Thermal spraying of transition metal aluminides: An overview // Intermetallics. -24. -2012. –P. 60-72.
14. N.Cinca, J.M. Guilemany. An overview of intermetallics research and application: Status of thermal spray coatings // Journal of Materials Research and Technology. –V. 02. Num 01. -2013. –P. 1-11.
15. T.C. Totemeier, R.N., W.D. Swank. Microstructure and Stresses in HVOF Sprayed Iron Aluminide Coatings // Journal of Thermal Spray Technolog. -V. 11(3). -2002. –P. 2-9.
16. T.C.Totemeier, R.N.Wright. Coating Microstructure – Property – Performance Issues // 19<sup>th</sup> Annual Conference On Fossil Energy Materials. -2005.
17. T.Grosdidier, Gang Ji, N.Bozzolo. Hardness, Thermal Stability and Yttrium Distribution in Nanostructured Deposits Obtained by Thermal Spraying from Milled – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Reinforced – or Atomized FeAl Powder // Intermetallics. –14. -2006. –P. 715-721.
18. T.Grosdidier, Gang Ji, F.Bernard, E.Gaffet, Z.A.Munir, S.Launois. Synthesis of FeAl nanostructured materials by HVOF spray forming and Spark Plasma Sintering // Intermetallics. –14. –2006. –P. 1208-1213.
19. Gang Ji, T.Grosdidier, J-P.Morniroli. Microstructure of a High-Velocity Oxy-Fuel Thermal-Sprayed Nanostructured Coating Obtained from Milled Powder // Metallurgical and Materials Transactions A. -V. 38A. -2007. -P. 2455-2463.



20. J.M.Guilemany, C.R.C.Lima, N.Cinca, J.R.Miguel. Studies of Fe-40Al coatings obtained by high velocity oxy-fuel // Surface&Coatings Technology. 201. -2006. -P. 2072-2079.
21. J.M.Guilemany, N.Cinca. High-temperature oxidation of Fe40Al coatings obtained by HVOF thermal spray // Intermetallics. –V. 15. -2007. –P. 1384-1394.
22. J.M.Guilemany, N.Cinca, S.Dosta, I.G.Cano. FeAl and NbAl<sub>3</sub> Intermetallic-HVOF Coatings: Structure and Properties // Journal of Thermal Spray Technology. 536–V. 18 (4). -2009. –P. 536-545.
23. N.Cinca, S.Dosta, J.M.Guilemany. Nanoscale characterization of FeAl-HVOF coatings // Surface&Coatings Technology. 205. –2010. -P. 967-073.
24. D.Formanek, J.Cizner, B,Szczucka-Lasota, R.Przeliorz. The corrosion resistance of HVOF sprayed coatings with intermetallic phases in aggressive environments // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. –V. 16. issue 1-2. -2006. –P. 46-50.
25. Ch.Xiao, W.Chen. Sulfidation resistance of CeO<sub>2</sub>-modified HVOF sprayed FeAl coatings at 700°C // Surface&Coatings Technology. 201. –2006. -P. 3625-3632.
26. C.Cordier-Robert, T.Grosdidier, Gang Ji, J.Foct. Mössbauer and X-ray diffraction characterization of Fe<sub>60</sub>Al<sub>40</sub> coatings prepared by thermal spraying// Hyperfine Interact. –2006. –P. 951-957.
27. D.-M.Yang, B-H.Tian, Y.Cao. Microstructures and properties of FeAl coatings prepared by LPPS, APS and HVOF // Proc. of ITSC'2011, 2011, P. 1229 – 1234.
28. S.Kumar, V.Selvarajan, P.V.A.Padmanabhan, K.P.Sreekumar Characterization and comparison between ball milled and plasma processed iron-aluminium thermal spray coatings // Surface&Coatings Technology. 201. –2006. -P. 1267-1275.
29. C.Senderowski, Z.Bojar, G.Roy, T.Czujko, W.Wolczynski. Residual Stresses Determined by the Modified Sachs Method Within a Gas Detonation Sprayed Coatings of the Fe-Al Intermetallic // Archives of Metallurgy and Materials. V. 52, issue 4. -2007. -10 p.

30. C.Senderowski, Z.Bojar. Cas detonation spray forming of Fe-Al coatings in the presence of interlayer // Surface&Coatings Technology. 202. –2008. -P. 3538-3548.
31. C.Senderowski, Z.Bojar. Influence of Detonation Gun Spraying Conditions on the Quality of Fe-Al Intermetallic Protective Coatings in the Presence of NiAl and NiCr Interlayers // Journal of Thermal Spray Technology. -2009. –13 p.
32. A.Powlowski, T. Czeppe, L.Mojor, C.Senderowski. Structure Morphology of Fe-Al Coating Detonation sprayed Onto Carbon Steel Substrate // Archives of Metallurgy and Materials. V. 54, issue 3. -2009.
33. C.Senderowski, Z.Bojar, W.Wolczynski, A.Pawlowski. Microstructure Characterization of D-gun Sprayed Fe-Al Intermetallic Coatings // Intermetallics. -2010. –P. 1405-1409.
34. W.Wolczynski, G.Garzel, J.Morgiel, C.Senderowski, A.Pawlowski. Meta-stable Solidification Created by the Detonation Method of Coating Formation // Archives of Foundry Engineering. –V. 12. -2012.
35. B.Xu, Z.Zhu, S.Ma, W.Zhang, W.Liu. Sliding Wear Behavior of Fe-Al and Fe-Al/WC Coatings Prepared by High Velocity arc Spraying // Wear. 257. -2004. -P. 1089-1095.
36. Yongxiong Chen, Xiubing Liang, Shicheng Wei, Yan Liu, Binshi Xu. Heat treatment induced intermetallic phase transition of arc-sprayed coating prepared by the wires combination of aluminum-cathode and steel-anode // Applied Surface Science. V. 255 (19), 2009, Pages 8299–8304.
37. H.-T.Wang, Ch-J.Li, G.-J.Yang, Ch-X.Li, Q.Zhang, W.-Y.Li. Microstructural Characterization of Cold-Sprayed Nanostructured FeAl Intermetallic Compound Coating and its Ball-Milled Feedstock Powders // Journal of Thermal Spray Technology. –V. 16(5-6). Mid-December. -2007. –P. 669-676.
38. H.-T.Wang, Ch-J.Li, G.-J.Yang, Ch-X.Li. Cold Spraying of Fe/Al Powder mixture: Coating Characteristic and Influence of Heat Treatment on the Phase Structure // Applied Surface Science. 255. -2008. –P. 2538-2544.

39. Кулик А.Я., Борисов Ю.С. та ін. Газотермічне напилення композиційних порошків: Машинобудування, 1985, 200 с.
40. Sanjeev Chandra, Pierre Fauchais. Formation of Solid Splats During Thermal Spray Deposition // Journal of Thermal Spray Technology. - 2009. - V. 18 (2), pp 148-180.
41. M.P. Planche, H. Liao, C. Coddet Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with twin wire arc spray process and different working conditions // Surface and Coatings Technology. V. 182 (2-3), 2004, Pages 215-226.
42. Fukumoto, S. Katoh and I. Okane: splat behavior of plasma sprayed particles on flat substrate surface. Proc. of ITSC 1995. pp. 353-358.
43. M. F. Morks, Y. Tsunekawa, M. Okumura, M. A. Shoaib Splat morphology and microstructure of plasma sprayed cast iron with different preheat substrate temperatures // Journal of Thermal Spray Technology. 2002 V. 11 (2), pp 226-232.
44. H. Li, H.-L. Liao, S. Costil, and C. Coddet, Effects of Substrate Surface Condition on the Flattening Behavior of Impinging Splat, Proc. of the ITSC, 2005, p 777-784.
45. Сварка різнорідних металів и сталевих / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевський. - М.: Машинобудування, 1984. - 239 с.
46. Вестбрук Д.Х. Механічні Властивості металевих з'єднань / Д.Х. Вестбрук. М.: Металлургиздат, 1962. 247 с.
47. Д. Н. Макеев Вплив вводяться легуючих елементів на Властивості сталі // Вісник Саратовського державного технічного університету. - 2012. - № 67. - С. 92-98.
48. Астахов Е. А. детонаційному комплекс «Перун-С» для нанесення захисних покриттів / Е. А. Астахов // Автоматическая сварка. - 2003. - С. 38-43.

49. Вплив режимів електродугової металізації и складу застосовуваного порошкових дротів на структуру и абразивну зносостійкість покриттів // В. І. Похмурській, М. М. Студент, І. А. Рябцев и ін. // Автомат. зварювання - 2006. - № 7. - С. 31-36.
50. Тамаргазін А. А. Вплив факторів процесса електродугового напилення на структуроутворення и Властивості покриттів / А. А. Тамаргазін, Л. А. Лопата, Ю. В. Брусило, С. А. Довжук // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському ВИРОБНИЦТВІ, галузевих машинобудування, автоматизація. - 2010. - Вип. 23. - С. 287-297.
51. В.В. Сергеев, Ю.Л. Спиридонов, І.І. Фарахшін. Відновлення колінчастих валів вітчизняних і зарубіжних дизельних двигунів електродугової металізацією // Зварювальне виробництво. 2004. № 2, С.44-26.
52. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиа- двигателестроении. – М.: Высшая школа, 1999. – 525 с.
53. C.Suryanarayana. Mechanical alloying and milling // Progress in Mater. Sci. -2001. - №46. -Р. 1-184.
54. Розробка технологічних параметрів гарячого алітірованія сталеві холоднокатаної смуги і дослідження її механічних характеристик /Э.В.Аксенова,И.Б. Серебрякова,В.И. Похмурский, В.С. Заміховський // Захисні покриття на металах. - 1974. - № 8. - С. 61 - 65.
55. J. Mostaghimi. Modelling droplet impact in plasma spray processes // Pure & Applied Chemistry, 70, pp. 1209-1215, -1998. (Invited review paper).
56. Н. Fukanuma, R. Huang, Y. Tanaka, Y. Uesugi. Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Splat Cooling in Plasma Spray Coatings // Journal of Thermal Spray Technology. - 2009. V. 18 (5). - pp. 965 - 974.

57. Теорія і практика газопламенного наплення / П.А.Вітязь, В.С. Івашко, Е.Д.Манойло і ін. - Мінськ: Видавництво Мінського університету, -1993. - 295 с.