

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

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
Кафедра зварювального виробництва**

«На правах рукопису»
УДК 621.791

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри
_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ
(підпис) «__» _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему:
«Дифузійне зварювання жароміцних сплавів з поверхнями з'єднань,
легованими висококонцентрованими потоками плазми»**

Виконав:
студент II курсу, групи ЗВ-з21мп
Лепіліна Ксенія Михайлівна

Керівник:
Зав. каф., дтн, проф.
Квасницький Віктор Вячеславович

Консультант з охорони праці
та безпеки в надзвичайних ситуаціях:
Професор, д. т. н.,
Левченко Олег Григорович

Консультант з розроблення стартап-проєкту:
Доцент, к. е. н.,
Глущенко Ярослава Іванівна

Рецензент:
Зав. каф. ЛТФТТ, к. т. н., доц.,
Кагляк Олексій Дмитрович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 року

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

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
Кафедра зварювального виробництва**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма – «Інжиніринг зварювання, лазерних
та споріднених технологій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Лепіліній Ксенії Михайлівні

**1. Тема дисертації «Дифузійне зварювання жароміцних сплавів з поверхнями
з'єднань, легованими висококонцентрованими потоками плазми»**

науковий керівник Квасницький Віктор Вячеславович, д.т.н., проф.

затверджені наказом по університету від «15 » 11 2023 р. № 3745-с.

2. Термін подання студентом дисертації 10 січня 2024 р.

3. Об'єкт дослідження - структурна будова та властивості матеріалу поверхонь жароміцних сплавів на основі нікелю легованих ВПП та їх з'єднань отриманих дифузійним зварюванням.

4. Вихідні дані: хімічний склад сплаву ЧС88ВІ, обладнання для дифузійного зварювання в вакуумі, установки УДСВ-ДТ та ВВУ-КПП, зразки з жароміцного сплаву ЧС88ВІ з легованими цирконієм поверхнями, обладнання для проведення металографічних досліджень, мікротвердомір ПМТ-3, умови виготовлення – цехові; температура експлуатації – від -30 до 950 °С; тип виробництва – дрібносерійне; кількість виготовлення – 5000 одиниць на рік.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Виконати аналіз: особливостей технології та застосування дифузійного зварювання (ДЗ) жароміцних сплавів на основі нікелю; методів легування поверхонь з'єднання з використанням високоенергетичних джерел тепла; технології обробки поверхонь матеріалів висококонцентрованими плазмовими потоками (ВПП); впливу легування цирконієм на структуру та властивості оброблених поверхонь; визначити мету та завдання досліджень. **2. Визначити рекомендовані методики та обладнання для проведення досліджень:** обладнання для вакуумного напилення прошарку легуючого елементу, легування поверхонь ВПП та ДЗ; проведення досліджень структурної будови, хімічного складу, твердості легованих цирконієм поверхневих шарів та зварних з'єднань. **3. Розробити та дослідити рекомендовані технології процесів виготовлення зварного виробу:** визначити вплив параметрів режимів легування ВПП та умов створення прошарку цирконію на формування структури та розподіл легуючих елементів в приповерхневих шарах дослідних зразків; вплив легування цирконієм на твердість жароміцного сплаву; особливості процесів формування ДЗ з'єднань з заготовок з легованими цирконієм поверхнями, вплив параметрів режимів ДЗ на структуру та властивості зварних з'єднань; обґрунтувати вибір раціонального виконання технологічного процесу виготовлення виробів; розробити технологічні прийоми зварювання заготовок зі сплаву ЧС88ВІ з легованими цирконієм поверхнями. **4. Виконати розробку стартап-проєкту** для впровадження розробленої технології. **5. Проаналізувати** небезпечні фактори і розробити заходи з охорони праці на виробництві та безпеки в надзвичайних ситуаціях. **6. Сформулювати загальні висновки** по роботі.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

1. Сутність та основні технологічні параметри процесу ДЗ, схеми виконання зварювання, (1-2 слайда); 2. Способи легування поверхонь з'єднання з використанням висококонцентрованих джерел тепла, зокрема висококонцентрованих плазмових потоків (СПП), схема процесу легування, вибір легуючого елемента (1-3 слайда); 3. Матеріали, обладнання та методики виконання досліджень (1-2 слайда); 4. Вплив товщини прошарку цирконію та параметрів режимів легування ВПП на формування структури та властивості легованих шарів (1-2 слайда). 5. Дослідження формування ДЗ з'єднань з легованими ВПП поверхнями жароміцного сплаву (1-2 слайда). 6. Дослідження структурної будови ДЗ з'єднань з легованими ВПП поверхнями (2-3 слайда). 7. Експериментальне дослідження розподілу мікротвердості при ДЗ заготовок з обробленими різними способами поверхнями (2-3 слайда); 8. Технологічні рекомендації по ДЗ жароміцних сплавів з легованими під впливом ВПП поверхнями (1-3 слайда); 9. Висновки по роботі (1-2 слайда).

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1. В.В. Квасницький, К.М. Лепіліна, Д.С. Корсун, Л.Г. Свиридова. Дифузійне зварювання жароміцних сплавів з легованими висококонцентрованими потоками плазми поверхнями.

2. В.В. Квасницький, Д.С. Корсун, К.М. Лепіліна, Л.Г. Свиридова. Дифузійне зварювання жароміцного сплаву ЧС88У з модифікованими висококонцентрованими потоками плазми поверхнями.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проєкту	Глушченко Я.І., к.е.н., доц.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.Г., зав. каф.		

9. Дата видачі завдання 17.11.2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Систематизація і обробка матеріалів для включення до пояснювальної записки.	10 грудня 2023 р.	
2	Розробка проєктної частини	17 грудня 2023 р.	
3	Збір додаткових матеріалів, детальна розробка і обґрунтування проєктних рішень	24 грудня 2022 р.	
4	Оформлення графічного матеріалу	01 січня 2024 р.	
5	Літературна обробка і остаточне оформлення пояснювальної записки	10 січня 2024 р.	

Студент

Ксенія ЛЕПІЛІНА

Науковий керівник

Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація представлена пояснювальною запискою, яка має 6 розділів, 31 графіків та зображень, 25 таблиць, 112 аркушів друкованого на А4 тексту та 73 посилань.

Ключові слова: жароміцні сплави, висококонцентровані потоки плазми, легування поверхонь, дифузійне зварювання, мікроструктура, властивості металу.

Актуальність теми: Сплав на основі нікелю ЧС88У використовується для виготовлення відповідальних деталей, таких як соплові лопатки газотурбінних двигунів (ГТД), що працюють в гарячому тракті і має незадовільну технологічну здатність до зварювання, високу температуру плавлення тому отримання якісних зварних з'єднань цього сплаву зварюванням плавленням утруднене. Зварювання жароміцних сплавів на основі нікелю зварюють тиском, а саме дифузійним зварюванням (ДЗ). Легування поверхонь з'єднання за допомогою висококонцентрованих потоків плазми активує поверхні, дозволяє підвищити якість та надійність, термін експлуатації зварних виробів.

Мета роботи: Встановлення закономірностей утворення структури, властивостей жароміцного сплаву ЧС88У при легуванні поверхонь з'єднання висококонцентрованими потоками плазми та при отриманні зварних з'єднань за технологією дифузійного зварювання.

Задачі досліджень:

1. Визначити вплив умов та режимів легування висококонцентрованими потоками плазми на формування структури та властивості поверхневого шару металу зі сплаву ЧС88У.
2. Визначити вплив легованих поверхонь на формування та структуру з'єднань отриманих ДЗ.
3. Розробити технологічні рекомендації щодо отримання дифузійнозварних з'єднань з легованими висококонцентрованими потоками плазми поверхнями.

Предмет досліджень: Процеси, що протікають при легуванні поверхонь жароміцних нікелєвих сплавів висококонцентрованими потоками плазми та при їх з'єднанні дифузійним зварюванням.

Об'єкт досліджень: Структура та властивості легованих шарів жароміцних сплавів на основі нікелю та з'єднань отриманих при ДЗ.

ABSTRACT

The master's thesis is presented in an explanatory note, which has 6 chapters, 31 graphs and images, 25 tables, 112 sheets of printed A4 text and 73 references.

Keywords: heat-resistant alloys, highly concentrated plasma flows, surface alloying, diffusion welding, microstructure, metal properties.

Relevance of the topic: The nickel-based alloy ChS88U is used to manufacture critical parts, such as gas turbine engine (GTE) nozzle blades operating in the hot runner, and has unsatisfactory technological welding ability and high melting point, so it is difficult to obtain high-quality welded joints of this alloy by fusion welding. Nickel-based heat-resistant alloys are welded by pressure welding, namely diffusion welding (DW). Alloying the joint surfaces with highly concentrated plasma flows activates the surfaces, improves the quality and reliability, and the service life of welded products.

Objective: Establishing the regularities of structure formation, properties of the heat-resistant ChS88U alloy when alloying the joint surfaces with highly concentrated plasma flows and when obtaining welded joints using diffusion welding technology.

Research tasks:

1. To determine the effect of alloying conditions and modes with highly concentrated plasma flows on the formation of the structure and properties of the surface layer of the metal from the ChS88U alloy.
2. To determine the influence of doped surfaces on the formation and structure of joints obtained by DW.
3. To develop technological recommendations for the production of diffusion-welded joints with surfaces alloyed with highly concentrated plasma flows.

Subject of research: Processes occurring during alloying of the surfaces of heat-resistant nickel alloys with highly concentrated plasma flows and during their joining by diffusion welding.

Object of research: The structure and properties of alloyed layers of nickel-based heat-resistant alloys and joints obtained by DW.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	11
ВСТУП	12
1. ПЕРСПЕКТИВИ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ.....	14
1.1 Методи модифікування поверхні матеріалів	14
1.2 Умови реалізації високоенергетичних плазмових потоків.....	17
1.3 Взаємодія плазмових потоків із поверхнею твердого тіла	26
1.4 Модифікування поверхні матеріалу високоенергетичними плазмовими потоками.....	28
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	33
2.1 Досліджені матеріали та використане обладнання	33
2.2 Дослідження будови та властивостей матеріалумодифікованого шару та зварних з'єднань	35
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ, МОДИФІКОВАНИХ ЛЕГУЮЧИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОТОКІВ	38
3.1. Дослідження характеристик матеріалів поверхневих шарів з використанням металографії та рентгеноструктурного аналізу	38
3.2 Дослідження легування матеріалу поверхневого шару жароміцних нікелевих сплавів цирконієм.....	51

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.	ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ СПЛАВІВ ПІСЛЯ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ПЛАЗМОВНИМИ ПОТОКАМИ.....	64
4.1.	Особливості легованого шару при обробці високоенергетичними плазмовими потоками жароміцних дисперсійно зміцнюваних нікелевих сплавів, що знаходяться в різному структурному стані.....	64
4.2.	Особливості технологічних процесів дифузійного зварювання ...	73
5.	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ	77
5.1.	Опис ідеї проєкту (товару, послуги, технології).....	78
5.2.	Технологічний аудит ідеї проєкту	80
5.3.	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	80
5.4.	Розроблення ринкової стратегії проєкту.....	87
5.5.	Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	89
5.6.	Висновки	91
6.	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	92
6.1.	Аналіз шкідливих і небезпечних факторів (ШНВФ).....	93
6.2.	Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці	94
6.3.	Забезпечення вимоги організації робочих місць	95
6.4.	Вимоги до експлуатації зварювального обладнання.....	96
6.5.	Захист від теплового випромінювання	96

6.6.	Вимоги до електробезпеки	97
6.7.	Розрахунок інженерного рішення.....	97
6.8.	Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях	98
6.9.	Пожежна безпека.....	99
6.10.	Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	100
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ		102
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....		103

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДЗ- дифузійне зварювання

ВПП- висококонцентровані потоки плазми

МПП- магнітоплазмовий прискорювач

МПП КГ- магнітноплазмовий прискорювач компактної геометрії

РПТ - радіаційно-пучкові технології

КСПП - квазістаціонарний сильноточковий плазмовий прискорювач

СЕПП - стиснені ерозійні плазмові потоки

ГТД - газотурбінні двигуни

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості України передбачає використання нероз'ємних з'єднань при виготовленні виробів. Чільне місце займає з'єднання зварюванням. Використання цього методу забезпечує зниження метало-, енергоємності виробництва. У цьому плані перспективним є проблема підвищення якості з'єднань однорідних і різнорідних матеріалів.

У зв'язку з цим розробка прогресивних технологій зі застосування дифузійного зварювання (ДЗ) жароміцних сплавів на основі нікелю; методів легування поверхонь з'єднання є актуальним завданням розвитку сучасних науково-технічних напрямків зварювальних виробництв. Використовують високоенергетичні джерела тепла при обробці поверхонь матеріалів висококонцентрованими плазмовими потоками (ВКП). Досліджують вплив легування цирконієм на структуру та властивості оброблених поверхонь.

Для вирішення цієї проблеми перспективне використання імпульсних потоків частинок з високою питомою потужністю (більше $\sim 10^5$ Вт/см²) для модифікації зварювальних поверхонь деталей. Слід зауважити, що вплив високоенергетичних потоків частинок супроводжується високошвидкісним ($10^6 - 10^9$ К/с) нагріванням та охолодженням розплаву. На поверхнях шва зварного з'єднання спостерігали формування субмікронних та нанорозмірних структурних складових. Доведено збільшення швидкості перебігу дифузійних процесів, що забезпечують активацію поверхонь з'єднання. Спостерігали підвищення стабільність формування зварного з'єднання та його якості. Обробку високоенергетичними потоками частинок ефективно використовувати для легування поверхневого шару матеріалів додатковими елементами, що знижують температуру плавлення сплавів і не знижують експлуатаційні властивості шва, що отриманий дифузійним зварюванням. Легування забезпечують за рахунок нанесення плівки або покриття легуючого елемента на поверхню матеріалу з подальшою обробкою високоенергетичними компресійними плазмовими потоками.

						Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На даний час активно використовують імпульсні потоки з високою питомою потужністю для модифікації з метою підвищення експлуатаційних характеристик металевих матеріалів.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ПЕРСПЕКТИВИ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ

1.1.Методи модифікування поверхні матеріалів

Модифікування поверхні матеріалу забезпечує зміну його структури (створення метастабільних структур, зокрема й аморфних, і виникнення наноутворень) або хімічного складу поверхневого шару. Авторами доведено стабільність розмірів виробу[1].

У роботі [2] показано, що модифікування та легування зумовлює створення нових технологічних процесів, у яких використовують іонні, електронні та лазерні пучки або потоки плазми. У цьому випадку створюються умови розвитку найперспективніших галузей матеріалознавства. У цій роботі детально розглянуто модифікацію поверхні іонним, лазерним і електронним пучками. Авторами розроблено теорію електронно-променевої обробки матеріалів [3]. Науково-технічна інформація щодо лазерної та електронно-променевої обробки представлена в роботі [4]. Іонна імплантація та променева технологія були висвітлені в роботах [5,6] та останнім часом розвинуті в роботах авторів [7,8,9].

У згаданих вище роботах використовують чотири основні напрямки модифікації поверхні: дією лазерного пучка, плазмового газового потоку (як правило, плазми інертного газу), електронного пучка і потужного іонного пучка - іонна імплантація. Кожен напрямок має свої переваги і недоліки [1,2,7].

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Дифузійне зварювання жароміцних сплавів з поверхнями з'єднань, легованими високонцентрованими потоками плазми	/лт.	Арк.	Архувів
Розроб.		Лепіліна К.М.						
Перевір.		Квасницький В.В.						
Н. контр.		Лисак В.В.				КПІ ім. І. Сікорського НН ІМЗ ім. Е.О.Патона		
Затверд.		Квасницький В.В.						

При обробці плазовими, лазерними та електронними джерелами енергії забезпечують поліпшення властивостей поверхневого шару (зміцнення, підвищення корозійної стійкості тощо) за рахунок термічної дії з розплавленням, або без розплавлення матеріалу, а також легування поверхні з напиленням на неї легувального елемента для наступної обробки. Під час плазової обробки легувальний елемент вводять в газову плазму, можливе також проведення хіміко-термічної обробки. Зазначені джерела мають високу концентрацію енергії, забезпечують високі швидкості нагріву та охолодження із загартуванням рідкого або твердого металу. Найвищі швидкості охолодження забезпечує лазерна обробка. При швидкостях охолодження до 10^{10} К/с в більшості випадків спостерігали аморфізацію металу поверхні.

Іонна імплантація є способом зміни механічних і хімічних властивостей приповерхневого шару шляхом введення в тверде тіло будь-якого елемента з пучка високошвидкісних іонів, що мають енергію в кілька мегаелектрон-вольт. Параметри іонного пучка задають, виходячи з конкретного завдання. Для модифікації конструкційних матеріалів методом іонної імплантації достатньо мати енергію іонів 100 кеВ [7].

Розглянуті технології модифікування та легування поверхні мають загальну назву радіаційно-пучкових технологій (РПТ). Дослідження в цій галузі відповідають критеріям фундаментальних досліджень. До концентрованих потоків енергії [КПЕ] належать потужні електронні та іонні пучки, лазерне випромінювання і потоки високотемпературної плазми. Концентровані потоки енергії характеризуються високою щільністю потужності (до 10^{12} Вт/см²) та енергії (до 100 Дж/см²). Вони забезпечують високі градієнти температур, що виникають в приповерхневому шарі ($10^6 \dots 10^8$ К/см), високі швидкості нагріву та охолодження (до $10^9 \dots 10^{11}$ К/с).

Основним технологічним завданням РПТ є зміна топології поверхні, активація поверхні, зміна структури або хімічного складу, нанесення або

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

видалення поверхневого шару, виправлення дефектів у поверхневих шарах тощо. Результатами технологій є зміна шорсткості поверхні, виникнення модифікованого шару певної глибини, складу і будови структури, міцності адгезійних з'єднань, рівня залишкових напружень тощо. [7,8].

Модифікування здійснюється за рахунок швидкого нагріву та охолодження поверхневого шару, імплантації атомів (іонів елементів), рідиннофазного перемішування в поверхневому шарі, термічних і структурних напружень, розплавлення або випаровування матеріалу поверхневого шару, дефектоутворення в шарі матеріалу, хімічної взаємодії атомів поверхні виробу із середовищем чи бомбардувальними частками, осадження атомів на поверхні з регулюванням епітаксії, ударно-хвильової дії під час термічного удару, газодинамічного розбризкування матеріалу [7].

Застосування РПТ (модифікація і легування поверхонь) під час дифузійного зварювання і зварювання під тиском сприяють утворенню дифузійних з'єднань, наприклад, формують заданий рельєф поверхні шляхом її оплавлення, збільшують адгезійну здатність поверхні шляхом створення дефектів кристалічної решітки, інтенсифікують формування напружень і пластичних деформацій.

Утворення дефектів кристалічної структури (вакансій і дислокацій) відбувається під час епітаксимальної перекристалізації на межі розділу розплав-кристал, а також за рахунок термічних напружень, що розвиваються в процесі імпульсного нагріву. Термічні напруження зумовлені різницею в розширенні атомних решіток уздовж великих температурних градієнтів між розігрітою імпульсом тепла поверхнею і основою, що детально розглянута в роботі [2].

При зварюванні під тиском важливим є можливий механізм модифікації поверхні. В його основі лежить явище концентраційного переохолодження [10]. При певних швидкостях та концентраціях домішкових атомів межа розділу твердої та рідкої фаз стає нестабільною і відбувається

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

об'єднання домішкових атомів. Остання стадія кристалізації рідкого поверхневого шару полягає у взаємодії домішок різних за природою інгредієнтів. Спостерігали зонне очищення [10].

Досліджено модифікування заліза, аустенітної сталі та жароміцного нікелевого сплаву з використанням низькоенергетичних електронних імпульсних пучків [11-13]. Доведено, що модифікація поверхонь забезпечує їх активацію до взаємодії як за рахунок утворення субмікрокристалічної структури, так і легування поверхневого шару. Обробка матеріалів електронним пучком проводять у вакуумі при надлишковому тиску 10^{-2} Па. Для високоактивних металів цей вакуум не забезпечує необхідного захисту від кисню. Доведено, що для з'єднань жароміцних суперсплавів з легуванням їх поверхні цирконієм і гафнієм є найбільш перспективним [12]. Залишається ймовірність взаємодії з киснем [14]. Ефективним шляхом захисту цирконію та гафнію від окислення є введення в середовище газів HF і BF_3 [15], що реалізують при модифікуванні поверхні висококонцентрованими плазмовими потоками. Необхідні дослідження закономірності формування легованих поверхневих шарів при використанні СПП, а також з'єднань при дифузійному зварюванні та зварюванні під тиском.

1.2 Умови реалізації високоенергетичних плазмових потоків

Для отримання високоенергетичних плазмових потоків використовують електромагнітні плазмові прискорювачі з власним магнітним полем, у яких прискорення плазми здійснюється за рахунок сили, що виникає при взаємодії розрядного струму з власним магнітним полем [16]. Імпульсні плазмові прискорювачі досягли певної межі у своєму розвитку, оскільки шляхи підвищення параметрів плазми у таких системах практично вичерпані. Сьогодні існують потужні імпульсні прискорювачі, які дозволяють отримувати потоки водневої плазми з щільністю частинок $\sim 10^{15}$ 10^{16} см^{-3} , швидкістю $\sim 5 \cdot 10^7$ $\text{см} / \text{с}$ і повною енергоємністю понад 100 кДж за

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

час імпульсу ~ 10 мкс при к.к.д 30-50%. Однією з основних проблем для таких систем є ефективність передачі енергії накопичувачу плазмового струменя. Наступне підвищення параметрів плазми вимагає одночасного виконання двох суперечливих вимог: для ефективної передачі енергії накопичувача в прискорювач необхідно збільшувати відношення довжини електродів розрядного пристрою до радіусу каналу, а для зменшення втрат плазми в процесі розганяння необхідно цю величину зменшувати. Збільшення енергоємності потоків у таких системах може йти або у напрямку зменшення часу передачі енергії від накопичувачів, або шляхом стримування процесів, що призводять до втрат плазми. В даний час це є досить проблематичним. Тому перспективним для отримання високоенергетичних плазмових потоків є використання квазістаціонарних систем. Квазістаціонарні плазмові прискорювачі із власним магнітним полем знаходяться на третьому етапі свого розвитку.

На першому етапі використовували плазмові прискорювачі з суцільними коаксіальними (профільованими та непрофільованими) електродами, які працюють у режимі електронного перенесення струму. Особливістю прискорювачів із суцільними електродами є "ковзання" струму вздовж анода (незалежно від того, чи він є внутрішнім або зовнішнім електродом), що призводить до винесення струму за зріз інжектора. Спостерігали рух електронів не до електрода, а дрейфування уздовж його поверхні, що призводить до виникнення потужного прианодного стрибка потенціалу та сильного руйнування анода. Оскільки "ковзання" виникає за визначених у даних умовах значення струму, то це явище отримало назву "кризи" струму. Продукти руйнування випаровуються та іонізуються, електрони рухаються до анода, а іони потрапляють у канал, забруднюючи плазму, яка суттєво обмежує можливості збільшення вихідних параметрів плазмового потоку. Усунути ці явища у межах електронного струмоперенесення між еквіпотенційними електродами неможливо. Їх можна

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

уникнути в системах з іонним струмопереносом, коли струм у каналі, що прискорює, переноситься за рахунок дрейфу іонів поперек силових ліній магнітного поля. Першим таким прискорювачем був магнітоплазмовий прискорювач (МПП), розроблений А.І. Морозовим [17-20].

Для іонного струмоперенесення в розрядному пристрої прискорювача необхідно подавати іони в канал, що їх прискорює, з боку анода. Для цього зовнішній електрод (анод) виконаний стрижневим, внаслідок чого іони можуть потрапляти в канал через інтервал між анодними стрижнями. Заміна суцільного зовнішнього електрода стрижневим практично повністю усуває ерозію анода.

При притаманних МПП великих розрядних струмах, намагнічуються як електрони, а й іони. Через велику масу іони дрейфують від анода до катода, забезпечуючи тим самим перенесення струму в каналі. У цьому іони набирають кінетичну енергію з допомогою електричного поля під час руху вздовж його силових ліній, тобто. здійснюється іонно-дрейфове прискорення плазми [17-18].

Прискорення плазми в аксіально-симетричній системі двох електродів супроводжується її стисненням за зрізом внутрішнього електрода (катода) за рахунок взаємодії поздовжньої складової струму, спрямованої вздовж потоку (так званого виносного струму), з власним магнітним азимутним полем. В результаті на виході з розрядного пристрою формується стиснений плазмовий потік (СПП), параметри плазми якого значно вищі, ніж у міжелектродному проміжку.

У магнітоплазмовому прискорювачі (МПП), як і будь-якій іншій системі, де є контакт плазми з металом, відбувається ерозія електродів. У ньому спостерігається сепарація іонів M/z_e , де M – маса іона, а z_e – його заряд. На іон, що знаходиться в міжелектродному просторі, діють дві сили - електрична (eE) і сила Лоренца (VH/c), перпендикулярно спрямовані щодо його швидкості V . Для іонів домішки (наприклад, міді) електрична сила

					ЗВ-З21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більша за силу Лоренца, тому іони, які утворюються поблизу поверхні катода, повертаються щодо нього і, стікаючи з кінця катода, потрапляють у потік. Якщо в катоді зробити осьовий отвір (дивертор), то домішкові іони, які стікають за зріз катода, виштовхуватимуться в дивертор за рахунок високого тиску в області компресії. У результаті сам стиснений потік залишається "чистим" (вільним від домішкових іонів).

Досліджено [19-24], що у МПП з енергією накопичувача 30 кДж за зрізом розрядного пристрою та діаметром зовнішнього електрода 16 см при його роботі в повітрі при зниженому тиску (в діапазоні від 10^{-2} до 10^{-1} Па.) формується стиснений плазмовий потік діаметром 1...2 см і довжиною до 10 см, що існує понад 100 мкс. Швидкість плазми компресійного потоку в таких умовах становить $(50-70) \cdot 10^6$ см/с, а температура та концентрація електронів плазми – 3...5 еВ та $(0,7...1) \cdot 10^{18}$ см⁻³ відповідно.

Детально досліджено умови виникнення стиснених плазмових потоків середніх енергій, які генеруються газорозрядним МПП компактної геометрії (МПП КГ) [25-30]. Такий прискорювач при порівняно невеликій накопиченій енергії (до 15 кДж) і відносно малим розрядним пристроєм (діаметр зовнішнього електрода – 5 см) дозволяє генерувати стиснені потоки з параметрами плазми, достатніми для ефективної модифікації практично будь-яких металевих матеріалів. Загальний вигляд та схема розрядного пристрою МПП-КГ представлені на рис. 1.1.

Ефективним є використання внутрішнього електроду у якості катода. Його виготовляють з міді у вигляді зрізаного конуса з діаметрами 30 мм і 6 мм, довжиною 50 мм з осьовим отвором (дивертором). Зовнішнім електродом є циліндр, утворений вісьмома мідними стрижнями діаметром 8 мм і довжиною 115 мм, симетрично розташованими по колу діаметром 50 мм. Особливість геометрії розрядного пристрою МПП полягає в тому, що ізолятор з розвиненою поверхнею заглиблений у виточення фланця, а робоча (конусна) частина внутрішнього електрода віднесена від нього на значну

					<i>ЗВ-З21м.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(порівняно зі звичайним МПП) відстань - 90 мм. Вказана конструкція розрядного пристрою в умовах експерименту унеможливорює зміщення зони іонізації в період розрядного імпульсу в бік ізолятора. МПП може працювати з будь-якими газами та їх сумішшю як з імпульсною (клапанною) подачею робочої речовини, так і в режимі залишкового газу. В даному випадку заздалегідь відкачана вакуумна камера на наступному етапі роботи пристрою заповнюється робочим газом, зазвичай до тиску $1,3 \cdot 10^2 \dots 6,5 \cdot 10^3$) Па.

Швидкість плазмових утворень компресійного потоку МПП КГ в залежності від максимального значення розрядного струму і масової витрати газу становить $(4 \dots 7) \cdot 10^6$ см³/с. Температура та концентрація електронів у плазмі компресійного потоку становлять відповідно 1...3 еВ та $(4 \dots 7) \cdot 10^{17}$ см⁻³ при зміні напруги U_0 накопичувача енергії від 2,5 до 4,5 кВ та початкового тиску азоту в камері МПП $1,3 \cdot 10^2 \dots 1,3 \cdot 10^3$ Па

а

б

а – загальний вигляд; б - схема розрядного пристрою;

1 – катод, 2 – стержневої анод, 3 – ізолятор

Рисунок 1.1 – Розрядний пристрій МПП КГ

Для оцінки стійкості розряду в роботі [30] введено динамічний коефіцієнт $\eta(t)$, як відношення локальної концентрації електронів $N_e(t)$ у плазмі до повного розрядного струму $I_p(t)$:

$$\eta(t) = \eta N_e(t)/I_p(t).$$

					<i>ЗВ-З21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт $\eta(t)$ характеризує ступінь "стаціонарності" параметра, що досліджують (у нашому випадку N_e) по відношенню до повного розрядного струму прискорювача. Для компресійного потоку, що генерується газорозрядним МПП КГ, $\eta_N(t)$ на стадії стабільного розряду (починаючи з ~ 30 мкс) практично не змінюється. Такий процес називають квазістаціонарним.

Запропоновано новий квазістаціонарний сильноточковий плазмовий прискорювач (КСПП), що дозволив підвищити параметри плазми [31-36]. Пристрій обладнано двоступеневою плазмодинамічною системою з магнітним екрануванням елементів каналу, в якому прискорюються частини. Забезпечено роботу в режимі іонного струмоперенесення з іонно-дрейфовим прискоренням плазми. Конструкція КСПП має просторовий поділ зон іонізації та прискорення, магнітне екранування твердотільних елементів електродів. Встановлені анодний і катодний трансформери. Блок-схему КСПП показано на рис. 1.2. КСПП (тип П-50М) має вакуумну камеру з розмірами 2,0 х 0,4 х 0,4м, системи вакуумну та подачі робочого газу, двоступінчастий розрядний пристрій, систему енергоживлення, а також комплекс апаратури управління та діагностики. Енергоживлення розрядного пристрою КСПП здійснюють від ємнісних накопичувачів. Основна батарея складається з 80 конденсаторів ІМ 5-150 з робочою напругою до 5 кВ та загальною енергією до 150 кДж. Вона поділена на 8 секцій по 10 конденсаторів у кожній. Усі секції батареї заряджаються від одного джерела живлення [31-36].

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

АІК – анодні іонізаційні камери, ВІБ – вхідний іонізаційний блок; Т_а – анодний трансформер, Т_к – катодний трансформер

Рисунок 1.2 – Блок-схема КСПП

Швидкість плазми компресійного потоку становить 70...200 км/с залежно від режимів роботи КСПП [33]. Забезпечують формування за допомогою катодного трансформера стійкого компресійного плазмового потоку діаметром 3...5 см та довжиною ~ 40 см. Існування потоку - ~ 200 мкс. Загальна тривалість розряду ~ 400 мкс. На виході з розрядного пристрою П-50М плазмовий потік формується з кутом напіврозкриття струменя ~ 40 °. Температура плазми, визначена за результатами експериментів з набігання надзвукового компресійного потоку на тонкий клин з гострою передньою кромкою, становить ~ 10...15 еВ [37]. Максимальні значення концентрації електронів плазми Ne досягали на осі прискорювача в області максимального стиснення плазмового потоку і дорівнює $\sim (4...7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, залежно від режимів роботи КСПП [38]. Вказані пристрої за параметрами плазмових потоків перевершують всі інші існуючі на сьогоднішній день плазмодинамічні системи.

Вперше отримано стиснені ерозійні плазмові потоки (СЕПП) заданого складу. Критерієм наукової розробки визначено матеріал внутрішнього

					<i>ЗВ-З21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електрода. Тауі поьокт створено для роботи у середовищі повітря за атмосферного тиску. Використано спеціальний ерозійний пристрій (СЕПП) [39, 40]. Вказаний пристрій стійко генерує СЕПП також і в умовах вакууму. Схема торцевого ерозійного пристрою, що генерує стиснені плазмові потоки заданого складу, показано на рис. 1.3.

1 – корпус-ізолятор; 2 – внутрішній електрод; 3 – стрижні зовнішнього електроду; 4 – ізолюючий виступ

Рисунок 1.3 – Схема розрядного пристрою торцевого ерозійного прискорювача

На корпусі-ізоляторі (1), виготовленому з оргскла, розміщено внутрішній електрод (2) діаметром 10 мм і зовнішній електрод. Останній містить чотири стрижні (3) діаметром по 10 мм кожен, симетрично розташованих по колу діаметром 40 мм. Торцові поверхні електродних стрижнів і корпуси-ізолятори розміщені в одній площині. Для перешкоджання електричному пробю між внутрішнім та зовнішнім електродами на неробочій поверхні ізолятора корпусу 1 виконано ізолюючий виступ 4.

Накопичувач енергії складається з 8 конденсаторів М 5-150. Сумарна енергі становить 15 кДж. Кожна секція батареї з'єднується з розрядним пристроєм коаксіальними кабелями РК-50-11-13 через ігнітронні розрядники ІРТ-6.

Розподіл струму за зовнішнім електродом торцевого ерозійного пристрою зроблено принципово неоднорідним, навіщо сам електрод

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконаний секціонованим. Накопичувач енергії секційний. Кожна секція конденсаторної батареї з'єднана з внутрішнім електродом та одним із стрижнів (секцій) зовнішнього електрода. Тобто, у формуванні плазмового потоку з внутрішнього електрода бере участь вся батарея. У формуванні плазмового струменя з кожного зі стрижнів зовнішнього електрода бере участь лише одна секція батареї. За такої конфігурації розрядної системи на робочих торцях 4-х стрижнів зовнішнього електрода формуються струмопереносні плазмові потоки, а з торця внутрішнього електрода утворюється основний плазманий ерозійний потік. У такій системі значення розрядного струму, що проходить через основний потік, дорівнює абсолютної величиною сумі значень струмів, які протікають на зовнішніх плазмових потоках.

Формування плазми в торцевому ерозійному пристрої становить 25...30 мкс від початку струму розряду. До цього моменту часу на торці внутрішнього електрода спостерігали стійкий основний стиснений плазманий потік. Слід зауважити, що на торцях стрижня зовнішнього електрода плазмові струмені відхиляються від центрального потоку.

Струми в компресійному потоці і плазмових струменях, що виникають на стрижнях зовнішнього електрода, спрямовані у протилежних напрямках, то електродинамічна взаємодія між ними призводить до відштовхування цих струменів від основного потоку. Внаслідок чого продукти ерозії стрижнів зовнішнього електрода не потрапляють в стиснений плазманий потік.

Діаметр основного плазмового потоку в залежності від режиму роботи ерозійного прискорювача становить 10...30 мм, а його довжина – 120...160 мм. Розрядний пристрій стабільно генерує СЕПП у діапазоні тисків залишкового газу (повітря) у вакуумній камері – від $1,3 \cdot 10^{-1}$ до 10^3 Па при зміні початкової напруги U_0 накопичувача енергії від 2 до 5 кВ. Температура та концентрація електронів плазми (матеріал плазмоутворюючого електрода -

					<i>ЗВ-З21м.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- мідь) становлять відповідно 2...4 eВ і $(3...7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ залежно від режимів роботи прискорювача.

1.3 Взаємодія плазмових потоків із поверхнею твердого тіла

Взаємодія надзвукового компресійного плазмового потоку та твердої поверхні виробу призводить до утворення складних ударно-хвильових структур. Модифікування матеріалів зумовлює виникнення дислокаційних структур та призводить до екранування поверхні, що обробляється. Дослідженнями встановлено, що при дії надзвукового компресійного потоку на поверхні виробу формується прошарок [21-23, 41-43].

Рисунок 1.4 – Кінокадр компресійного ерозійного плазмового потоку

Вказаний прошарок існує протягом усього часу тривалості розряду, екрануючи поверхню від падаючого плазмового потоку. В даному випадку енергія, яка передається матеріалу не зростає, стабілізуючись на деякому високому рівні. Такий рівень підтримується внаслідок термалізації в цій зоні кінетичної енергії потоку, що набігає. Саме високі енергетичні параметри плазми забезпечують високошвидкісне нагрівання поверхні до температури, яка перевищує температуру плавлення практично будь-якого матеріалу.

Встановлено (рис. 1.5), що значення поглиненої мішенню енергії при збільшенні відстані від зрізу катода з 80 до 120 мм зменшується на 20 ... 30%.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Забезпечення розплавлення зумовлено наступним. Внаслідок відносно малої тривалості дії, що становить сотні мікросекунд, енергія з поверхні не встигає відводитися в глиб матеріалу та концентрується у тонкому поверхневому шарі. Виникає зона розплаву. Значні градієнти температур та тисків у поверхневому шарі викликають аномально швидку дифузію атомів та іонів плазмового потоку вглиб модифікованого шару. Забезпечується еволюція кристалічної структури.

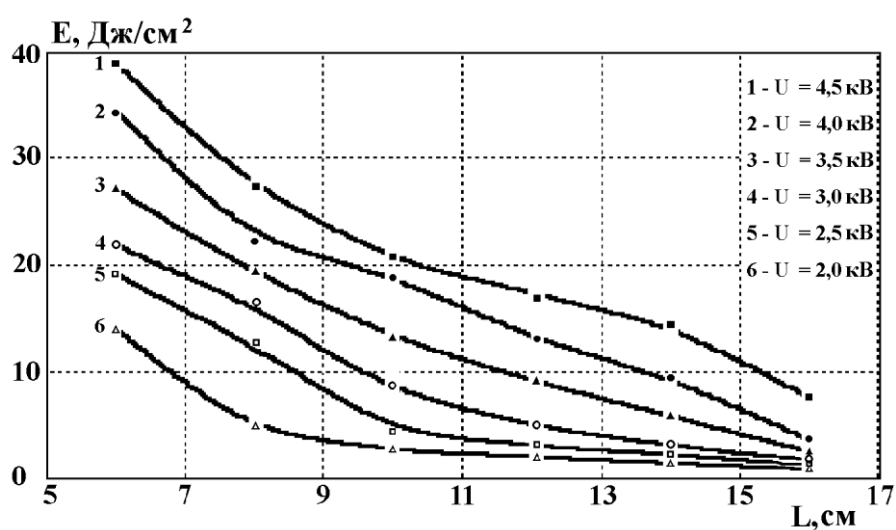


Рисунок 1.5 – Залежність щільності енергії, що поглинається поверхнею виробу, від віддалі до срізу сопла прискорювача при різних напругах накопичувача енергії

Вимірювання тиску плазмового потоку на поверхні виробу за допомогою спеціального компактного оптичного датчика з високою вібростійкістю показали, що максимальний тиск компресійного плазмового потоку на поверхню плоского зразка, залежно від режимів роботи МПП та його віддалення від мішені, змінювалися від 1 до 3 МПа, що може призводити до збурення поверхні розплавленого шару [45].

Геометричні параметри модифікованого шару, характер структурно-фазових перетворень у ньому, а також фізико-механічні характеристики

обробленої поверхні визначаються тривалістю дії та складом плазми. Процеси, що супроводжують дію високоенергетичних стиснених плазмових потоків на ціль, забезпечують ефективну модифікацію поверхонь різних матеріалів при використанні МПП та КСПУ, що детально описано в роботах [41-44].

1.4 Модифікування поверхні матеріалу високоенергетичними плазмовими потоками

Концентровані потоки енергії, зокрема плазми, знаходять широке застосування для отримання нових матеріалів шляхом модифікування. При використанні стиснених плазмових потоків (СПП), як і інших високоінтенсивних потоків енергії, можна виділити три області режимів обробки, що призводять до різних ефектів [46]:

- режим слабкої дії. Відбувається нагрівання поверхневого шару матеріалу до температури нижче за точку плавлення. При обробці високоенергетичними іонними пучками модифікування матеріалу забезпечують за рахунок імплантації іонів;

- режим середньої дії. Забезпечується плавлення поверхневого шару та наступне швидке охолодження та кристалізація металу. Модифікація поверхневого шару зумовлена процесами, що характерні для швидкого гартування розплаву;

- режим сильної дії, коли температура нагрівання може досягати точки кипіння металу. Механічні ударні хвилі проникають глибоко у тверде тіло. Характерною особливістю процесу є створення високо дефектної структури.

Перевагами СПП є:

- відносно висока тривалість існування імпульсу плазми (~100 мкс), достатня для завершення фізико-хімічних процесів;

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- можливість легування поверхні матеріалу плазмоутворюючою речовиною. Суттєві результати отримано при використанні режимів середньої дії. Діапазон густини енергії, яка поглинається поверхнею твердого тіла, становить 5...20 Дж/см².

У роботах застосовували СПП [46-49]. Для обробки сталі Ст.3 без покриття та з титановим покриттям використано газорозрядний магнітоплазмовий прискорювач з квазістаціонарним плазмовим прискорювачем [46]. Доведена ефективність обробки сталей 40, В8А, Р18, Р6М5 без покриття [47], сталі Ст.3 з покриттям цирконієм [48], сталі Р18 при комбінованій плазмовій та термічній обробці [49]. Плазмову обробку сталі Ст.3 з покриттям титану проводили в газорозрядному МПП компактної геометрії в режимі „залишкового газу” з попереднім вакуумуванням робочої камери з наступним заповненням азотом до тиску 400 Па [46]. Щільність енергії в умовах експериментів була 13 Дж/см², тривалість розряду плазмового потоку – 100 мкс, швидкість плазми (5...6) · 1,06 м/с, концентрація електронів плазми – (4...7) 10¹⁷ см⁻³, параметри плазми: 1,5 МПа та 2...3 еВ. Титанове покриття наносили методом вакуумно-дугового напилення на установці ВУ-2МБС за технологією КІБ (конденсація з іонним бомбардуванням) у дві стадії. Перша стадія - поверхню зразків у вакуумній камері (10⁻³ Па) оброблялася потоком плазми титану для іонної очистки при силі струму на титановий катод 100 А, потенціал зразка ~1 кВ, тривалість обробки - 60 с. На другій стадії проводили формування шару з титанової плазми при силі струму на 100 А титановий катод, потенціалі зразка ~120 В, часу напилення - 3, 5 і 10 хвилин. Товщина покриття дорівнювала 0,4, 0,7 та 1,0 мкм відповідно.

Обробка СПП на вибраних режимах зумовлює розплавлення поверхневого шару виробу. На поверхні зразка помітно хаотично розташовані хвилі, що характерні для процесу швидкої кристалізації розплаву. Матеріал поверхневого шару має комірчасту структуру. При

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

товщині покриття титану 1,0 мкм товщина розплавленого шару досягала 15...18 мкм і була на 2...3 мкм більше, ніж без покриття. Доведено, що обробка поверхні сталі з покриттям титану дозволяє формувати додаткові фази і створювати глибокі модифіковані поверхневі шари.

Аналогічне дослідження проведено при нанесенні на сталь покриття цирконію завтовшки 2-3 мкм у роботі [48]. Технологія обробки зразків була такою самою як у роботі [46], але щільність енергії змінювали від 13 до 40 Дж/см², число імпульсів дорівнювало 1 і 5. Встановлено, що товщина розплавленого і перемішаного шару металу більше 10 мкм; збільшення кількості імпульсів та щільності енергії призводять до зростання товщини модифікованого шару. Обробка СПП є ефективним методом легування матеріалів шляхом перемішування розплаву в системі покриття-основа. Зазначено, що навіть при повному перемішуванні розподіл елементів нерівномірний. Елементний та фазовий склад поверхневого шару можна змінювати у широкому діапазоні шляхом варіації параметрів режиму та товщини покриття.

Авторами робіт отримали аналогічні результати [50, 51]. Доведена перспектива застосування концентрованих пучків енергії для активації поверхонь деталей та інтенсифікації процесів їхньої об'ємної взаємодії при зварюванні у твердому стані. Обробка перед зварюванням СПП призводить до виникнення нерівноважного стану матеріалу на поверхні виробу. Виявлено наявність дефектів у місцях виходу дислокацій та формування субмікрокристалічної структури модифікованого шару. Доведена ефективність легування поверхні з метою утворення при зварці під тиском тонкого шару сплаву, який розплавляючись при температурі, нижчій від точки плавлення основного металу, відіграє роль припою [51]. Товщина такого шару визначається товщиною покриття та режимами модифікування.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, аналіз літератури показує, що дослідження легування поверхні металів з використанням високоенергетичних потоків плазми є актуальними та мають як теоретичне, так і практичне значення.

Мета роботи: Встановлення закономірностей утворення структури, властивостей жароміцного сплаву ЧС88У при легуванні поверхонь з'єднання висококонцентрованими потоками плазми та при отриманні зварних з'єднань за технологією дифузійного зварювання.

Задачі досліджень:

1. Визначити вплив умов та режимів легування висококонцентрованими потоками плазми на формування структури та властивості поверхневого шару металу зі сплаву ЧС88У.

2. Визначити вплив легованих поверхонь на формування та структуру з'єднань отриманих ДЗ.

3. Розробити технологічні рекомендації щодо отримання дифузійнозварних з'єднань з легованими висококонцентрованими потоками плазми поверхнями.

Предмет досліджень: Процеси, що протікають при легуванні поверхонь жароміцних нікеливих сплавів висококонцентрованими потоками плазми та при їх з'єднанні дифузійним зварюванням.

Об'єкт досліджень: Структура та властивості легованих шарів жароміцних сплавів на основі нікелю та з'єднань отриманих при ДЗ.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Використання методу обробки металів високоенергетичними плазмовими потоками дозволяє проводити модифікування та легування поверхонь виробів та вирішувати завдання зміни топографії, структури, хімічного та фазового складу, які є основними факторами формування з'єднання при зварюванні матеріалів у твердому стані, насамперед, при дифузійному зварюванні та зварювання під тиском котрим ці технології є практично єдино можливими.

2. Рівень розвитку теоретичних основ, обладнання та створення технологій обробки матеріалів високоенергетичними плазмовими потоками дозволяє їх використання у виробництві.

3. Найбільш перспективними для генерування стиснених плазмових потоків є магніто-плазмові прискорювачі компактної геометрії та квазістаціонарні високоточні плазмові прискорювачі. Перевагами стиснених плазмових потоків є відносно велика тривалість існування імпульсу плазми, можливість легування поверхні матеріалів плазмоутворюючою речовиною та створення захисної атмосфери.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Досліджені матеріали та використане обладнання

Для досліджень застосовували жароміцні нікелеві дисперсійнозміцнювальні сплави. Хімічний склад наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад досліджуваних матеріалів

Марка матеріалу	Склад елементів, мас. %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Al	Nb
ЧС88 В-ВИ	0,06	≤0,5	≤0,5	15,9	57,0	4,6	3,05	0,2
Inconel 718	0,05	0,35	0,35	17,8	53	0,9	0,2-0,8	5,0-5,5
	Mo	Co	B	Cu	Fe	W	інші елементи	
ЧС88 В-ВИ	1,9	11,0	0,08	–	0,5	5,3	0,05Zr, 0,03Y, 0,5Hf, 0,015Ce	
Inconel 718	2,8-3,3	≤1,0	≤0,006	≤0,3	17,6-18,2	-	Та разом з Nb	

Дифузійне зварювання у вакуумі виконували на установках УДСВ-ДТ, ВВУ-КПІ, та у вакуумній печі СНО-1.3,1/20ІІ. При модернізації установки УДСВ-ДТ встановлено систему автоматичної підтримки заданої температури, а також високоточні датчики переміщень та навантаження типу ЛІР-14.00ПС11 та RTN С3/1t відповідно із записом даних на комп'ютер. Точність вимірювання переміщення становила $1 \pm 0,2$ мкм, навантаження 0,1 Н. Установка УДСВ-ДТ має два механізми навантаження: важільний для забезпечення постійного навантаження та гідравлічний. Установку ВВУ-КПІ доповнено системою запуску активних газів. В установках застосовується нагрів струмами високої частоти з потужністю 60 кВт.

Установка УДСВ-ДТ має робочий вакуум 10^{-2} Па. Зовнішній вигляд установок УДСВ-ДП та ВВУ-КПІ після модернізації показано на рис. 2.1 та 2.2.

При ДС зразків та деталей температуру вимірювали хромель-алюмелевими термопарами з точністю $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Задана температура зварювання підтримували електронним регулятором з точністю $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

2 3

1

1 – вакуумна камера; 2 – датчик переміщень; 3 – датчик навантаження

Рисунок 2.1 – Робочая камера установки УДСВ-ДТ після модернізації

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.2 – Робоча камера установки ВБУ-КП після модернізації

Технологічний комплекс ВБУ-КП є універсальним і дозволяє виконувати дифузійне зварювання та іонно-плазмове напилення металів, для чого має спеціальний плазмотрон, а також підведення для різних джерел нагріву – високочастотного, радіаційного та електророзрядного. Робоча камера має систему нагріву в період дегазації та охолодження в період зварювання. Модифікування та легування матеріалів шляхом обробки СПП проводили з використанням МПП КГ з варіацією параметрів обробки.

2.2 Дослідження будови та властивостей матеріалумодифікованого шару та зварних з'єднань

У роботі проводили дослідження мікроструктури металу з поверхні та в зоні легування, фазового складу, мікротвердості. Використано оптичну металографію, растрову електронну і мікроскопію, що просвічує, рентгеноструктурний фазовий аналіз. Дослідження хімічного складу проводили методом локального рентгеноспектрального мікроаналізу. Для рентгеноструктурного фазового аналізу використовували установку ДРОН

УМ1. Дослідження фазового складу та вимірювання параметрів кристалічної решітки проводили при монохроматичному CuK α -випромінюванні.

Мікроструктуру металу досліджували після хімічного, іонного чи електролітичного травлення. Хімічне травлення заліза проводили в 4% розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Структуру жароміцних сплавів виявляли шляхом хімічного травлення у розчині Васильєва або електролітичного травлення у розчині хромового ангідриду у воді або ортофосфорній кислоті. Аналіз мікроструктури проводили на оптичних мікроскопах Neophot 21 та Versamet 2 при збільшеннях $\times 100 \dots 500$, а також на растровому електронному мікроскопі РЕММА-102-02 при збільшеннях до $\times 15\,000$.

Дослідження тонкої структури металу проводили методами мікродифракційної електронної мікроскопії на установці JEM-200 CX (фірма JEOL, Японія) при напрузі, що прискорює 160, 200 kV.

Об'єкти для дослідження тонкої структури готували в наступній послідовності:

- різання металу (з відповідних зон) до товщини 0,4 мм в установці для електроерозійного різання;

- тонке механічне шліфування вирізаних пластин до товщини 0,08...0,1 мм (80...100 мкм) з метою очищення та зняття поверхневих шарів, що змінилися в ході електроерозійного різання.

З метою збереження структури самої поверхні, зумовленої зовнішньою обробкою (оплавленням, шліфуванням), досліджувану поверхню перед наступними операціями заздалегідь препарували (різанням, шліфуванням, електролітичним та остаточним іонним утоненням) захищали спеціальним захисним лаком (розчином полістиролу в толуолі).

Вирізку шайб діаметром 3 мм та товщиною 80...100 мкм проводили спеціальними пуансонами методом електроерозійного різання.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Подальші операції з препарування шайб з метою отримання тонкої фольги для дослідження на просвічування проводили в наступній послідовності: електролітичне полірування в оцтово-хромовому реактиві до появи отвору в шайбах і подальше багаторазове потонання іонізованими пучками аргону в спеціальній установці іонного утонення досліджень в електронному мікроскопі, що просвічує.

Мікротвердість Н_μ (МПа) металу визначали на мікротвердомірах фірми «Леко» при навантаженні 10...50 г та на ПМТ-3.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ, МОДИФІКОВАНИХ ЛЕГУЮЧИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОТОКІВ

3.1. Дослідження характеристик матеріалів поверхневих шарів з використанням металографії та рентгеноструктурного аналізу

Дослідження поверхневих шарів, легованих цирконієм із застосуванням високоенергетичних плазмових потоків (ВПП), які у літературі ще називають стисненими плазмовими потоками (СПП), проводили на виготовлених зразках. Це була серія зразків, опрацьованих СПП на різних режимах. До обробки СПП зразки напилювали цирконієм методом КІБ. Товщина напиленого шару становила 1,0...2,0 мкм. Обробку СПП проводили у середовищі водню при щільності енергії в пучка 13; 15; 18 і 21 Дж/см², напрузі на накопичувальній конденсаторній батареї 2,5 і 3,0 кВ на відстані між виробом та катодом 140; 120; 100 та 80 мм відповідно. Тиск водню в камері дорівнював $4 \cdot 10^2$ Па.

Обробку поверхні сплаву ЧС88У проводили при кількості 3 імпульсів і напрузі 3,0 кВ, 3 імп. за 3,0 кВ + 1 імп. при 2,5 кВ, 3 імп. при 3,0 кВ + 2 імп. при 2,5 кВ для зразків серії "Н"; 3 імпульси для серії 802-814; 5,6 та 7 імпульсів для серій «Z» та «S».

Дослідженнями на оптичному мікроскопі поверхонь сплаву ЧС88У встановлено, що при обробці СПП з напругою 3,0 кВ і 3 імпульсу поверхня має мережу тріщин. Деякі їх видно візуально. Обробка СПП при напрузі 3,0 кВ + 1 або 2 імпульси при напрузі 2,5 кВ акумулятора сприяє лікуванню тріщин. Наприклад, на рис. 3.1 чітко видно сліди тріщин, які частково заплавлені.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.1 – Тріщини та їх сліди після додаткового імпульсу СПП при напрузі 2,5 кВ

Спектр та хімічний склад поверхні з наплавленим шаром цирконію до обробки сплаву ЧС88У плазмовим потоком показано на рис. 3.2, а після обробки СПП при щільності енергії 21 Дж/см² – на рис. 3.3.

Аналогічно досліджено всі модифіковані зразки. Їх спектральний аналіз показав, що у легованому шарі концентрація цирконію перебуває у межах 9,0...13,55 % (мас.). При локальному рентгеноспектральному аналізі виявлено мікроділянки, в яких вміст цирконію дорівнює 26 і 252 мас. В одному із зразків знайдено ділянку з концентрацією 51,0 % цирконію.

Встановлено, що концентрація цирконію в поверхневому шарі зменшується зі збільшенням щільності енергії та кількості імпульсів, що, ймовірно, пов'язано з більш глибоким та рівномірним проплавленням основного металу.

Рентгеноструктурний аналіз показав наявність у легованому шарі інтерметалідів Ni₅Zr та Ni₇Zr₂, хоча ні локальний рентгеноспектральний, ні мікроструктурний аналізи їх не виявили, що свідчить про високу дисперсність інтерметалідів.

а

Сумма %: 100.00		
Элемент	Инт.	С %
Ti K	1	0.00
Cr K	143	0.33
Co K	91	0.17
Ni K	401	0.73
W L	-35	0.00
Zr L	59011	97.52
Mo L	297	1.24
Al K	-308	0.00
Si K	-3292	0.00

б

Рисунок 3.2 – Спектр (б) та хімічний склад (в) поверхні з напиленим шаром цирконію ($\delta = 2$ мкм) до обробки СПП сплаву ЧС 88У-ВІ

При легуванні у матерілі поверхневого шару виявлено високий вміст кисню, який свідчить про наявність у ньому оксидів, ймовірно, цирконію, який має найвищу структурну організацію по можливості взаємодії з киснем з усіх присутніх елементів у шарі. Перебуваючи у вигляді оксиду, цирконій в залежності від співвідношення розмірів оксиду та діаметра електронного променя мікроаналізатора даватиме різну концентрацію в сплаві. Наявність кисню в шарі свідчить, що необхідно підвищувати чистоту робочого середовища при напиленні цирконію і при обробці СПП.

a

б

Сумма %: 100.00		
Элемент	Инт.	С %
Ti K	3535	4.97
Cr K	9564	14.92
Co K	3541	9.49
Ni K	17427	56.25
W L	-195	0.00
Zr L	6989	11.52
Mo L	790	1.23
Al K	1289	1.62
Si K	-855	0.00

в

Рисунок 3.3 – Морфологія (а), спектр (б) та хімічний склад легованої цирконієм поверхні після обробки СПП сплаву ЧС 88У-ВІ при щільності енергії 21 Дж/см²

При легуванні у матерілі поверхневого шару виявлено високий вміст кисню, який свідчить про наявність у ньому оксидів, ймовірно,

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цирконію, який має найвищу структурну організацію по можливості взаємодії з киснем з усіх присутніх елементів у шарі. Перебуваючи у вигляді оксиду, цирконій в залежності від співвідношення розмірів оксиду та діаметра електронного променя мікроаналізатора даватиме різну концентрацію в сплаві. Наявність кисню в шарі свідчить, що необхідно підвищувати чистоту робочого середовища при напиленні цирконію і при обробці СПП.

Важливе значення має структура та склад легованого шару залежно від глибини (рис. 3.4., табл. 3.1 та рис. 3.5). Дослідження проведено на косому шліфі при куті 45 °. Товщина напиленого шару цирконію становила 2,0 мкм. Обробку СПП зразка (806) проводили за щільності енергії 21 Дж/см².

Результати досліджень показують, що товщина легованого шару по діаметру зразка неодинакова (5...6) мкм і характер розподілу цирконію по глибині шару також різниться. Ще складніший характер розподілу цирконію та інших елементів отримано під час обробки СПП із щільністю енергії 18 Дж/см² (зразок 808). Криві розподіли цирконію показано на рис. 3.4. та 3.5. Аналіз проводили також з поверхні, де концентрація цирконію дещо вища.

					ЗВ-321мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

a x600

б x1550

в x3100

г

Рисунок 3.4. - Зміна хімічного складу металу (% мас.). по глибині приповерхневого шару зразка 806

Табл. 3.1 - Зміна хімічного складу металу (% мас.). по глибині приповерхневого шару зразка 806

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ni	50,82	52,35	52,9	54,14	54,32	56,91	57,12	57,04	57,57
Co	8,42	9,56	9,51	9,91	9,94	10,78	10,77	10,07	10,74
Cr	15,52	15,69	15,34	15,68	15,36	15,68	15,61	16,97	16,28
Ti	3,1	3,4	3,15	3,53	5,9	5,11	5,07	4,54	4,89
Mo	0,08	1,94	2,61	2,19	2,15	2,06	2,32	2,1	2,05
W	831	5,89	5,53	5,9	5,71	5,66	5,76	5,48	5,24
Al	2,36	2,43	2,97	3,57	3,66	3,45	3,35	3,8	3,23
Zr	11,34	9,11	7,9	5,07	2,96	0,35	—	—	—
	1мкм	2 мкм	3мкм	4мкм	5мкм	6мкм	7мкм	8 мкм	9мкм

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

a x1550

б x3100

в

г
Рисунок 3.5. - Хімічний склад (*в*) і розподіл цирконія в залежності від віддалі до поверхні (*г*)

Встановлено, що поверхня модифікованого шару зразка 808 є неоднорідним як по радіусу, так і по глибині. Неоднорідність підвищується при

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшенні щільності енергії в пучку та при зменшенні кількості імпульсів. Для покращення властивосте нанесених шарів при легуванні доцільно вибирати режими обробки СПП із збільшенням кількості імпульсів. При цьому не тільки підвищується однорідність шару, але і його тріщиностійкість. Доведено, що при цьому необхідно зменшувати густину енергії в пучку. При зменшенні густини енергії до 15...13 Дж/см² формується рівна, гладка поверхня, наприклад, у зразках серії «800». Результати дослідження структури та складу металу зразка 808 представлені на рис. 3.6 – 3.10.

Мікроструктура поверхні легованого шару зразка 808 є високодисперсною і характеризується розміром зерна 5...20 мкм із мікротвердістю 3860...6130 МПа (рис. 3.6). Вміст цирконію змінюється від 3,6 % до 19,1 %, у середньому 4,0...12,0 % проте у центрі виявлено мікроділянки із вмістом цирконію 62,0...95,0 % мас., що може бути зумовлено як наявністю інтерметалідів з боку цирконію на діаграмі стану Ni-Zr, і порушенням процесу обробки СПП. Концентрація цирконію більше 90% виявлено тільки одному зразку, хоча спектральному аналізу піддавалися поверхні всіх зразків.

Вміст цирконію 11,5...13,5% мас. відповідає евтектичній концентрації на діаграмі Ni-Zr з незначними відхиленнями. На мікроструктурі поверхні легованого шару помітні значні ділянки високодисперсної евтектики (рис. 3.6, 3.7). Саме такий вміст цирконію мають припої, отримані на основі жароміцного нікелевого сплаву ЧС70, що виготовляють у вигляді порошку [58,59].

Характер розподілу цирконію за глибиною як і сама глибина легованого шару в центрі та на периферії зразка 808 суттєво відрізняються (рис. 4.8 – 4.10). На периферії (рис. 4.8) глибина шару становить близько 3 мкм, у центрі – 6 мкм. У більшості поверхні модифікований шар має 6...7 мкм. Характерною особливістю легованого шару є наявність у ньому світлої та темної смуг на мікроструктурі. У світлій смузі вміст цирконію становить понад 4...6 % мас., у темній – нижче 4 % (рис. 3.8, а - 3.10, а). Між смугами концентрація цирконію змінюється стрибкоподібно. У центрі зразка на поверхні шару концентрація

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цирконію досягає 15,7...19,1 мас %.

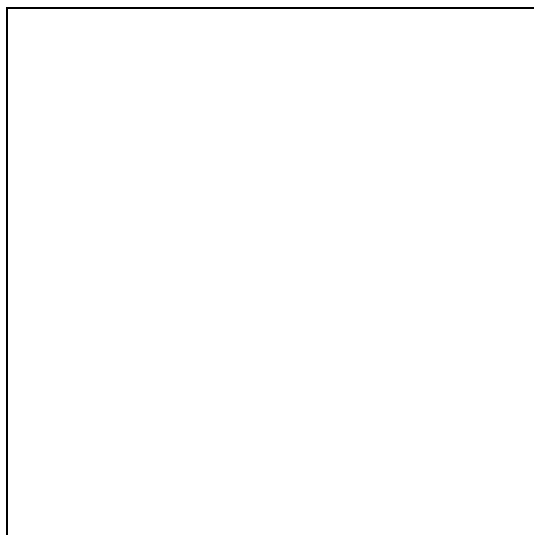
a

б

в

Рисунок 3.6 – Мікроструктура поверхні легованого шару зразка 806 з мікротвердістю металу на характерних ділянках

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



a

x600

б

x1200

в

Рисунок 3.7 – Мікроструктура поверхні легованого шару зразка 808 та його хімічний склад на характерних ділянках

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

a x2020

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ni	46,4	47,2	47,0	49,7	50,1	49,4	49,4	51,9	54,1	52,0	50,5	50,8
Zr	5,2	4,4	4,0	3,4	2,3	1,8	1,5	1,0	0,7	0,47	0,3	-
Cr	16,2	16,04	16,5	15,4	15,5	15,6	15,5	15,8	13,8	16,0	11,2	16,2
Al	5,9	6,2	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	4,7	7,1	6,3	5,7	5,2
Co	9,2	11,0	11,8	10,6	11,5	11,4	11,3	11,3	10,9	11,3	11,6	12,2
Ti	3,4	3,2	3,2	3,5	3,4	3,4	2,8	3,7	4,7	3,5	3,0	3,0
W	10,6	8,9	8,3	8,9	9,0	10,0	10,7	9,7	6,1	7,4	10,7	10,0
Mo	3,1	3,0	3,2	2,6	2,27	2,5	2,9	1,8	2,4	2,9	2,0	2,8
	край	1мкм	2мкм	3мкм	4мкм	5мкм	6мкм	7мкм	8мкм	9мкм	10мкм	11мкм

б

в

Рисунок 3.8 – Мікроструктура (*a*), зміна хімічного складу (*б*) и розподіл цирконію (*в*) в залежності від глибини до поверхні легованого шару на периферії зразка 808

Розподіл хімічних елементів по глибині зразків (дослідження косих шліфів) показали, що дифузія цирконію відбувається на глибину до 10

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мкм. Мікротвердість сплаву ЧС88У після обробки СПП змінюється на глибину до 50 мкм.

a x2020

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ni	46,5	46,1	47,7	52,3	53,09	56,6	54,4	53,6	54,0	53,5	53,9
Zr	8,3	6,5	6,0	1,2	0,5	0,37	0,4	0,6	0,5	0,4	-
Cr	14,8	15,4	15,2	15,4	15,13	12,8	15,5	14,7	15,7	16,6	16,3
Al	5,8	5,6	5,5	6,6	6,8	5,8	6,0	6,8	5,3	4,7	5,3
Co	10,15	10,7	10,4	10,0	10,7	10,4	10,3	10,2	11,25	11,7	11,1
Ti	3,3	3,7	3,9	4,3	4,8	6,9	4,4	5,0	4,2	3,7	4,1
W	8,97	9,2	9,5	7,7	7,1	4,5	6,4	6,6	5,7	6,3	6,0
Mo	2,14	2,8	1,8	2,45	2,0	2,6	2,5	2,4	3,3	2,9	3,1
	край	1мкм	2мкм	3мкм	4мкм	5мкм	6мкм	7мкм	8мкм	9мкм	10мкм

б

в

Рисунок 3.9 – Мікроструктура (*a*), зміна хімічного складу (*б*) і розподіл цирконію (*в*) в залежності від глибини легованого шару в центрі шару 806

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

a x2020

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ni	46,4	47,2	47,0	49,7	50,1	49,4	49,4	51,9	54,1	52,0	50,5	50,8
Zr	5,2	4,4	4,0	3,4	2,3	1,8	1,5	1,0	0,7	0,47	0,3	-
Cr	16,2	16,04	16,5	15,4	15,5	15,6	15,5	15,8	13,8	16,0	11,2	16,2
Al	5,9	6,2	5,9	6,0	6,0	6,0	6,0	4,7	7,1	6,3	5,7	5,2
Co	9,2	11,0	11,8	10,6	11,5	11,4	11,3	11,3	10,9	11,3	11,6	12,2
Ti	3,4	3,2	3,2	3,5	3,4	3,4	2,8	3,7	4,7	3,5	3,0	3,0
W	10,6	8,9	8,3	8,9	9,0	10,0	10,7	9,7	6,1	7,4	10,7	10,0
Mo	3,1	3,0	3,2	2,6	2,27	2,5	2,9	1,8	2,4	2,9	2,0	2,8
	край	1мкм	2мкм	3мкм	4мкм	5мкм	6мкм	7мкм	8мкм	9мкм	10мкм	11мкм

б

в

Рисунок 3.10 – Мікроструктура (*a*), зміна хімічного складу (*б*) і розподіл цирконію (*в*) в залежності від глибини легованого шару в центрі шару 808

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Дослідження легування матеріалу поверхневого шару жароміцних нікелевих сплавів цирконієм

Використано процес дифузійного зварювання з проміжним прошарком, що розплавляється. При нагріванні та розплавленні прошарку до деталей прикладають невеликі зусилля стиснення, що сприяє витіснення розплаву за стик. Рідкий прошарок забезпечує активацію поверхонь, що з'єднуються і потім видаляється зі стику. За механічними властивостями матеріал зварного шва істотно поступається основному металу Товщина прошарку, що залишився, настільки мала, що вже протягом декількох хвилин витримки при температурі розплавлення прошарку хімічний склад металу в зоні стику за рахунок дифузійних процесів стає близьким до складу основного металу. На відміну від дифузійної пайки, в даному процесі параметри режиму ті ж, що при зварюванні дифузійним методом Відміна полягає у забезпеченні низького рівня напруг стиснення.

Доведено, що найбільш перспективними припоями є припої, в яких зниження температури плавлення жароміцного сплаву використовуються цирконій і гафній [57, 58]. Ці припої зазвичай використовують у вигляді порошків [59]. Порошки складно розміщувати в стику, особливо при зварюванні великих площ з'єднання. Нанесення припою на поверхні, або одну з них у вигляді матеріалу легovanого шару цирконієм або гафнієм із застосуванням високоенергетичних плазмових потоків значно полегшує процес з'єднання.

Встановлено, що у розроблених припоях концентрація цирконію 13,0 % мас. забезпечує евтектичну структуру у системі легований нікель-цирконій. При відхиленнях на кілька відсотків у більшу чи меншу сторону утворюється структура з евтектикою, але сплав має більший температурний інтервал плавлення.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідження процесу формування сполук виконували при зварюванні зразків серій 802 – 814, «S» та «Z». Зауважимо різницю між ними. В серіях «S» і «Z» у матеріалі легованого шару виявлено високий вміст кисню, чого не було в серії 802 – 804. Параметри з'єднання. Забезпечували температуру всіх зразків - 1200 ± 5 °C. Це вище за температуру плавлення евтектики. Час 10 хв., вакуум 10-2 Па, тиск 1 і 5 МПа. Усі зразки з'єднували з обома легованими поверхнями.

Мікроструктура сполук зразків Z11 + Z13 показано на рис. 3.11, а розподіл хімічних елементів у зоні стику – на рис. 3.12.

Аналіз структури та складу металу в зоні з'єднання показав, що при зварюванні зразків Z11+Z13 величина зерна біля лінії з'єднання становить $20 \times 30 \dots 40 \times 125 \dots 100 \times 190$ мкм з боку сплаву Z11, а з боку Z13 розмір зерна трохи менше і становить $20 \times 30 \dots 50 \times 100 \dots 60 \times 150$ мкм. Глибина активних процесів, що відбуваються вздовж поверхні розділу з боку Z11 $\square \sim 50 \dots 200$ мкм, а з боку Z13 $\square \sim 50 \dots 110$ мкм.

Вздовж лінії з'єднання спостерігали формування витягнутих уздовж межі розділу дисперсних центрів рекристалізації протяжної форми з розміром від 5×10 мкм до 15×30 мкм з боку Z11 і від 5×10 мкм до 10×25 мкм з боку Z13 (рис.3.11). Також, безпосередньо вздовж лінії з'єднання можна спостерігати формування особливого типу структур – смугу шириною $5 \dots 15$ мкм, що складається з ультрадисперсних порівняно рівноосних центрів рекристалізації (розміром $d_{з/рік} = 2,5 \dots 7,5$, і $h_{\square l} = 5 \square 10 \dots 10 \square 15$ мкм), тобто. у цьому зварному з'єднанні при оптичних дослідженнях можна спостерігати формування дуже тонкої гряди витягнутих уздовж межі розділу зародків рекристалізації. Об'ємна частка рекристалізованих зерен вздовж поверхні розділу становить $V_{рекp} \sim 49,1$ %. Спостерігали і формування (внаслідок протікання процесів рекристалізації) загальних зерен вздовж зони з'єднання за рахунок міграції та коалесценції. Об'ємна

частка такого типу загальних зерен становить ~13,9%, де міграція з боку Z11~2,3%, а Z13~3,1%; а з допомогою коалесценції ~8,5%.

Мікротвердість зварного з'єднання (при навантаженні 50 г) у лінії сплавлення в середньому становить з боку Z11 4120...4410 МПа з пониженням при віддаленні від межі розділу у напрямку основного металу до 3320...3360 МПа, з боку Z13 лінії сплавлення мікротвердість трохи вища порівняно з Z11 і становить 4120 ... 4540 МПа, а при віддаленні від межі розділу до основного металу також знижується, але тільки до 3580 МПа. Значення інтегральної мікротвердості представлені на рис. 3.13.

Були проведені також дослідження зміни концентрацій основних елементів у зварних швах. Інтегральний розподіл основних хімічних елементів представлений на рис. 3.12. На лінії сплавлення спостерігли знижений вміст Ni (32,8%), Co (6,5%), W (11,1%) та підвищений вміст Zr (5,7%) та Ti (20,7%). При віддаленні лінії сплавлення спостерігають підвищення Ni, Co, W, а концентрація Zr, Ti знижується. Слід зазначити, що розподіл Zr спостерігається на глибині до 60...100 мкм і нерівномірний. При більш детальному вивченні концентрації хімічних елементів було виявлено, що підвищений вміст Zr є не тільки на лінії сплавлення, а й на межах зерен у лінії запалювання як з боку Z11, так і Z13 (доходить до ~3 %). Також спостерігаються виділення з підвищеним вмістом Ti як на лінії сплавлення (14,9...26 %), так і на межі зерен. В обсязі зерен було виявлено виділення з підвищеним вмістом Ti до ~50%. Природа цих виділень не встановлено. На рис. 4.11 б стрілочками показана мікротвердість, а на рис. 4.11, у розміри виділень.

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.11 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву
ЧС88У (Z11 + Z13) після ДЗ

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.12 – Розподіл елементів у зоні з'єднання зразків Z11 + Z13

					<i>ЗВ-З21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.13 – Мікротвердість металу для зразків Z11 + Z13

Аналогічні структури отримані при дифузійному зварюванні зразків серії «S». Підвищений вміст кисню в легованому шарі та подальшому мікроструктурному дослідженні виявлено відшарування легового шару від жароміцного сплаву (зразки S14 + S18).

Мікроструктура, розподіл елементів та мікротвердості металу в зоні стику при з'єднанні сплаву ЧС88У з легуванням цирконієм обох поверхонь зразків 803 + 813 показано на рис. 3.14. - рис. 3.17.

Величина зерна біля лінії з'єднання становить $35 \times 50 \dots 70 \times 130 \dots 130 \times 285$ мкм з боку сплаву зразка 803, а з боку 813 розмір зерна трохи менше $20 \times 25 \dots 50 \times 110 \dots 100 \times 235$ мкм (рис. 3.14). Глибина активних процесів, що відбуваються вздовж поверхні розділу з боку 803 $\sim 100 \dots 450$ мкм, а з боку 813 $\sim 80 \dots 350$ мкм.

Безпосередньо вздовж лінії з'єднання спостерігали формування рекристалізованих зерен з розміром від 5×10 мкм до 10×15 мкм з боку 803 і 5×10 мкм до 10×15 мкм з боку 813.

Також спостерігали формування загальних зерен вздовж зони з'єднання (за рахунок міграції та коалесценції). Об'ємна частка такого типу

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загальних зерен становить ~11,2%, де міграція з боку 803~4,2%, з боку 813~3,2%, а за рахунок коалесценції ~3,8%.

Мікротвердість зварного з'єднання (при навантаженні 50 г) у лінії сплавлення в середньому складає з боку 803 3410 ... 3620 МПа з пониженням при віддаленні від межі розділу у напрямку основного металу до 2860 МПа; з боку 813 у лінії сплавлення мікротвердість трохи вище в порівнянні з 803 і становить 3580 ... 3810 МПа, а при віддаленні від межі розділу до основного металу також знижується до 2860 МПа. Значення інтегральної мікротвердості представлені на рис. 3.17.

Далі проводили дослідження концентраційних змін легуючих елементів у зварних з'єднаннях. Інтегральний розподіл основних хімічних елементів представлено на рис.3.16. На лінії сплавлення спостерігали знижений вміст Ni (41,1%), Co (9,6%) та підвищений вміст Zr (14,1%) та Ti (12,3%). При віддаленні лінії сплавлення спостерігається підвищення Ni, Co, а концентрації Zr, Ti знижуються. Слід зазначити, що нерівномірне розподілення Zr спостерігається на глибині до 100...400 мкм. Основний метал ЧС88У також містить цирконій.

При детальному вивченні концентрації хімічних елементів було виявлено, що підвищений вміст Zr спостерігали не тільки на лінії сплавлення, але і на межах зерен біля межі розділу як з боку 803, так і з боку 813 (доходить до ~7%). Це свідчить про проникнення евтектики за межі зерен (рис. 3.15). Також спостерігають утворення з підвищеним вмістом Ti як на лінії сплавлення (22...27 %), так і на межі зерен (7...18 %). Виявлено окремі фазові утворення з підвищеним вмістом Ti ~44...62 %. На рис. 3.15 характерні місця позначені стрілками.

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.14 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву
ЧС88У зразків 803 + 813 у зоні стику

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.15 – Мікроструктура та хімічний склад металу в зоні з'єднання сплаву ЧС88 зразків 803 + 813

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.16 – Розподіл хімічних елементів у зоні з’єднань зразків 803 + 813

					<i>ЗВ-З21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.17 – Розподіл мікротвердості металу в зоні стику при з'єднанні сплаву ЧС88У зразків 803 + 813

Зіставляючи результати дослідження з'єднань зразків різних серій з жароміцного сплаву ЧС88У з обома модифікованими поверхнями за допомогою СПП, слід зазначити, що у всіх випадках у зоні стику та на кордонах зерен спостерігали підвищений вміст цирконію та титану (цирконію до 6,0 % мас.) та знижений вміст нікелю, хрому, і кобальту. У жодному зварному з'єднанні тріщин не виявлено. Водночас у зразках із підвищеним вмістом кисню в модифікованому шарі (серія "Z") об'ємна частка загальних зерен на кордоні розділу зменшується у 2...3 рази, а об'ємна частка рекристалізованих зерен зменшується у 9,5 разів, порівнюючи зі зразками 803 + 813, у яких підвищеного вмісту кисню не виявлено.

На великій частині стику зразків 803 + 813 чітка межа між зразками за мікроструктурою не виявлена, на відміну від зразків Z11 + Z13. Таким чином, наявність кисню в легованому шарі на формування з'єднань впливає негативно. За достатнього очищення робочого газу встановлено, що застосування СПП для легування поверхонь жароміцного сплаву ЧС

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

88У-ВІ цирконієм забезпечує формування на поверхні шару, вміст у якому цирконію відповідає розробленим сучасним припоям, а також формуванням сполук із внутрішньокристалітними (спільні зерна) міжатомними зв'язками.

					ЗВ-З21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. При легуванні жароміцного нікелевого сплаву цирконієм у поверхневому шарі утворюються тріщини, а стійкість легованого шару проти тріщин підвищується зі збільшенням кількості імпульсів. Ефективним є режим обробки СПП за схемою застосування декількох основних імпульсів при більшій щільності енергії і додаткових при меншій щільності енергії, при яких тріщини, що виникли раніше, заплавляються.

2. Розподіл цирконію у легованому шарі сплаву ЧС88У є нерівномірним. Легований шар складається із двох смуг. У верхній світлій смузі концентрація вища, у нижній темній – нижче. Зміна концентрації між смугами відбувається стрибкоподібно.

3. Глибина легованого шару, рівномірність розподілу та концентрація цирконію в шарі визначаються параметрами режиму обробки та насамперед щільністю енергії у плазмовому потоці.

4. Встановлено, що обробка жароміцного сплаву ЧС88У СПП з попереднім нанесенням шару цирконію забезпечує отримання легованого шару з концентрацією цирконію на рівні його вмісту в сучасних припоях (9,0...13 мас.%), що дозволяють отримати з'єднання з механічними властивостями основного металу.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДИFUЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ СПЛАВІВ ПІСЛЯ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ПЛАЗМОВНИМИ ПОТОКАМИ

4.1. Особливості легованого шару при обробці високоенергетичними плазмовими потоками жароміцних дисперсійно зміцнюваних нікелевих сплавів, що знаходяться в різному структурному стані

Доведено [53], що дифузійне зварювання жароміцних сплавів у різному структурному стані, дає найкращі результати завдяки деформаційній активації поверхонь, зумовленій структурними напруженнями. Для цього одна з деталей, що з'єднуються, перебуває в аустенізованому стані, інша - в зістареному, проте вплив структурного стану жароміцного сплаву на легування і подальше формування з'єднань не вивчали. Дослідження впливу структурного стану на зазначені процеси досліджували легуванням сплаву ЧС 88У-ВІ після аустенізації та загартування у воді в одній серії та після повної стандартної термічної обробки - в іншій серії. Режими обробки СПП обох серій були однакові. Дослідження проводили на косих шліфах під кутом 45°.

Мікроструктура, хімічний склад, розподіл мікротвердості та цирконію в сплаві ЧС88У та після обробки СПП у стані після гартування (зразок з3) наведені на рис. 4.1 - 4.3, а в стані повної стандартної термічної обробки, тобто після старіння (зразок с9) - на рис. 4.4 - рис. 4.6.

Кут нахилу різку під час підготовки шліфів становив 45°. Отже, справжня глибина обробленої поверхні після загартування становить 12...17 мкм. Мікроструктура зразка представлена на рис. 4.1, 4.2. Мікротвердість змінюється від 3220...3270 МПа (на поверхні) до 2740 МПа (за глибиною) до 75 мкм (рис.4.2,в).

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз хімічних елементів на обробленій поверхні (виконаний також на косому шліфі) представлений на рис. 4.3.

Розподіл хімічних елементів від поверхні в глибину (дослідження косого шліфа) показали, що процеси дифузії Zr поширюються від поверхні до 18 мкм. Вміст Zr змінюється від 2,4...1,9 % на поверхні до 0,2...0,4 % на глибині, рис. 4.3,в. Слід зауважити, що концентрація цирконію в білій смузі на поперечному шліфі є заниженою. При спектральному аналізі з поверхні вміст цирконію в цій смузі істотно вищий (6,1...6,7 % мас.).

Справжня глибина обробленої поверхні після повної термічної обробки становить 30...50 мкм. Мікроструктура зразка, представлена на рис. 4.4, 4.5. Мікротвердість змінюється за глибиною до 75 мкм (рис. 4.5,в). Оброблена поверхня має мікротвердість 2300...2400 МПа, яка поступово зростає при наближенні до основного металу (2700 МПа).

Аналіз хімічних елементів на обробленій поверхні (виконаний також на косому шліфі) представлений на рис. 4.6.

Розподіл хімічних елементів від поверхні на глибину (дослідження косого шліфа) показали, що процеси дифузії Zr поширюються на глибину до 30 мкм. Вміст Zr змінюється від 2,0 % на поверхні до 0,1 % на глибині (мал. 4.6,б), але верхнє значення концентрації Zr, визначене з поверхні у світлій смузі, істотно більше (4,3 % мас.), а нижнє може бути пов'язане з тим, що сам сплав ЧС 88У-ВІ містить до 0,05 % мас. цирконію. Тому справжня глибина дифузії може бути дещо меншою.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.1 - Мікроструктура металу після обробки СПП з попереднім нанесенням шару цирконію на загартований сплав ЧС88У

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.2 - Мікроструктура (а, б) і розподіл мікротвердості (в)
металу після обробки СПП з попереднім нанесенням шару цирконію на
сплав ЧС88У

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

a x3100

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ni	54,6	55,3	53,9	55,8	56,0	53,9	54,5	53,8	57,7	55,9	56,7
Fe	-	-	-	-	0,3	-	-	0,3	-	0,1	-
Cr	17,1	17,4	17,8	15,7	17,9	16,6	16,4	17,0	18,7	17,9	17,6
Ti	3,2	3,2	3,3	3,9	3,18	3,1	3,7	3,4	3,4	3,3	3,2
Al	3,4	4,4	5,0	4,9	4,4	5,2	5,6	4,0	4,1	4,3	4,2
W	1,85	2,7	4,0	2,3	-	2,5	2,0	2,8	1,3	2,9	1,9
Nb	0,2	-	-	2,5	1,3	1,7	-	0,9	-	1,1	2,1
Mo	0,2	2,1	1,5	1,1	2,8	2,0	1,4	3,7	0,2	0,9	-
Cl	-	-	-	-	0,1	-	-	-	0,1	-	-
Co	1,8	12,9	12,6	12,2	12,9	13,5	12,6	12,9	13,9	12,8	13,6
Mn	0,5	0,3	0,5	0,7	0,2	0,6	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5
Zr	2,4	1,4	1,2	0,8	0,7	0,6	0,4	0,4	-	-	-
	поверх.	1мм	3мм	5мм	7мм	10мм	13мм	16мм	17мм	20мм	23мм

б

в

Рисунок 4.3 - Мікроструктура (а), хімічний склад (б) і розподіл цирконію (в) у металі після обробки СПП з попереднім нанесенням шару цирконію на сплав ЧС88У у стані аустенізації та гартування у воді

Рисунок 4.4 - Мікроструктура металу після обробки СПП з попереднім нанесенням шару цирконію на сплав ЧС88У в стані повної термічної обробки

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 4.5 - Мікроструктура (а, б), та розподіл мікротвердості (в)
металу після обробки СПП з попереднім нанесенням шару цирконію на
сплав ЧС88У в стані повної термічної обробки

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

a x1550

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ni	58,6	60,1	59,4	57,9	60,2	58,5	56,5	57,7	57,6	58,1	50,5
Fe	-	0,3	0,1	0,1	-	-	-	0,1	0,2	1,7	-
Cr	14,3	15,6	15,7	16,1	15,7	15,9	15,1	16,5	16,3	15,6	14,3
Ti	5,0	3,5	3,5	3,1	2,9	3,3	3,3	3,5	3,2	3,2	3,3
Al	4,0	2,8	3,6	4,3	3,4	3,2	8,7	4,0	4,5	3,5	13,1
W	1,2	1,24	3,2	3,0	1,3	2,1	2,5	1,8	0,9	-	1,6
Nb	-	10	-	07	0,6	0,1	-	1,7	-	-	0,7
Mo	1,8	0,6	-	-	-	1,6	-	1,0	2,6	5,9	4,2
Cl	-	-	-	-	0,1	0,1	-	0,2	0,2	-	0,1
Co	12,6	12,7	12,6	12,9	13,5	13,3	12,5	12,3	13,0	12,8	11,5
Mn	0,4	0,3	0,4	0,3	0,6	0,8	0,4	0,5	0,8	1,4	0,4
Zr	2,0	1,6	1,3	1,25	1,2	0,9	0,8	0,5	0,5	0,2	0,2
	поверх.	1мкм	2мкм	3мкм	4мкм	5мкм	6мкм	10мкм	15мкм	20мкм	25мкм

б

в

Рисунок 4.6 - Мікроструктура (а), хімічний склад (б) і розподіл цирконію (в) у металі після обробки СПП з попереднім нанесенням шару цирконію на сплав ЧС88У в стані повної термічної обробки

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльні дослідження методом оптичної металографії товщини модифікованого поверхневого шару, глибини зони розподілу основних хімічних елементів, а також мікротвердості у зразках ЧС88У (нікелевий сплав) з поверхнями, модифікованими Zr з використанням високоенергетичних плазмових потоків після різних станів як після гартування (зразок з3) так і після старіння (обр. с9), показали, що в стані після загартування глибина обробленої поверхні дещо менша порівняно зі станом після старіння; мікротвердість після загартування поверхневого шару на 25% вище порівняно зі станом після старіння. Розподіл Zr від поверхні до основного металу може після загартування і після старіння ідентичні, а глибина даної зони розподілу трохи менша після гартування.

Показовим є те, що в поверхневому шарі, отриманому після обробки ВПП у зістареному стані мікротвердість знижується до 2200 МПа. Це свідчить про те, що фаза, що зміцнює, в ньому повністю розчиняється. Тому при з'єднанні двох легованих поверхонь структурні напруги будуть мінімальними, обумовленими структурою глибших шарів. Тому модифікування обох поверхонь, що з'єднуються, не доцільно.

Проведені дослідження на зразках з ЧС88У з модифікованими поверхнями Zr з використанням високоенергетичних плазмових потоків після різних станів як після загартування (обр. з3) так і після старіння (обр. с9) свідчать. Більш доцільним є легування поверхні після загартування. Оскільки після обробки СПП охолодження сплаву відбувається з більшою швидкістю, ніж при загартуванні, виділення додаткових зміцнювальних фаз виключається. Якщо легувати сплав у стані повної термічної обробки, то в легованому шарі відбувається розчинення виділилися раніше при старінні фаз, що зміцнюються. Тоді структура поверхневого легованого шару обох зразків буде близькою, а отже рівень структурної напруги буде низьким. Для максимального ефекту впливу структурних деформацій при дифузійному зварюванні необхідно модифікувати або легувати поверхню

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталі, що знаходиться в стані гарту, а поверхня другої деталі повинна перебувати в зістареному стані.

4.2. Особливості технологічних процесів дифузійного зварювання

Дифузійне зварювання відноситься до способів з'єднання у твердому стані з низькоінтенсивною пластичною деформацією. Тому при різномірних матеріалах інтенсифікація пластичних деформацій у зоні стику досягається термоциклірованием. ДС жароміцних дисперсійнозміцнених нікелевих сплавів необхідно виконувати в різних структурних станах, бажано в умовах термоциклювання в інтервалі температури гартування – температура старіння [60 – 63]. При цьому ефективність використання структурних деформацій буде максимальною.

В роботі досліджували сполуки, отримані при легуванні цирконієм однієї з поверхонь сплаву ЧС88У. Враховуючи встановлений вище позитивний вплив теплових змін на формування сполук, температуру змінювали від 850 до 1180 °С (три цикли). При термоциклюванні тиск стиснення встановлювали 15, 10 і 5 МПа, яке підтримувалося постійним та прикладалося до початку нагрівання. Зміна тиску стиснення у зазначених межах на структуру та властивості сполук впливає не суттєво. Мікроструктура сполуки (рис. 4.7) схожа на структуру, отриману при дифузійному зварюванні з термоциклюванням без легування поверхонь. Лінія стику практично не виявляється. Підвищена концентрація легуючого елемента у зоні стику фіксується лише локальним рентгеноспектральним мікроаналізом. У стику формуються спільні для заготовок зерна. При легуванні тільки однієї з поверхонь і навіть при стані другої литої заготовки після уповільненого охолодження без старіння чітко простежується подібнення структури модифікованого шару і витягнуті

					<i>ЗВ-З21м.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вздовж стику зерна. Це свідчить про пластичні деформації в зоні стику. Таким чином, поверхневий шар відіграє роль не тільки припою, але й сприяє розвитку пластичних деформацій та формуванню загальних зерен у стику. Такі зерна відсутні при з'єднанні двох полірованих поверхонь у тих самих умовах в однаковому структурному стані сплаву.

Рисунок 4.7 – Мікроструктура сполуки жароміцного ЧС88У, отриманого пайкою з тиском при термоциклюванні та легуванні цирконієм однієї з поверхонь, що з'єднують; $\times 100$

Дослідження структури металу у зоні стику показали, що у зоні стику формується дрібнозерниста структура, зокрема із зародками рекристалізованих зерен. Термоциклюванням (трохи більше 2...3 циклів) проводили в інтервалі 850...1180 °С. При цьому свій внесок у формування напружено-деформованого стану вносять обидві деталі, що з'єднуються. Відомо [53], що розчинення наявних у зістареному стані зміцнювальних фаз починається з температури нагрівання 1050 °С нижче 900-950 °С і супроводжується зменшенням обсягу сплаву.

Механічні випробування показали, що при з'єднанні сплавів з легуваними поверхнями межа міцності сполук при 900°С не нижче 90% від

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міцності основного металу. При випробуванні з'єднань сплаву Inconel 718 з легованою поверхнею межа міцності становить понад 900 МПа при температурі 550 °С, а довговічність при 785 МПа понад 50 годин, що перевищує технічні вимоги.

					ЗВ-З21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Легований шар відіграє роль не тільки припою, але і сприяє розвитку пластичних деформацій, інтенсифікує процес формування загальних зерен в стику, мала товщина і напружений стан шару сприяє інтенсифікації дифузійних процесів.

2. Встановлено, що найбільш доцільно легувати поверхню деталі, яка перебуває у стані аустенізації та гартування, а друга деталь повинна перебувати у зістареному стані без легованого шару.

					<i>ЗВ-З21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Стартап є формою підприємства малого ризику, яка набула широкого поширення в усьому світі за останнє десятиліття завдяки зниженню перешкод для входу на ринок. Адже всесвітня мережа спростила пошук споживачів і продаж товарів та послуг. Цей вид підприємництва вважається одним із важливих елементів інноваційної економіки, оскільки загальний обсяг інноваційних ідей постійно збільшується за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості підприємницьких проєктів. Однак створення і впровадження стартап-проєктів на ринок асоціюється з високим рівнем ризику, і лише невелика частина з них досягає комерційного успіху. Відсоток успішних стартапів, згідно з різними оцінками, коливається від 10% до 20%.

У розробленні та запуску підприємницького проєкту на ринок передбачено кілька етапів, включно з аналізом ринкових перспектив проєкту, визначенням термінів і принципів організації виробництва, фінансовим аналізом і аналізом ризиків, а також заходами з просування пропозиції для інвесторів.

Метою розділу є розвиток інноваційного мислення, підприємницького духу, а також здібності до аналізу ринкових перспектив і можливостей для комерціалізації головних науково-технічних розробок, представлених у попередній частині магістерської дисертації. Особливу увагу буде приділено розробці концепції стартап-проєкту, який буде адаптований до умов висококонкурентної ринкової економіки, що розвивається в умовах глобалізації.

					ЗВ-321мп.02.00.000ПЗ		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Лепіліна К.М.			Розроблення стартап-проєкту		
Перевір.		Глуценко Я.І.					
Н. контр.		Лисак В.В.					
Затверд.		Квасницький В.В.					
					Літ.	Арк.	Аркуші
					КПІ ім. І. Сікорського НН ІМЗ ім. Є.О.Патона		

Завдання розділу полягає в проведенні аналізу ринку, оцінці перспектив упровадження пропонованих науково-технічних рішень і розробленні рекомендацій, а також оцінці можливості їх реалізації на ринку [64].

5.1. Опис ідеї проєкту (товару, послуги, технології)

Дифузійне зварювання є вибором при роботі з жароміцними сплавами на основі нікелю, які широко застосовуються в автомобільній, аерокосмічній та атомній промисловості. Такі сплави часто мають складну форму, що робить їх виготовлення методом звичайного лиття складним та коштовним.

Якісне дифузійне зварювання вимагає детальної обробки поверхонь, оскільки без цього якість зварювання істотно знижується. Існує кілька методів обробки поверхні перед зварюванням, таких як ручне механічне очищення, хімічне травлення та інші.

Просте очищення поверхні виявляється недостатнім для досягнення високої якості зварювання. Тому у цій роботі пропонується використовувати метод легування за допомогою висококонцентрованих потоків плазми (ВПП). Цей метод дозволяє не тільки активізувати, але й легувати поверхню металу для підвищення якості зварювання. Варто зазначити, що шар, що утворився в результаті легування, має хімічний склад, який тісно корелює з основним металом.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проєкту [64]

Зміст ідеї	Напрямок застосування	Вигоди для користувача
Використання легування поверхні нікелевого жароміцного сплаву ЧС88У високонцентрованими плазмовими потоками	Аерокосмічна, енергетична, автомобільна, атомна промисловості	Шляхом легування сплаву з використанням висококонцентрованих потоків плазми відбувається активація його поверхні та покращення механічних властивостей ДЗ з'єднань. Це дозволяє підвищити термін експлуатації виробів.

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту [64]

№	Техніко-економічна характеристика ідеї	Товари/концепції конкурентів		Слабка сторона	Нейтральна сторона	Сильна сторона
		Мій проєкт	Конкуренти			
1	Легування поверхні забезпечує покращення умов ДЗ	Обробка поверхневого шару з метою легування ВПП	Нанесення шару легуючих елементів засобом гальванічного покриття, термохімічне легування	Утворення дефектів, зокрема тріщин внаслідок формування термічних напружень при обробці ВПП	Легування змінює структурну будову поверхневого шару сплаву	Дозволяє отримати поверхневий шар необхідного хімічного складу і властивостей

5.2. Технологічний аудит ідеї проєкту

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність ідеї проєкту легування поверхні сплаву ЧС88У за допомогою ВПП [64].

№	Ідея проєкту	Технологія реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Легування поверхневих шарів жароміцного сплаву ЧС88У шляхом обробки ВПП	Обробка ВПП, що генеруються магнітно плазмовим компресором	Наявна	Умовно доступна

З таблиці технології реалізації проєктної ідеї бачимо, що застосування технології легування поверхні жароміцного сплаву ЧС88У з використанням висококонцентрованих плазмових потоків є можливим і здійсненним.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Аналіз потенційних ринкових можливостей, які може експлуатувати проєкт, та ідентифікація загроз, що можуть стати на заваді його успішності, дозволяють розробити план розвитку, що відповідає конкретним умовам та вимогам ринку. У такий спосіб можливо також створити напрацювання рекомендацій, які будуть корисними для потенційних замовників та конкуруючих ініціатив.

Першочерговою задачею є виконання аналітичного дослідження ринкових можливостей. Даний аналіз передбачатиме розгляд сегменту ринку, що стосується випуску газотурбінних лопаток, з врахуванням того, що для їхнього виробництва використовується сплав ЧС88У, який технічно обробляється шляхом легування за допомогою плазмових потоків високої концентрації.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту [64]

№	Показник стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	7
2	Загальний обсяг продажів, гр/ум.од	1,7 мільярдів 44 мільйона/ 4,47x10 ⁷ \$
3	Динаміка ринку	Ринок суттєво зростає
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та специфікації	РД 34.02.303-91
6	Середня норма рентабельності галузі	> 1

На підставі даних, представлених у таблиці 5.4, можливо сформулювати висновок про те, що ринок газотурбінних лопаток є перспективним для входу, що відповідно свідчить про доцільність їх легування.

Таблиця 5.5 Характеристика потенційних клієнтів [64]

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних клієнтів	Вимоги споживача до товару
1	Легування поверхні для покращення умов формування з'єднання	Підприємства по виготовленню газотурбінних лопаток, газотурбінних двигунів морських суден та енергетичних газотурбінних установок	Стандарти, технічні регламенти, технічні умови і специфікації, технологічні інструкції	Покращення характеристик якості та надійності виробів

Згідно з даними, представленими у таблиці 5.5, до групи потенційних споживачів послуг з легування поверхонь належать організації, що займаються виробництвом газотурбінних лопаток, газотурбінних двигунів для морських суден, а також газотурбінних енергетичних установок.

У ході ідентифікації потенційної клієнтури було здійснено аналіз ринкового оточення, а саме визначені чинники, які сприяють чи перешкоджають входженню даного проєкту на ринок:

Таблиця 5.6 Фактори загроз стартап-проєкту легування поверхні сплаву ЧС88У за допомогою ВПП [64].

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Економічна нестабільність	Зменшення розмірів інвестицій	Залучення нових інвесторів шляхом використання міжнародних платформ, диверсифікація фінансування
2	Технологічні зміни	Поява найновітнішої технології	Постійний моніторинг технологічних трендів та інновацій у галузі, гнучкість та адаптація до змін
3	Технічні виклики	Технологія вимагає високої точності, може бути складною	Посилення досліджень та розробок
4	Недостатній захист інтелектуальної власності	Копіювання ідеї конкурентами	Патентування ключових технологій та розробок, Укладання угод про нерозголошення з працівниками та партнерами.

Таблиця 5.7 Фактори можливостей стартап-проекту легування поверхні сплаву ЧС88У за допомогою ВПП [64].

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зменшення собівартості та витрат на реалізацію технології	Залучення більш дешевих ресурсів	Зростання обсягу робіт з легування
2	Міжнародне розширення	Збільшення обсягів виробництва	Розвиток стратегії для виходу на міжнародні ринки, включаючи міжнародні стандарти якості та вимоги
3	Зелена економіка та сталість	Зменшення екологічного впливу діяльності компанії	Включення екологічно чистих практик у свою бізнес-модель

Далі проводився аналіз конкуренції ринку:

Таблиця 5.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [64].

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Чиста конкуренція	Залучені підприємства конкурують щодо виготовлення виробів зі жароміцного сплаву ЧС88У на рівних умовах	Поліпшення технології легування

Продовження таблиці 5.8

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Національна конкурента боротьба	Лопатки енергетичних та морських ГТД виготовляють підприємства різних країн	Залучення споживачів різних країн з метою зростання прибутку
Внутрішньогалузева конкуренція	Конкуренція проходить в середині галузі	Регулярний аналіз досягнень конкурентів та їх доробку
Товарно-видова конкуренція	Конкуренція за методом введення легуючих елементів	Удосконалення легування за допомогою ВПП
Цінова перевага	Способи легування поверхні зменшеної собівартості	Зменшення собівартості процесу легування

Далі був проведений аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

Таблиця 5.9 Аналіз конкурентів в галузі за М.Портера [64].

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товарозамінники
	Введення легуючих елементів під дією лазерної, плазмової, газотермічної обробки	Підприємства, що забезпечують легування поверхонь	Підприємства, що виготовляють жароміцний сплав ЧС88У	Siemens, General Electric, Pratt & Whitney, Rolls-Royce	Застосування нових прискорювачів плазми в майбутньому
Висновки	Конкуренція можлива, оскільки технологія стає популярною	На дійсний час наявні тільки прямі конкуренти	Від постачальників залежить пряма поставка сплаву, який буде підлягати процесу легування	Легування не має сенсу, оскільки клієнти є прямими замовниками продукції	Обробка ВПП на дійсний час є найбільш передовим способом введення легуючих елементів

У зв'язку із станом конкуренції, робота на ринку є цілком виконуваною. Для забезпечення конкурентної переваги процес легування повинен відповідати вимогам замовників та особливостям вартості легування, порівнюючи з іншими методами обробки поверхонь.

Надалі формулюється обґрунтування вибору факторів, які забезпечують конкурентоспроможність.

Таблиця 5.10 Обґрунтування факторів конкурентноспроможності [64].

№	Фактор конкурентноспроможності	Обґрунтування
1	Перспектива застосування відновлювального середовища на базі HF і BF ₃	Дійсний спосіб легування дозволяє використовувати активні середовища на базі HF і BF ₃
2	Зміна топографії поверхонь	В процесі легування ВПП змінюється шорсткість та хвилястість поверхні заготовок
3	Вдосконалення виробничих процесів	Інтеграція легування у виробничий процес може знизити виробничі витрати і час, необхідний для обробки матеріалів

Після чого проводиться аналіз сильних та слабких сторін легування поверхонь жароміцного сплаву ЧС88У за допомогою висококонцентрованих плазмових потоків.

Таблиця 5.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін легування поверхні сплаву ЧС88У за допомогою ВПП [64].

№	Фактор конкурентноспроможності	Бали	Рейтинг конкурентів у порівнянні з легуванням за допомогою ВПП						
			-3	-2	-1	0	+	+	+
1	Застосування активного газового середовища на основі HF і BF ₃	20							+
2	Зміна топографії поверхні	15					+		
3	Вдосконалення виробничих процесів	15						+	
4	Обмежена товщина покриття	10				+			
5	Висока вартість обладнання	10				+			

Завершальним кроком аналізу ринкових можливостей перед введенням проєкту в дію є розробка SWOT-аналізу.

Таблиця 5.12 SWOT-аналіз легування поверхні сплаву ЧС88У за допомогою ВПП [64].

Сильні сторони: - Можливість застосування активних газових середовищ на базі HF і BF₃ - Зміна топографії поверхні - Вдосконалення виробничих процесів	Слабкі сторони: - Обмежена товщина покриття - Висока вартість обладнання
Можливості: - Зменшення собівартості та витрат на реалізацію технології - Міжнародне розширення - Зелена економіка та сталість	Загрози: - Економічна нестабільність - Технологічні зміни - Технічні виклики - Недостатній захист інтелектуальної власності

На основі SWOT-аналізу проводився аналіз ринкового впровадження стартап-проєкту.

Таблиця 5.13 Альтернативи ринкового впровадження легування поверхні сплаву ЧС88У за допомогою ВПП [64].

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Закінчення дослідження технології	Максимальна	4-12 місяців
2	Впровадження технології на підприємства	Максимальна	12 місяців

Отже обраною альтернативою є закінчення дослідження технології.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проєкту

Спочатку треба визначити стратегію охоплення ринку:

Таблиця 5.14 Цільова група потенційних споживачів [64].

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Підприємства-виробники лопаток та ГТД морського та енергетичного призначення	Висока	Високий	Невисока	Середня

Пропонуватися процес легування буде для підприємств, котрі займаються виготовленням газотурбінних лопаток, газотурбінних двигунів морських суден та енергетичних газотрубіних установок.

Наступним кроком необхідно визначити базисну стратегію розвитку:

Таблиця 5.15 Визначення базової стратегії розвитку [64].

№	Обрана альтернатива розвитку	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентноспроможні пропозиції	Базова стратегія розвитку
1	Закінчення дослідження технології	Пришвидшення виходу на ринок за рахунок прискореного створення технології легування у порівнянні з конкурентами	Кваліфіковані фахівці та інженери-дослідники, здатні прискорити створення технології	Стратегія спеціалізації

Далі обирається стратегія конкурентної поведінки:

Таблиця 5.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки [64].

№	Чи є проєкт першопрохідцем на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента ?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Попередні дослідження проводились, тому ідея не є абсолютно новою	Пошук нових клієнтів та пропозиції нових ідей	Застосування власних досліджень компанії	Стратегія виклику лідера

Тепер варто визначитися із стратегією позиціонування:

Таблиця 5.17 Стратегія позиціонування [64].

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентноспроможні позиції стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту
1	Сталість хімічного складу сформованих шарів та низька собівартість	Стратегія спеціалізації	Кваліфіковані фахівці та інженери-дослідники, здатні прискорити створення технології	-Сталість утвореного хімічного складу -Низька собівартість легування -Надійність та довговічність з'єднань

Пропозиція стратегії розвитку проекту щодо легування поверхні високоміцного сплаву ЧС88У була затверджена після завершення відповідного розділу роботи, включаючи спеціалізацію в даній сфері та дотримання конкурентної стратегії виклику лідера серед інших учасників ринку.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Спочатку сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач.

Таблиця 5.18 Визначення ключових переваг концепції легування поверхні сплаву ЧС88У за допомогою ВПП [64].

№	Потреба	Вигода	Ключові переваги
1	Введення легуючих елементів в поверхневий шар заготовок з метою покращення характеристик якості ДЗ з'єднань	Легування ВПП забезпечує активацію поверхонь заготовок, що дозволяє покращити міцність та довговічність виробів, отриманих ДЗ	Можливість застосування активних газових середовищ на базі HF та BF ₃ , формування однорідного легованого шару контрольованої товщини

Після чого розробляється трирівнева маркетингова модель товару:

Таблиця 5.19 Опис трьох рівнів моделі товару [64].

Рівні товару	Сутність та складові
Товар за задумом	Технологія щодо легування жароміцного сплаву ЧС88У шляхом обробки ВПП
Товар у реальному виконанні	Технологія щодо легування жароміцного сплаву ЧС88У шляхом обробки ВПП
Товар із підкріпленням	Отримання патенту для захисту технології

Як було вказано в таблиці 5.19 товар від копіювання буде захищати патентування технології та законодавство України, щодо запатентованої власності.

Наступним кроком є визначення меж встановлення ціни:

Таблиця 5.20 Визначення меж встановлення ціни [64].

№	Рівень цін на товар замітник	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межа встановлення ціни на технології
1	8,940 грн	15000 грн	Капіталообіг Pratt & Whitney сягає близько $4,47 \times 10^7$ долларів/ 44,7 млн. грн	7000-11000 грн

Після визначення ціни треба визначити оптимальну систему збуту:

Таблиця 5.21 Формування системи збуту [64].

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Придбання клієнтами технології з метою подальшого використання на підприємстві	Передача підприємству технології	Канал збуту від виробника до споживача	Прямий Business-to-Business збут

Останім є розроблення концепції маркетингових комунікацій:

Таблиця 5.22 Концепція маркетингової комунікації [64].

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій цільових клієнтів	Ключові позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Придбання технології підприємствами з метою подальшого довготривалого використання з метою отримання прибутку, який досягається за рахунок низької собівартості	Оскільки підприємства забезпечують комерційну таємницю, то прямої комунікації між ними немає	Ключовим фактором є собівартість технології, забезпечення підвищених характеристик якості ДЗ з'єднань	Довести підприємству-споживачу можливість отримання прибутку за рахунок запропонованої технології	Розроблена технологія легування поверхневих шарів заготовок забезпечить зростання прибутків, характеристик якості та довговічності виробів, отриманих ДЗ

Отже, з аналізу було визначено, що товар – це технологія легування поверхні сплаву ЧС88У за допомогою ВПП, з межами ціноутворення від 7000 до 11000 грн. Технологія буде надаватися напряму на підприємства, як шлях для збільшення прибутку підприємства та якості зварних з'єднань.

5.6. Висновки

Після проведення аналізу розділу, ми дійшли висновку, що технологія поверхневого легування сплаву ЧС88У з використанням ВПП має потенціал для комерціалізації проєкту, оскільки на ринку є попит, і ринок перебуває в процесі розвитку. Ідея має перспективи для впровадження, оскільки є значна кількість потенційних клієнтів, готових придбати цю технологію.

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Реалізація зварювальних робіт, що застосовуються до сплаву високої міцності ЧС88У, здійснюється методом дифузійного зварювання, який включає використання висококонцентрованих потоків плазми. Водночас, для додавання легуючих елементів на поверхню застосовується магнітоплазмовий прискорювач компактного типу, що працює на основі вакуумно-плазмового напилення. Однак слід зазначити, що обидва ці процеси - як зварювальний, так і легування поверхні - являють собою певні загрози для здоров'я персоналу.

Основна мета представленого розділу - формулювання вимог до зниження негативного впливу на здоров'я персоналу, що виникає в результаті операцій дифузійного зварювання жароміцного сплаву ЧС88У з поверхнями, модифікованими потоками плазми високої концентрації.

Завдання розділу зумовлене необхідністю створення та впровадження дієвих методик і процедур для мінімізації та контролю згаданих ризиків. До числа заходів можуть належати розробка норм безпеки, організація навчальних заходів для працівників, застосування відповідної захисної техніки та інших підходів. Розв'язання цього завдання видається вкрай важливим для гарантування безпечних умов праці та виключення випадків травматизму на виробничих майданчиках, де функціонують складні та потенційно небезпечні процеси, включно з дифузійним зварюванням і легуванням поверхонь.

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Літ.	Арк.	Архувів
Разроб.		Лепіліна К.М.						
Перевір.		Левченко О.Г.						
Н. контр.		Лисак В.В.						
Затверд.		Квасницький В.В.				КПІ ім. І. Сікорського НН ІМЗ ім. Є.О.Патона		

6.1. Аналіз шкідливих і небезпечних факторів (ШНВФ)

Під час виконання дифузійного зварювання стикаються з такими несприятливими факторами:

- Газові викиди: Під час дифузійного зварювання може відбуватися вивільнення газів, наприклад, оксидів або інших токсичних компонентів, здатних чинити негативний вплив на здоров'я персоналу.
- Викиди пилу: Обробка металевих матеріалів під час зварювання може призвести до утворення пилу, до складу якого входять металеві частинки або інші шкідливі елементи, інгаляція яких підвищує ймовірність розвитку патологій органів дихання.
- Електромагнітне випромінювання: Застосування великих струмів під час зварювальних операцій сприяє генерації електромагнітного поля і супутнього випромінювання, що може несприятливо позначитися на здоров'ї.
- Теплове випромінювання: У зв'язку зі створенням високих температур під час зварювання виникає теплове випромінювання, що становить небезпеку для довкілля і співробітників.
- Формування димів і парів: У процесі зварювання зазвичай відбувається утворення димів і парів, що містять токсичні елементи на кшталт металевих оксидів або інших хімічних сполук.
- Ризик травматизму та опіків: Високотемпературні умови роботи та особливості процесу можуть вести до збільшення шансів отримання опіків та інших видів травм персоналом.
- Шум: Джерелом шуму служить сам процес зварювання. Для мінімізації рівня шуму можливе використання акустичних матеріалів для обробки стель і стін приміщення.

Комплекс основних негативних чинників, що виникають у процесі зварювання і легування, наведено в таблиці 6.1.

					ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 6.1 Небезпека і шкідливі виробничі фактори

№	Фактори виробничого середовища та організації праці		Дифузійне зварювання	Легування
1	Шкідливі речовини		хх	хх
2	Випромінювання в оптичному діапазоні	Ультрафіолетове	хх	хх
		Видиме	хх	хх
		Інфрачервоне	х	х
3	Електромагнітні поля		хх	-
4	Магнітні поля		-	-
5	Іонізуюче випромінювання		-	-
6	Шум		хх	хх
7	Ультразвук		хх	хх
8	Статичне навантаження руху		х	хх
9	Електричний струм		хх	хх
10	Іскри, бризки		х	хх
11	Механізми і вироби, що рухаються		х	хх

де хх- інтенсивний фактор, х- проміний фактор, - незначний фактор.

6.2. Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

З метою забезпечення захисту зору, шкіри голови та шийного відділу від впливу іскор і бризок застосовуються спеціалізовані захисні щити, призначені для використання на руках і голові. Ці засоби захисту виробляються відповідно до стандартних вимог ДСТУ EN 175-2001 "Захисне обладнання для очей та обличчя під час зварювальних робіт" (EN 175:1997, IDT) [65].

У захисні щити вбудовані світлофільтри, створені для запобігання шкідливого впливу ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання на зір. Під час проведення зварювальних робіт із застосуванням легування необхідно в десять разів зменшити інтенсивність випромінювання, використовуючи ці світлофільтри. Для випадків дифузного зварювання рекомендується використання фільтрів з рівнем захисту 14. Особливу увагу слід приділити запобіганню застосуванню фільтрів із надмірно високим ступенем захисту, що може призвести до зниження якості видимості і, відповідно, контролю за якістю виконуваних робіт.

Спеціалізований одяг для зварювальників задовольняє критеріям стандарту ДСТУ EN ISO 11611:2016 "Захисний одяг для зварювальних і споріднених процесів" (EN ISO 11611:2015, IDT; ISO 11611:2015, IDT) [66], що має на увазі наявність захисного костюма з легкого брезенту та додаткових укріплених вставок зі зносостійкої тканини фенілонового типу.

Устаткування для зварювання і наплавлення, яке перебуває в експлуатації в рамках технологічних процесів, має відповідати вимогам регулювальних документів, таких як ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електричних установок споживачів"[67] і ДНАОП 0.00-1.32-01 "Правила улаштування електричних установок. Спеціальне електрообладнання" [68].

6.3. Забезпечення вимоги організації робочих місць

Відповідно до норм НПАОП 28.5-1.02-07 [69], конфігурація та оснащення місць виконання зварювальних операцій задовольняють встановленим приписам. Розміщення апаратури зобов'язане підкорятися нижченаведеним застереженням і умовам:

- мінімальний простір від стіни лабораторії до встановленого обладнання становить 0,5 м;
- проміжок між фіксованими джерелами енергії перевищує 0,8 м;

					<i>ЗВ-з21м.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- дистанція між рухомими пристроями і переміщуваними компонентами не менше 1,5 м.

Місце праці зварювальника, включно з розташуванням робочої поверхні, керувальними та контрольними елементами, має відповідати критеріям, визначеним ДСТУ 20549-75 "Дифузійне зварювання у вакуумі трудових елементів сепараційних і формоутворювальних штампів. Стандартний техпроцес" [70].

Робочі станції постійного базування для зварювання металоконструкцій вагою понад 15 кг мають бути оснащені підйально-транспортним обладнанням.

6.4. Вимоги до експлуатації зварювального обладнання

Відповідно до норм ДСТУ 20549-75 має здійснюватися суворе дотримання вимог до обладнання, призначеного для використання в процесах усіх основних типів дифузійного зварювання, зокрема технологічного, механічного та допоміжного.

6.5. Захист від теплового випромінювання

Дотримання нормованих рівнів інтенсивності теплового випромінювання в оптичному спектрі, включно з ультрафіолетовим, видимим та інфрачервоним випромінюванням, є обов'язковим на робочих місцях з постійною експлуатацією. За обставин, коли за технічними обставинами встановлені значення щільності випромінювання є недосяжними, необхідно застосовувати захисні заходи. До таких заходів належить огороження джерела випромінювання, застосування спеціалізованих кабін або поверхонь з використанням радіаційного охолодження, здійснення повітряного обдування за швидкості руху повітря не більш як 3,5 метри за секунду, а також використання теплоізолюючих килимків, взуття та костюмів з охолодженням.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6.6. Вимоги до електробезпеки

Основними факторами, що спричиняють ураження працівників електричним струмом, є торкання до активних елементів, які перебувають під напругою під час роботи; ненавмисний дотик до частин, які опинилися під напругою; торкання до частин конструкцій, знеструмлених через несправність ізоляційного матеріалу; вплив електричної дуги і напруги. Робочі приміщення з точки зору ризику електротравматизму класифікуються як надзвичайно небезпечні. Умови експлуатації зовнішніх електроустановок схожі з умовами в приміщеннях з високим рівнем небезпеки. Для запобігання ураженню струмом у надзвичайних ситуаціях використовуються заходи захисту: заземлення, занулення, відключення живлення, подвійна ізоляція. Заземлення необхідно застосовувати, коли електропостачання йде від мереж з ізолюваною або глухо заземленою нейтраллю на напругу понад 1000 В. Електричне вимірювальне обладнання та обладнання для живлення, а також його використання повинні відповідати нормативам, установленим ДНАОП 0.00-1.32-01 і ДНАОП 0.00-1.21-98. Обов'язковим є заземлення корпусів усіх електроустановочних пристроїв. Захисне заземлення і занулення повинні виконуватися відповідно до Правил улаштування електроустановок, виданих у 2017 році (ПУЕ-2017). [71] Неприпустимо з'єднувати в заземлювальному провіднику кілька пристроїв послідовно.

6.7. Розрахунок інженерного рішення

Підбір конфігурації локального витяжного обладнання, об'єму повітря, яке екстрагується, методології очистки повітряного середовища, а також економічно виправданої вартості устаткування пов'язаний із способом зварювання, типом та брендом використовуваних зварювальних матеріалів, конструкційною формою виробу, обсягом робочого простору, кількістю робочих місць зварників та іншими значущими параметрами. Згідно із

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

затвердженими рекомендаціями, пропонуємо проект вентиляційної системи для дифузійного зварювання. Визначаємо систему витяжної вентиляції для елімінації небезпечних випарів. Встановлюємо об'єм повітря, який потрібно видалити, виходячи з нормованої швидкості його видалення з використанням відповідної формули:

$$L_m = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0,$$

де F_0 – площа відкритого перерізу вентиляційного виходу витяжки, 0.07 м^2 ; V_0 – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі, м/с .

Необхідно визначити швидкість потоку повітря в отворі пристрою відсмоктування, яка визначається згідно з формулою:

$$V_0 = 16 \cdot V_x \cdot (x/d)^2,$$

де V_x – швидкість повітря в зоні зварювання, $0,3 \text{ м/с}$; x – відстань від вхідного отвору воронки до зони зварювання, $0,25 \text{ м}$; d – діаметр вхідного отвору, $0,2 \text{ м}$;

$$V_0 = 16 \cdot 0,3 \cdot (0,25/0,2)^2 = 7,5 \text{ м/с},$$

$$L_m = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0 = 3600 \cdot 0,07 \cdot 7,5 = 1890 \text{ м}^3/\text{год}.$$

На основі проведених розрахунків було встановлено, що об'єм повітря, який потрібно видалити, складає 1890 м^3 на годину. Здійснюється монтаж системи видалення повітря для процесів дифузійного зварювання.

6.8. Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

Можливі небезпеки, котрі можуть виникати в процесі виробничої діяльності, включають: виникнення пожежі; вибух в приміщеннях, обладнанні або в зовнішньому середовищі; розриви або несправності устаткування; викиди шкідливих речовин в атмосферу; а також комбінації

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перерахованих ситуацій. Забезпечення ефективної реакції на такі інциденти вимагає наявності чітко визначеного плану локалізації та ліквідації нещасних випадків відповідно до положення [72].

У контексті ризик-менеджменту на виробничому об'єкті значне місце відводиться ідентифікації потенційних надзвичайних ситуацій та аварій із можливими катастрофічними наслідками. Прогнозування розвитку подібних сценаріїв та аналіз їх потенційних наслідків є критично важливим. Оцінка ризику аварійного виникнення має базуватися на детальному розгляді роботи як окремого обладнання (апаратів, машин тощо), так і цілісних технологічних блоків, із урахуванням характеристик використовуваних виробничих речовин і матеріалів, таких як властивості, що створюють загрозу пожежі або вибуху, та інших небезпечних аспектів.

Необхідно також звернути увагу на параметри стану речовини (температура, тиск, агрегатний стан і т.д.) та технічний стан обладнання, які можуть мати значення як для стандартного процесу виробництва, так і для ситуацій, що можуть спричиняти аварійні збої.

6.9. Пожежна безпека

Згідно з Державним стандартом України ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [73], що класифікує категорії приміщень, споруд та внутрішніх установок за ступенем небезпеки пожеж та вибухопожеж, простори для зварювальних робіт входять до категорії Г. У цих просторах виокремлюється зона, де відбувається накопичення твердих горючих матеріалів (зона II-Па згідно з ДНАОП 0.00–1.21–98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів") [67]. Відповідно до вимог безпечної відстані експериментального зазору між фланцями оболонок, категорія встановлена як ПА (понад 0,9 мм).

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для будинків встановлено ступінь вогнестійкості рівня 1, яка передбачає неможливість поширення вогню на основні будівельні конструкції, мінімально допустима вогнестійкість становить 2,5 години.

З метою забезпечення заходів пожежної безпеки використовуються:

1. Залучення максимального струменевого захисту для попередження загоряння ізоляції.
2. Застосування надійної герметизації обладнання для запобігання створення горючого оточення.
3. Монтаж пожежної сигналізації із сенсорами.
4. Дотримання правил електростатичної та мікробезпеки під час проведення технологічного процесу.
5. Підтримання механізму аварійного спуску рідин, котрі можуть спричинити пожежу.
6. Регулярне видалення горючих решток із робочої зони та обладнання.
7. Оснащення простору засобами захисту від пожежі та диму.
8. Установка протипожежних щитів у ділянках для зварювальних робіт, оснащених вогнегасниками та ємностями із піском.
9. Регулярна перевірка сухості піску.
10. Впровадження автоматичної системи гасіння пожеж.
11. Встановлення детекторів автоматичного виявлення пожеж у приміщенні з можливістю активації системи автоматичного гасіння при виявленні загрози.

6.10. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Якщо під час експлуатації зварювального апарату виникає електричний пробій корпусу, необхідно негайно вимкнути апарат за допомогою рубильника та інформувати керівника робіт або начальника ділянки про

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інцидент. У випадку, коли особа зазнає ураження електричним струмом, потрібно негайно від'єднати зварювальний апарат від електричної мережі, перенести потерпілого на ізолюючу підлогу, зокрема дерев'яний настил, підклавши під голову неелектропровідний матеріал, наприклад ватник. Одразу викликати медичну допомогу за номером 103 та, в разі необхідності, провести штучне дихання співробітнику.

У разі виникнення загоряння на зварювальному агрегаті слід перервати подачу електричної енергії, використовуючи рубильник, і невідкладно приступити до гасіння вогню за допомогою наявних засобів пожежогасіння, таких як вогнегасник. Будь-який працівник або службовець, який помітив ознаки пожежі, зобов'язаний:

- негайно повідомити пожежну службу, зателефонувавши за номером 101;
- почати ліквідовувати полум'я до прибуття пожежних підрозділів з використанням засобів, які є у виробничому приміщенні (на дільниці), включаючи вогнегасники, пісок, пожежний кран тощо;
- викликати на місце пожежі керівні посадові особи (начальника цеху, дільниці).

В разі отримання травми співробітникові слід негайно сповістити старшого майстра або начальника дільниці та звернутися за медичною допомогою в медичний пункт.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Обробка поверхні металів високоенергетичними плазмовими потоками (ВПП) змінює топографію, структуру, хімічний та фазовий склад, а існуючий рівень розвитку теоретичних основ, обладнання та технологій обробки матеріалів ВПП дозволяє їх використання у виробництві.

2. При легуванні поверхонь використовували імпульсні ВПП з тривалістю в імпульсі 100 мкс, пауза між імпульсами - 20 мкс. Середовище є водень, тиск $3 \cdot 10^2$ Па.

3. Легований шар досліджених сплавів має субмікрокристалічну структуру та щільність дислокацій до $2 \cdot 10^{11}$ см⁻².

4. Стійкість легованого шару проти тріщин підвищується зі збільшенням кількості імпульсів. Ефективним є режим обробки ВПП за схемою застосування декількох основних імпульсів.

5. Встановлено, що обробка сплаву ЧС88У ВПП з попереднім нанесенням шару цирконію забезпечує отримання легованого шару з концентрацією цирконію на рівні його вмісту в сучасних припоях (9,0...13 % мас.).

6. У жодному з'єднанні сплаву ЧС88У тріщин не виявлено, незважаючи на їх наявність у легованому шарі до зварювання.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ющенко, К.А. Инженерия поверхности: Учебник [Текст] / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – Киев, 2007. – 558 с.
2. Поут, Дж.М. Модифицирование и легирование поверхности лазерными ионными и электронными пучками [Текст] / Под. ред. Дж.М. Поута, Г. Фоты, Д.К. Джекобсона; Пер. с англ. Н.К. Мышкина и др.; Под ред. А.А. Углова. - М.: Машиностроение, 1987. - 424 с.
3. Рыкалин, Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки металлов [Текст] / Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. - М.: Машиностроение, 1978. - 239 с.
4. Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник [Текст] / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокара. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
5. Ионная имплантация и лучевая технология [Текст] / Под ред. Дж.С. Вильямса, Дж.М. Поута. – Киев: Научная мысль, 1988. – 360 с.
6. Диденко, А.Н. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов [Текст] / А.Н. Диденко, А.Э. Лигачев, И.Б. Куракин. - М.: Энергоиздат, 1987. - 184 с.
7. Грибков, В.Г. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: Учебник [Текст] / В.Г. Грибков, Ф.И. Григорьев, Б.А. Калинин, В.Л. Якушин / Под ред. Б.А. Калина. - М.: Круглый ч, 2001. - 528 с.
8. Валяев, А.Н. Модификация свойств материалов и синтез тонких пленок при облучении интенсивными электронными и ионными пучками [Текст] / А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк, Н. Кишимото, В.С. Ладышев. – Устьев-Каменогорск: ВКТУ, 2000. - 345 с.
9. Окс, Э.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применение [Текст] / Э.М. Окс. - Томск: И-Во НТЛ, 2005. - 216 с.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Пфанн, В. Зонная плавка [Текст] / В. Пфанн. – М.: Мир, 1970. – 366 с.
11. Kvasnitskii, V.V. High-Current Electron Beam Application for the Surface Modification of Iron, Stainless Steel and Heat Resistant Alloys [Текст] / V.V. Kvasnitskii, V.D. Kuznetsov, N.N. Koval and oth. // Surface Engineering and Applied electrochemistry. – Allston Press inc. – 2009. Vol. 45, № 3. - P. 180-185.
12. Kvasnitsky, V.V. The Application of High-Current low-Energy by Brazing of Materials [Текст] / V.V. Kvasnitsky, V.D. Kuznetsov, N.N. Koval and oth. // 16th International symposium on High- Current Electronics (16th SHCE) and 10th International Conference on Materials with Particle Beams and Plasma Flows (10th CMM): Proceedings. - Tomsk: Publishing House of the IAO SB PAS, 2010. - P. 680 - 682.
13. Application on High-Current low-Energy in Diffusion Welding of Materials [Текст] / V.V. Kvasnitsky, N.N. Koval, Yu. F. Ivanov and oth. // 16th SHCE and 10th CMM: Proceedings. - Tomsk: Publishing House of the IAO SB PAS, 2010. - P. 683 - 686.
14. Куликов, И.С. Раскисление металлов [Текст] / И.С. Куликов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
15. Губин, А.И. Пайка нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов [Текст] / А.И. Губин. – М.: Машиностроение, 1964. – 128 с.
16. Морозов, А.И. Плазменные ускорители [Текст] / А.И. Морозов, А.П. Шубин // Итоги науки и техники. Физика плазмы. - М.: ВИНИТЬ, 1984. – Т. 5. – С. 178-260.
17. Виноградова, А.К. Стационарные компрессионные течения [Текст] / А.К. Виноградова, А.И. Морозов // Физика и применение плазменных ускорителей. - Минск, 1974. – С. 103-141.
18. Морозов, А.И. О процессах в магнитоплазменном компрессоре (МПК) [Текст] / А.И. Морозов // Физика плазмы. – 1975. – Т. 1, № 2. – С. 179-191.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						104
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Асташинский, В.М. Исследование динамики плазмообразования и формирования области компрессии МПК [Текст] / В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, Л.Я. Минько // ЖПС. – 1980. – Т.33, № 4. – С. 629-633.

20. Асташинский, В.М. Интерферометрические исследования области компрессии МПК [Текст] / В.М. Асташинский, Э.А. Костюкевич // Физика плазмы. – 1981. – Т.7, № 3. – С. 523-528.

21. Astashinsky, V.M. Investigation of compression plasma flows and their interaction with a target [Текст] / V.M. Astashinsky, G.I. Bakanovich, L.Ya. Min'ko // XVI Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Contributed Papers. 1981. Minsk. V.2. P.1502 - 1503.

22. Асташинский, В.М. Исследование динамики взаимодействующих с преградой компрессионных плазменных потоков [Текст] / В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, Л.Я. Минько // Физика плазмы. - 1984. - Т.10, № 5. - С. 1058-1063.

23. Асташинский, В.М. Излучательные характеристики компрессионных плазменных потоков в видимой и ближней инфракрасной областях [Текст] / В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, Л.Я. Минько // ЖПС. - 1984. - Т.40, № 4. - С. 540-545.

24. Минько, Л.Я. Исследование динамики формирования и распада компрессионного плазменного потока [Текст] / Л.Я. Минько, В.М. Асташинский, Э.А. Костюкевич // ТВТ. 1987. Т.25. N 3. С.601 - 603.

25. Імпульсны плазменны паскаральнік на аснове разраднaгa устpойства магнітаплазменнaгa кампресара кампактнaй геаметpії [Текст] / Л.Я. Минько, В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, А.М. кузьмицкий// Весці АН БССР. – 1986. Вып.2.– С.46-50.

26. Ananin, S.I. Generation of direct plasma flows [Текст] / S.I. Ananin, V.M. Astashinski, G.I. Bakanovich, E.A. Kostyukevich, A.M. Kuz'mitski, A.A. Man'kovski, L.Ya. Min'ko // 19 International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Contributed Papers. 1989. Belgrade. V.1. P.216 - 217.

27. Асташинский, В.М. Влияние характера развития разряда в МПК компактной геометрии на параметры компрессионного потока [Текст] / В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, Э.А. Костюкевич, А.М. Кузьмицкий, А.А. Маньковский, Л.Я. Минько // ЖПС. - 1989. - Т.50, № 6. - С. 887-891.

28. Асташинский, В.М. Интерференционно-Теневые исследования процессов в магнитоплазменном компрессоре [Текст] / В.М. Асташинский, В.В. Ефремов, Э.А. Костюкевич, А.М. Кузьмицкий, Л.Я. Минько // Физика плазмы. - 1991. - Т.17, № 9. - С. 1111 - 1115.

29. Асташинский, В.М. Выбор режимов работы и параметры плазмы магнитоплазменного компрессора [Текст] / В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, А.М. Кузьмицкий, Л.Я. Минько // ИФЖ. - 1992. - Т.62, № 3. - С. 386-390.

30. Astashinsky, V.M. Physical processes in quasistationary plasma accelerators with ion current transfer [Текст] / V.M. Astashynski, L.Ya. Min'ko // The Physics of Ionized Gases. Edited by N.Konjevic, M.Cuk and S.Djurovic. - Belgrade, 1999. - P.285-303.

31. Морозов, А.И. Принципы коаксиальных (квази)стационарных плазменных ускорителей (КСПУ) [Текст] / А.И. Морозов // Физика плазмы. – 1990. – Т. 16, № 2. – С. 131-146.

32. Ананин, С.И. Исследование процессов формирования плазменных потоков в квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе (КСПУ) [Текст] / С.И. Ананин, В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, Э.А. Костюкевич, А.М. Кузьмицкий, А.А. Маньковский, Л.Я. Минько, А.И. Морозов // Физика плазмы. - 1990. - Т. 16, № 2. - С. 186-196.

33. Асташинский, В.М. Исследование физических процессов, обуславливающих режимы работы КСПУ [Текст] / В.М. Асташинский, А.А. Маньковский, Л.Я. Минько, А.И. Морозов // Физика плазмы. - 1992. - Т. 18, № 1. - С. 90-98.

34. Волошко, А.Ю. Исследование двухступенчатого квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ) со стержневыми электродами [Текст] / А.Ю. Волошко, И.Э. Гаркуша, О.Э. Казаков и др. // Физика плазмы. – 1990. – Т. 16, № 2. – С. 158-167.

35. Волков, Я.Ф. Анализ параметров потоков плазмы, генерируемых полноблочным КСПУ Х-50 [Текст] / Я.Ф. Волков, Н.В. Кулик, В.В. Маринин и др. // Физика плазмы. – 1992. – Т. 18, № 11. – С. 1392-1402.

36. Морозов, А.И. Введение в плазмодинамику [Текст] / А.И. Морозов. - М.: Физматлит, 2006. - 576 с.

37. Ananin, S.I. Investigations of compression plasma flows in quasistationary plasma accelerators by interference-shadowgraphy methods [Текст] / S.I. Ananin, V.M. Astashynski, E.A. Kostyukevich, L.Ya. Min'ko // Problems of Atomic Science and Technology, 2000, N 3. Series: Plasma Physics (5), pp. 87-89.

38. Ананин, С.И. Интерферометрические исследования процессов в квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе [Текст] / С.И. Ананин, В.М. Асташинский, Э.А. Костюкевич, А.А. Маньковский, Л.Я. Минько // Физика плазмы. - 1998. - Т. 24, № 11. - С. 1003-1010.

39. Асташинский, В.М. Компрессия эрозионных плазменных потоков заданного состава в воздухе при атмосферном давлении [Текст] / В.М. Асташинский, Л.Я. Минько, А.А. Маньковский // ЖПС. - 1991. - Т.55, № 6. - С. 903- 905.

40. Асташинский, В.М. Формирование компрессионных эрозионных плазменных потоков заданного состава в плотных газах [Текст] / В.М. Асташинский // ЖПС. – 2000. - Т. 67, № 2. - С. 229-233.

41. Асташинский, В.М. Применение плазменных потоков квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя для упрочнения многопрофильных поверхностей различного состава [Текст] / В.М. Асташинский, А.А. Маньковский, Л.Я. Минько, Ю.А. Чивель // Материалы конференции "Физика и техника плазмы". - Минск, 1994. - Т.2. - С. 343-345.

42. Ananin, S.I. Modification of Multi-Profile Surfaces By Compression Plasma Flows Action of Quasistationary High-Current Plasma Accelerator [Текст] / S.I. Ananin, V.M. Astashynski, V.V. Astashynski, Yu.A. Chivel, E.A. Kostyukevich, L.Ya. Min'ko // Problems of Atomic Science and Technology, 2000, N 6. Series: Plasma Physics (6), pp. 152-154.

43. Astashynski, V.M. Plasma dynamic processes accompanying high energy compression flows interaction with surfaces [Текст] / V.M. Astashynski, M.M. Kuraica, J. Puric // The physics of ionized gases. Editors: N. Bibic, T. Grozdanov and M. Radovic. Publisher: Vinca Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia and Montenegro. - 2003. - P. 263-276.

44. Kuraica, M.M. Modification of solid surface by a compression plasma flow [Текст] / M.M. Kuraica, V.M. Astashynski, I. Dojcinovic and J. Puric // Physics of Laser Crystals. Editors J.-C. Krupa and N. Kulagin. Kluwer Academic Publishers. - 2003. - Chapter 16. - P. 245-255.

45. Kostyukevich, E.A. Capabilities of Optical Pressure Sensor in Plasma Experiment [Текст] / E.A. Kostyukevich // Abstracts of invited lectures and posters of the 4th Yugoslav-Belarusian Symposium on Physics & Diagnostics of Laboratory & Astrophysical Plasma, Belgrade, Yugoslavia, 2002. P. 18.

46. Углов, В.В. Структурно-фазовое состояние системы титан-сталь, облученной компрессионным плазменным потоком азота [Текст] / В.В. Углов, В.М. Анищик, Н.Н. Черенда и др. // Физика и химия обработки материалов, 2005, № 2. – С. 36-41.

47. Черенда, Н.Н. Модификация металлов и сплавов компрессионными плазменными потоками [Текст] / Н.Н. Черенда, В.В. Углов, В.М. Астапинский, Н.Т. Квасов // Сборник наук. работ НУК. – Николаев: НУК, 2009, № 3. – С. 72-82.

48. Углов, В.В. Элементный и фазовый состав системы цирконий/сталь, переменной воздействием компрессионных плазменных

потоков [Текст] / В.В. Углов, Н.Н. Черенда, Э.К. Стальношенок и др. // Физика и химия обработки материалов, 2007, № 1. – С. 40-45.

49. Черенда, Н.Н. Модификация структуры и механических свойств быстрорежущей стали Р18 при комбинированном плазменном и термическом воздействии [Текст] / Н.Н. Черенда, В.В. Углов, Н.В. Бибик и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011, № 3. – С. 107-112.

50. Квасницкий, В.Ф. Влияние модифицирования поверхностей с применением концентрированных пучков энергии на формирование соединений в твёрдой фазе [Текст] / В.Ф. Квасницкий, В.В. Квасницкий, Н.Н. Черенда и др. // Взаимодействие излучений с твёрдым телом: Материалы 9-ой междунар. конф. Минск, 20-22 сентября 2011 г. – Минск: Издательский центр БГУ, 2011. – С. 228-230.

51. Квасницкий, В.В. Перспективы применения радиационно-пучковых технологий при пайке материалов [Текст] / В.В. Квасницкий, В.Д. Кузнецов, В.Ф. Квасницкий и др. Там же. - С. 225-227.

52. Актуальные проблемы исследования физико-механических свойств материалов для сварных и паных конструкций / Г.М. Григоренко, В.В. Квасницкий, С.Г. Григоренко и др. // Зб. наук. праць НУК.– Миколаїв: НУК, 2009, № 5. – С. 78– 85.

53. Ефекти модифікації поверхні матеріалів потужним електронним пучком та її вплив на формування зварних з'єднань: Звіт про НДР (заключний). Національний університет кораблебудування, наук. кер. Квасницький В.Ф., відпов. викон. Квасницький В.В. – Миколаїв: НУК, 2010.– 132 с. (№ ДР 0109U007355. № Ф28/429 – 2009).

54. Котельников, Д.И. Сварка давлением в тлеющем разряде / Д.И. Котельников – М.: Металлургия, 1981. – 116 с.

55. Козаков, Н.Ф. Диффузионная сварка материалов / Н.Ф. Козаков.– М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						109
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

56. Люшинский, А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов / А.В. Люшинский. М.: изд. Академия, 2006.– 208 с.

57. Квасницкий, В.Ф. Исследование процессов взаимодействия металлических расплавов с жаропрочными материалами и их влияние на механические свойства неразъемных соединений // Адгезия расплавов и пайка материалов.– 1980, вып. 6. – С.99 – 106.

58. Квасницкий, В.В. Исследование диаграмм состояния систем на никелевой основе с цирконием и гафнием с целью создания припоев для пайки жаропрочных сплавов / В.В. Квасницкий, В.Ф. Хорунов // Технология судостроения и сварочного производства: Сб. научн. тр. УГМТУ, 1996. – С. 16 – 25.

59. Квасницкий, В.В. Создание порошковых композиций для заделки дефектов турбинных лопаток, выполненных из жаропрочных сплавов / В.В. Квасницкий // Технология судостроения и сварочного производства: Сб. научн. тр. УГМТУ, 1996. – С. 25 – 28.

60. Патент на винахід № 81583. Спосіб дифузійного зварювання матеріалів / В.В. Квасницький, М.В. Матвієнко, Г.В. Єрмолаєв, В.Ф. Квасницький, Б.В. Бугаєнко, В.Ю. Волошин. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. В 23К20/14. Заявл. 21.11.2006. Опубл. 10.01.2008. Бюл. № 1.

61. Патент на корисну модель № 847368. Спосіб дифузійного зварювання металів / М.М. Коваль, Ю.Ф. Іванов, В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, Л.І. Маркашова, М.В. Матвієнко Заявл. 31.08.2009. № u200909042. НПК (21009), В 23К 20/14. Опубл. 25.01.2010.

62. Патент на винахід № 93453. Спосіб дифузійного зварювання металів / В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, М.М. Коваль, Ю.Ф. Іванов, Ю.В. Бутенко. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 1323К 20/14. Заявл. 11.09.2009. Опубл. 10.02.2011.

63. Патент на винахід № 97607. Спосіб дифузійного зварювання металів / М.М. Коваль, Ю.Ф. Іванов, В.В. Квасницький, В.Ф. Квасницький, Л.І. Маркашова. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 1323К 20/14. Заявл. 11.09.2009. Опубл. 10.02.2011.

64. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей – Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 27с.

65. ДСТУ EN 175-2001 Засоби індивідуального захисту очей та обличчя під час зварювальних та споріднених процесів (EN 175:1997, IDT)

66. ДСТУ EN ISO 11611:2016 "Одяг захисний для використання під час зварювання та суміжних процесів" (EN ISO 11611:2015, IDT; ISO 11611:2015, IDT)

67. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

68. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.

69. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів.

70. ДСТУ 20549-75 «Дифузійне зварювання у вакуумі робочих елементів розділових та формотворчих штамів. Типовий технологічний процес»

71. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання)

72. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій, № 424/3717 від 30.06.1999 р.

73. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

					<i>ЗВ-з21мп.02.00.000ПЗ</i>	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		