

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ім. І.М.ФРАНЦЕВИЧА**

ГРЕЧАНЮК ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 621.791.72.03

**НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ НОВИХ
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ, КОБАЛЬТУ,
ТИТАНУ Й МІДІ ТА НОВІТНЬОГО ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ ОТРИМАННЯ**

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство
Технічні науки (13 - механічна інженерія)

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

Науковий консультант: Доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, м. Київ
Баглюк Геннадій Анатолійович

Офіційні опоненти: Член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Національного технічного університету України (КПІ), м.Київ
Лобода Петро Іванович

Доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України, м. Київ
Ладохін Сергій Васильович

Доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування Вінницького національного технічного університету, м.Вінниця
Савуляк Валерій Іванович

Захист відбудеться 5 квітня 2021 р. об 11:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.207.03 в Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України за адресою: Київ, вул. Кржижанівського, 3.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України

Автореферат розісланий 2 березня

Вчений секретар спеціалізованої ради Д26.207.03 к.т.н.



Хоменко О.В

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасного двигунобудування для авіації, ракетно-космічної техніки, суднобудування, енергетики висуває нові вимоги до підвищення надійності, збільшення ресурсу роботи і економічності газотурбінних двигунів (ГТД), що у свою чергу неможливо без активного розвитку матеріалознавства в області жаростійких і жароміцних сплавів і технології їх отримання. Надійна робота ГТД можлива при застосуванні матеріалів з високим рівнем службових характеристик і надійних захисних покриттів. Широке застосування в якості компонентів ГТД та високотемпературних захисних покриттів набули високолеговані сплави на основі Ni, Co або їх сумішей. Жароміцні сплави на основі нікелю експлуатуються при температурах від 700 до 1100 °С, сплави на основі кобальту - до 1000 °С, сплави на основі титану - до 600 °С. Температура експлуатації газотурбінних двигунів становить ~ 90% від температури плавлення складових суперсплавів. У сучасних літаках температура на вході у турбіну досягає 1750 °С. Для збільшення температури на вході у газову турбіну і, як наслідок, підвищення її ефективності необхідні нові матеріали. Тому, найважливіше значення у підвищенні температурного рівня сучасних жароміцних сплавів, їх надійності та довговічності надається освоєнню нових технологічних процесів.

У даний час у світі ведуться роботи зі створення нових титанових сплавів для виготовлення металевих біоінертних імплантатів з підвищеною міцністю при циклічних навантаженнях та корозійною стійкістю у фізіологічних середовищах придатних для використання у медицині. Для вироблення сплавів і сталей з необхідним комплексом властивостей необхідні лігатури різноманітного хімічного складу, що поєднують тугоплавкі та легкоплавкі метали. Необхідність отримання сплавів, матеріалів і покриттів з високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями потребує подальшого дослідження електронно-променевих процесів їх виробництва та створення й вдосконалення електронно-променевих технологій.

Останнім часом найбільш інтенсивно розвивається техніка плавки і випаровування металів і неметалів у вакуумі для отримання високочистих металів і сплавів, нанесення плівок, покриттів, формування конденсованих з парової фази композиційних матеріалів (ККМ) з використанням потужних (до 1 МВт і більше) електронно-променевих агрегатів при прискорюючій напрузі 20-30 кВ і невеликій концентрації потужності енергії (не більше 10^9 Вт / м²).

Електронно-променева плавка (ЕПП) є досить перспективним способом отримання зливок тугоплавких і хімічно високоактивних металів. Рафінування металів і сплавів при ЕПП відбувається внаслідок фракційної дистиляції, зневоднення, флоатації та коагуляції завдяки високій питомій поверхневій потужності у робочій плямі і наявності вакууму, який перешкоджає поглинанню газів у процесі плавки. Можливість керувати потужністю пучка у просторі та

часі дозволяє здійснити ряд варіантів процесу, які важко або неможливо провести іншими методами вакуумної металургії.

Осадження електронним пучком з парової фази плівок і покриттів (ЕВ-РVD) є похідним від методу ЕПП. ЕВ - РVD технологія постійно набирає репутацію і довіру у широкому діапазоні застосувань, включаючи жаростійкі, теплозахисні, термобар'єрні і зносостійкі тверді покриття. Значний прогрес використання технології ЕВ- РVD зумовлений трьома основними факторами: поступальним розвитком комп'ютерної техніки; поліпшенням вакуумної технології виробництва, вдосконаленням електронно-променевого обладнання. Багатошарові керамічні та металеві плівки, одержані методом ЕВ – РVD, широко використовуються при виробництві мікроелектронних компонентів. Останнім часом технологія ЕВ - РVD знайшла застосування при виробництві електричних контактів і електродів. Для цього використовуються відокремлені від підкладки товсті плівки (до 10 мм), що служать як контактні майданчики, які припаюються або приварюються до контактотримача.

Однак, практично всі технологічні процеси отримання нових матеріалів і покриттів методами плавки та високошвидкісного випаровування/конденсації реалізуються на обладнанні, яке було створено у кінці 20 століття. Як правило, формування зливків (слябів), осадження покриттів, отримання з парової фази композиційних матеріалів проводять у ручному режимі з використання недосконалих електронно-променевих гармат, які не забезпечують стабільність і відтворюваність того чи іншого технологічного процесу, і як результат, знижують експлуатаційні характеристики виробів з них.

У зв'язку із зазначеним актуальність роботи полягає в створенні нових матеріалів і покриттів з високими експлуатаційними властивостями завдяки розробці й удосконаленню електронно-променевих технологій. Для отримання сучасних матеріалів конструкційного та функціонального призначення необхідні новітні електронно-променеві технології плавки та випаровування металів і сплавів; конструювання та виготовлення нових зразків електронно-променевого обладнання з сучасними системами управління; застосування досконаліших електронно-променевих нагрівачів (гармат), які дають можливість прецизійно регулювати потужність електронного пучка і забезпечувати стабільність ведення технологічного процесу у напівавтоматичному та автоматичному режимах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами і планами.

Виконання дисертаційної роботи пов'язано з наступними темами: Розробка нових високоміцних контактних матеріалів на мідній основі і технологія їх виробництва, забезпечення підвищення ефективності та ресурсу роботи електродів контактних машин і мундшуків для підводу струму зварювальної апаратури (№ держреєстрації 0108U0001311) (2007-2011 р.р.); Ш-10-11 Проектування мікроструктури порошкових композиційних матеріалів на основі міді на стадіях виготовлення, обробки, оптимізації властивостей при використанні для комутаційної та зварювальної техніки (№011U002122) (2011-2013 р.р.); Ш-19-14 Оптимізація технології нанесення жаростійких покриттів,

отриманих за допомогою іонно-плазмового методу на установках МАП-1, МАП-2 (№0114U000228) (2014-2016 р.р.); Ш-21-16 Отримання композиційних порошків сплавів на основі Cu, Fe та Ti методами високошвидкісного та вибухового електронно-променевого випаровування-конденсації для авіаційної, електротехнічної та суднобудівної промисловості, в тому числі і для адитивних технологій (№ 0116U004768) (2016-2018 р.р.); Ш-12-19 Наукові та технологічні засади ресурсозберігаючих технологій для переробки відходів виробництва жароміцних складнолегованих нікелевих сплавів методами електронно-променевої плавки (2019-2021 р.р.).

Мета та завдання досліджень. Метою роботи є вирішення науково-технічної проблеми удосконалення та створення нових складнолегованих сплавів, композиційних матеріалів і виробів з них на основі нікелю, кобальту, титану і міді методами електронно-променевої плавки та високошвидкісного випаровування-конденсації. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання за головними напрямками досліджень:

1. Розробити і детально дослідити структуру, хімічний, фазовий склад, механічні характеристики нових матеріалів зливків, порошків і трубчатих катодів на основі сплавів Ni(Co)CrAlY(Si) для осадження захисних покриттів на лопатки газових турбін з використанням електронно-променевих технологій.
2. Вивчити структуру, хімічний, фазовий склад покриттів із матеріалів Ni(Co)CrAlY(Si), нанесених електронно-променевим та плазмовим методами. Визначити технологічні параметри формування зв'язуючого шару на межі метал/кераміка та встановити його хімічний склад.
3. Дослідити структуру, хімічний, фазовий склад та механічні характеристики сплавів системи TiZrNbSi медичного призначення, отриманих методом електронно-променевої плавки.
4. Дослідити структуру, хімічний, фазовий склад та фізико-механічні властивості кондиційних зливків, отриманих з відходів жароміцних сплавів ЖС26-ВИ методом електронно-променевого переплаву.
5. Отримати та дослідити хімічний склад лігатур Ni-Y, Hf-Ni, Ti-Zr, Al-Mo, V-Al, Nb-Ti, одержаних із компонентів з суттєво різною пружністю пари методом електронно-променевої плавки вихідних матеріалів.
6. Отримати високочисті сплави визначеного хмічного складу: Fe-Al; Fe-Co-Al-Ti-Cu; Ni-W, які використовуються для виготовлення затравок при вирощуванні монокристалічних лопаток.
7. Розробити конденсовані з парової фази композиційні матеріали на основі малолегованого сплаву на основі міді й молібдену додатково легованих хромом та нанодисперсною карбідною фазою.
8. Для отримання матеріалів і виробів, які складно або неможливо було одержати на експлуатованих у даний час установках, розробити конструкторську документацію і виготовити пілотні зразки лабораторного, промислового спеціалізованого й універсального електронно-променевого обладнання.

Об'єкти дослідження. Фізико-хімічні процеси отримання матеріалів, сплавів і покриттів методами електронно-променевої плавки та високошвидкісного випаровування-конденсації.

Предмет дослідження. Особливості структури, хімічного та фазового складу, що забезпечують високі фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалів і покриттів, отриманих методами електронно-променевої плавки та високошвидкісного випаровування-конденсації.

Методи дослідження. Оптична, растрова і електронна мікроскопія; рентгеноструктурний, мікрорентгеноспектральний, хіміко-аналітичний, спектроскопічний аналізи; визначення твердості, межі плинності, відносного подовження, межі міцності; ситовий аналіз фракційного складу порошків.

Достовірність отриманих у роботі результатів забезпечувалась застосуванням широкого комплексу фізико-хімічних і механічних методів дослідження та промисловою апробацією розроблених матеріалів у різних галузях промисловості.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Вперше показана характерна особливість структури сплавів на основі систем NiCrAlY та CoCrAlY, отриманих з використанням одностадійної технології електронно-променевої плавки, що полягає у відсутності у структурі сплаву дисперсних оксидних включень, які проявляються у складі аналогічних сплавів, отриманих за двостадійною технологією, яка включає попередню вакуумну індукційну плавку. Наявність вказаних оксидних домішок різко знижує якість покриттів, сформованих з таких матеріалів, за рахунок мікрокрапельного переносу оксидної фази у шар покриття. Відмічено також зниження вмісту шкідливих домішок у сплавах, отриманих за одностадійною технологією до рівня, % мас.: Fe<0,05; Cu< 0,05; C< 0,05; S< 0,02; P< 0,02; O< 0,08; N < 0,001; H< 0,0008.

2. За результатами дослідження особливостей структури та фазового складу жаростійких сплавів на основі систем NiCrAlY та CoCrAlY, отриманих електронно-променевою плавкою, встановлено, що переважною фазою у сплаві, % мас.: Ni - (20-24)Cr - (10-14)Al - (0,2-0,6)Y є β -фаза (NiAl). У складі сплаву присутні також ланцюгові і глобулярні виділення, характерні для γ' -фази (Ni₃Al) і невелика кількість сполук змінного складу на основі α -фази (Cr). До складу сплаву, % мас.: Co - (20-24)Cr - (10-14)Al - (0,2-0,6)Y входить основна інтерметалідна β -фаза (CoAl), а також присутні γ -фаза (CoCr) і α -фаза (Cr).

3. Вперше показано можливість отримання високоякісних порошків фракції 40-100 мкм з поліедричною формою часток із сплавів системи CoCrAlYSi з вмістом алюмінію 10 - 13 % мас., які характеризуються мінімальним окисненням (вміст кисню 0,05-0,09 % мас.) хрому, алюмінію й ітрію за рахунок використання технології подрібнення прокаткою на двовалковому вертикальному стані.

4. Вперше встановлено кінетичні закономірності формування зв'язуючого шару на межі метал/кераміка при нанесенні покриттів із сплавів

системи Ni(Co)CrAlY(Si) методом випаровування-конденсації. Показано, що після витримки попередньо нагрітих до 850 ± 30 °C лопаток над поверхнею керамічного матеріалу $ZrO_2-(6-8)\%$ мас. Y_2O_3 з температурою 2600 ± 50 °C протягом 10 хв. товщина зв'язуючого мікрошару не перевищує 1 мкм, тоді як збільшення часу витримки до 15 хв. призводить до збільшення товщини зв'язуючого мікрошару до 2 мкм. Встановлено, що у зв'язуючому мікрошарі присутні кисень, нікель та цирконій, що свідчить про утворення складних шпінелей у його складі.

5. Встановлено, що при нанесенні покриттів із сплавів системи Ni(Co)CrAlY(Si) методом випаровування-конденсації у металічному шарі елементи нікель, кобальт, хром і алюміній рівномірно розподілені в об'ємі покриття, що вказує на стабільність їх випаровування із сплаву і забезпечує відповідність фазового складу покриттів і вихідних сплавів.

6. Показана можливість отримання кондиційних жароміцних сплавів ЖС26-ВИ з їх відходів методом ЕПП і проведено порівняльний аналіз структури, хімічного, фазового складу та фізико-механічних характеристик сплаву, отриманого з відходів, із стандартним, який засвідчив, що за властивостями сплав, отриманий із відходів, не поступається матеріалу, виготовленому з вихідних компонентів.

7. За результатами дослідження особливостей структури, хімічного та фазового складу і механічних характеристик сплавів системи TiZrNbSi медичного призначення у широкому інтервалі концентрацій цирконію (1,9-15,2)% мас. та ніобію (11-20)% мас., встановлено оптимальний вміст складових сплаву, % мас.: Ti - (18-20)Nb - (1,9-2,2)Zr - (0,9-1,1)Si, що забезпечує найвищі механічні властивості у литому стані: межа міцності - 900-950 МПа, межа плинності - 840-890 МПа, подовження - 0,3-2,5%, модуль Юнга - 70-100 ГПа. Показано, що структура зазначеного сплаву, складається з первинних β -зерен, по межах яких розташована силіцидна фаза Ti_5Si_3 . У середині первинних β -зерен знаходиться дрібнодисперсна α -фаза з високодисперсними силіцидами, які виділилися по її межах.

8. Вперше показано можливість отримання методом електронно-променевої плавки лігатур Ni-Y; Al-Mo; V-Al; Nb-Ti; Zr-Ti; Hf-Ni із компонентів з суттєво різною пружністю пари та високочистих сплавів, % мас.: Fe - (3,9-4,5)Al; Fe - (35-37)Co - (1,2-1,8)Al - (0,3-0,7)Ti - (2,7-3,3)Cu; Fe - (35-37)Co - (3,2-3,8)Al - (0,3-0,7)Ti - (2,7-3,3)Cu і Ni - 33,1W для використання в якості затравок при вирощуванні монокристалічних лопаток газових турбін з мінімальним вмістом (до 0,001 - 0,08 % мас.) домішок, що у багатьох випадках більше як вдвічі нижче, у порівнянні з аналогічними матеріалами, одержаними іншими методами.

9. Вперше запропоновані нові оптимізовані склади композиційних матеріалів на основі системи (Cu-Cr-Zr-Y-Nb)-Mo-CuO-MoO₃ для розривних та (Cu-C-Zr-Y-Nb)-Mo-CuO-MoO₃ ковзних електричних контактів та нові технологічні підходи для їх виготовлення шляхом конденсації із парової фази, що включає одночасне випаровування з двох незалежних тиглів зливків сплаву

Cu-(0,2-0,41)% мас. Cr через ванну посередник (Cu-Zr-Y-Nb) і Mo. Встановлено, що оптимальне співвідношення характеристик міцності й пластичності композитів досягається при концентрації молібдену близько 11-13% мас. (межа міцності композитів становить 480-500 МПа, пластичність – 8-9%), із збільшенням вмісту молібдену пластичність матеріалів різко знижується і при концентрації останнього 30% мас. не перевищує 1- 2,5 %. Введення до складу матричного сплаву до 1,5 % мас. вуглецю призводить до істотного зменшення (у 3-4 рази) приведенного зносу і майже вдвічі - до зниження коефіцієнта тертя матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблена промислова технологія та проводиться виготовлення і постачання отриманих матеріалів CoCrAlY (згідно з ТУ У 27.4-20113410.002-2001, Зміни №3 від 06.10.2015) в Україні та КНР; порошків CoCrAlYSi – в Україні. Для КНР виготовляються експериментальні партії сплавів Fe-Al; Fe-Co-Al-Ti-Cu до США постачаються сплави TiZrNbSi.

Розроблена дослідно-промислова технологія переробки відходів, яка дозволяє відмовитись від закупівлі приблизно 20 % загального об'єму імпорту сплаву ЖС26-ВІ.

Для створення, удосконалення й виготовлення зазначених вище матеріалів і покриттів за участю автора розроблена конструкторська документація й виготовлені пілотні зразки електронно-променевого обладнання: універсальна лабораторна установка L-2 для плавки і рафінування металів та сплавів, нанесення захисних покриттів на лопатки турбін, отримання товстих (до 5 мм) відокремлених від підкладки конденсованих з парової фази композиційних матеріалів і порошків; промислова установка L-4 для плавки та рафінування металів і сплавів; промислова установка L-8 для осадження захисних покриттів на лопатки турбін; промислова універсальна установка L-8.3, яка має такі ж функції як L-2, але відрізняється вищою продуктивністю й оснащена газорозрядними гарматами. Відповідне обладнання поставлено у такі країни: L-2 - Україна, КНР; L-4 - Україна, Вірменія; L-8 – Англія.

Особистий внесок здобувача. Наведені у роботі результати досліджень були одержані безпосередньо автором або за його участю. Формулювання науково-технологічного напрямку, обґрунтування мети дослідження, постановка наукових задач, вибір об'єктів дослідження, розробка теоретико-технологічних підходів, розробка технологій отримання нових матеріалів здійснено здобувачем особисто.

Дослідження структури, мікрорентгеноспектрального та фазового аналізу складу нових матеріалів виконано автором у співпраці з колегами ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України д.ф-м. н., проф. Карпцем М.В. та ІПМ ім. В.М. Бакуля НАН України д.т.н., член-кор. НАН України Пріхною Т.О.

Розробка конструкторської документації, виготовлення пілотних зразків обладнання, відпрацювання технологічних режимів отримання зливків, порошків, лігатур, кераміки, композиційних матеріалів, визначення фізико-механічних характеристик виконані за безпосередньою участю здобувача у

співпраці з співробітниками НВП «Елтехмаш» Кучеренком П.П., Смашнюком Ю.О., Мельником А.Г., Любаренком М.П.

Узагальнення отриманих результатів, їх інтерпретація й висновки виконані здобувачем і обговорені з науковим консультантом д.т.н., проф. Баглюком Г.А.

Надруковані праці за темою дисертації виконані автором особисто та у співавторстві.

Дисертант висловлює щире подяку за допомогу при проведенні спільних досліджень: член-кор. НАНУ, д.т.н. Пріхні Т.О., д.ф.-м.н., проф. Карпцю М. В., член-кор. НАНУ, д.т.н. Гогаєву К.О., к.т.н. Мельнику В.І.

Апробація результатів дисертації. NATO Advanced research workshop “Fuel cell technologies: state and perspectives”, Kiev, 2004; “Turnatoria de la rigoarea tehnicii la arta, Artcast 2006”, Romania, 2006; 8 th International symposium of Croatian metallurgical society SHMD-2008, Sibenik, Croatia, (June 2008); Международная конференция «Електричні контакти та електроди», Україна, Крим, 2009; Tehnologi si material, Conferinta international, universitare ”Dunarea de Jos” Romania, 2009; 6 Международная конференция «Матеріали і покриття в екстремальних умовах: дослідження, застосування, екологічно чисті технології виробництва і утилізації виробів», Україна, Киев, 2010; 3-я Международная конференция «Hige Mat Tech» Україна, Киев, 2011; Форум «Металловедение и термическая обработка металлов. Композиционные материалы», Москва (январь), 2011; 10 th International symposium of Croatian metallurgical society SHMD-2006, Sibenik, Croatia (June), 2012; 11th International Conference on Electron Beam Technologies, Varna, Bulgaria (june 2014); Proceedings of 20 th World Congress on Materials Science and Engineering, Vienna, Austria (June 24-26) 2019; Modern achitvtmts of Science and Education, Israel 2018, 2019; Materials Science and Engineering, Austria, 2019; Science and Education, Hungary, 2019, 2020.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 47 наукових працях, у тому числі 25 публікацій надруковано у фахових журналах України та інших держав, з яких 17 статей - у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus, Web of science та ін.), 4-х публікаціях у інших виданнях, 3-х патентах на винахід України та у 15 публікаціях за матеріалами доповідей на конференціях.

Структура та об’єм дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 231 найменування і додатків. Обсяг основного тексту складає 10,9 аркушів, робота містить 84 рисунки, 49 таблиць, 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульована мета та завдання дослідження, які необхідно виконати для її досягнення, визначена наукова новизна і практична цінність результатів роботи та показано особистий

внесок здобувача. Наводиться також список публікацій і конференцій за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуто технології отримання високочистих металів і сплавів методами плавки, осадження покриттів на лопатки газових турбін, отримання масивних відокремлених від підкладки конденсованих з парової фази композиційних матеріалів.

Для реалізації вищезазначених технологій наведені різні конструкції лабораторного і промислового електронно-променевого обладнання. Зроблено їх порівняльний аналіз, наведено недоліки обладнання, які ускладнюють відтворюваність технологічних процесів і, як результат, знижують якість продукції.

Зазначено, що виплавка жароміцних сплавів методом електронно-променевої плавки (ЕПП) є досить складним технологічним процесом із-за різної пружності пари елементів, які входять до складу сплавів. У той же час ЕПП являється ефективним інструментом при переробці відходів жароміцних сплавів і отриманню з них кондиційних зливків для подальшого використання їх при литві лопаток газових турбін. Відмічена необхідність оптимізації даної технології з метою зменшення у зливках сплавів неметалічних включень сірки і фосфору.

Показано, що при отриманні жаростійких сплавів $(Me)CrAlY$, які у подальшому використовуються для нанесення покриттів, застосовуються послідовно вакуумно-індукційна плавка (ВІП) та ЕПП. Однак, використання дуплекс процесу: вакуумно-індукційна плавка і електронно-променевий перепплав не є оптимальним технологічним рішенням у зв'язку із забрудненням сплаву газами і неметалевими включеннями при первинному вакуумно-індукційному перепплаві. Виходячи із зазначеного, відмічена необхідність одержання матеріалів без подібних забруднень та розробки нової технології їх отримання.

Зроблено докладний аналіз сучасного стану отримання титану і сплавів на його основі методами ЕПП і описано сучасне промислове обладнання для отримання великотоннажних зливків чистого титану із титанової губки і відходів титану. Зазначено, що досить успішно проводяться роботи по створенню складнолегованих жароміцних сплавів на основі титану. Одним із перспективних напрямків для отримання титанових сплавів високої чистоти медичного призначення є використання ЕПП.

Докладно розглянуто сучасний стан в області осадження захисних покриттів на лопатки газових турбін і відзначено недоліки обладнання, які не дозволяють забезпечити стабільність технологічного процесу осадження покриттів.

На основі літературного огляду зроблено висновки щодо актуальності роботи, сформульована мета і завдання досліджень.

У другому розділі наведені вихідні матеріали для отримання експериментальних зразків сплавів, конденсованих з парової фази композиційних матеріалів та покриттів. Описано електронно-променеве

обладнання, що використовувалось для одержання дослідних партій зазначених матеріалів і технології їх отримання. Наведені методики дослідження структури, рентгенофазового та хімічного аналізів, фракційного складу і фізико-механічних характеристик отриманих матеріалів.

Третій розділ присвячений дослідженню структури, фазового, хімічного складу і фізико-механічних властивостей матеріалів сплавів Ni(Co)CrAlY, CoCrAlSi, трубчатих катодів і порошків, що використовуються для нанесення захисних покриттів, розробці промислових електронно-променевої технологій і обладнання для їх отримання.

Надійна робота ГТД можлива тільки при застосуванні матеріалів з високим рівнем службових характеристик і ефективних захисних покриттів.

У зв'язку з цим виникла необхідність розробки нових жаростійких сплавів Ni(Co)CrAlY з мінімальним вмістом в них газів і неметалевих включень для нанесення жаростійких покриттів на лопатки газових турбін. Запропоновані автором сплави Ni(Co)CrAlY, отримані за одностадійною технологією дозволила збільшити довговічність лопаток і виключити з технологічного циклу вакуумно-індукційний переплаву (ВП). Це стало можливим завдяки створенню за участю автора промислової електронно-променевої установки L-4 нового покоління для плавки металів і сплавів.

Сплави Ni(Co)CrAlY(Si) отримували на промисловій установці L-4 методом подвійного електронно-променевого переплаву (ЕПП) з використанням проміжної ємності. Хімічний склад одержаних сплавів відповідав ТУ (таблиця 1).

Таблиця – 1 Хімічний склад сплавів NiCrAlY і CoCrAlY після ЕПП

Сплав NiCrAlY (МЗП 6)	Зливкок (середина)					
	Ni	Cr	Al	Y	Fe	
	66,541 ±0,131	19,7 ± 0,071	13,107 ±0,152	0,525 ± 0,005	0,124 ±0,008	
Сплав CoCrAlY МЗП 1	Зливкок (середина)					
	Co	Cr	Al	V	Ni	Fe
	66,518 ±0,122	20,989 ± 0,067	12,013 ±0,141	0,396 ±0,005	0,043 ±0,07	0,041 ±0,011
продовження						
Сплав CoCrAlY МЗП 1	Зливкок (верх)					
	Co	Cr	Al	V	Ni	Fe
	65,51 ±0,118	22,419 ± 0,069	11,33 ±0,136	0,604 ±0,006	–	0,030 ± 0,011
продовження						
Сплав CoCrAlY МЗП 1	Зливкок (низ)					
	Co	Cr	Al	V	Ni	Fe
	65,82 ±0,117	22,294 ± 0,068	11,353 ±0,136	0,505 ±0,006	–	0,028 ±0,011

Вміст домішок в сплавах CoCrAlY, % мас.: Si < 0,05; Hf < 0,05; Zr < 0,05; Fe < 0,08; Cu < 0,05; C < 0,05; P < 0,02; S < 0,02.

Мікроструктура сплаву NiCrAlY досліджена за методом SEM COMPO наведено на рисунку 1, у таблиці 2 показаний хімічний склад сплаву в точках з цифрами і порядковими номерами місць аналізу, позначеними на рисунку 1.

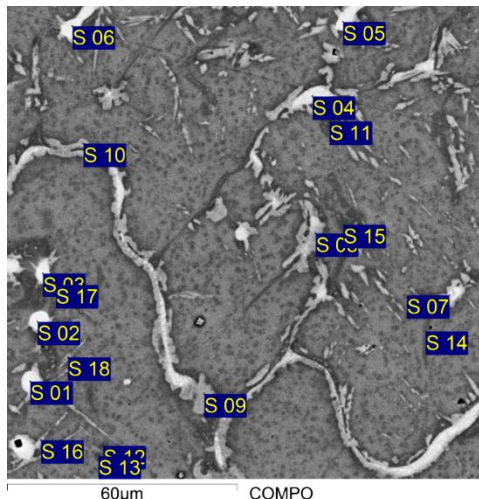


Рисунок 1 – Структури сплаву NiCrAlY (МЗП 6) з позначенням місць аналізу

Аналіз структури, наведеної на рисунку 1, вказує на те, що переважною фазою у сплаві є β -фаза (NiAl) (темне поле), ланцюгові і глобулярні виділення (світле поле) характерні для γ' - фази. У складі сплаву також присутня невелика кількість сполук змінного складу на основі хрому – α -Cr (таблиця 2, позиції 12, 15).

При введенні Al більш 5% мас. у сплавах виявляється зміцнююча γ' - фаза (Ni₃Al) і структура стає двофазною – $\gamma + \gamma'$. При вмісті алюмінію більше 8% мас. у сплаві утворюється β -фаза (NiAl).

Наведені у таблиці 2 данні свідчать про локальну неоднорідність розподілу компонентів сплаву у мікрооб'ємах зливка. Усереднені середньостатистичні відхилення розподілу елементів в об'ємі зливка коливаються у межах 1-1,2% мас.

Таблиця 2 – Результати мікрорентгеноспектрального аналізу сплаву NiCrAlY (МЗП 6), % мас.

S	Al	Cr	Ni	Y	S	Al	Cr	Ni	Y
Sum S	12,85	22,74	63,56	0,85	Sum S	12,85	22,74	63,56	0,85
S 01	7,02	10,42	67,75	14,81	S 10	10,03	20,91	69,06	
S 02	5,9	9,32	68,85	15,93	S 11	9,84	45,63	44,53	
S 03	6,43	10,35	66,53	16,69	S 12	4,76	62,73	32,51	
S 04	5,39	17,6	67,64	9,37	S 13	10,67	40,91	48,42	
S 05	6,28	11,2	66,56	15,95	S 14	10,65	42,89	46,46	
S 06	6,56	11,42	66,67	15,34	S 15	4,19	55,47	40,34	
S 07	5,72	11,29	67,61	15,39	S 16	13,24	12,47	74,29	
S 08	7,59	18,06	74,35		S 17	12,74	19,83	67,43	
S 09	5,71	26,51	67,77		S 18	12,91	16,95	70,14	

Параметри елементарних комірок сполук, які містяться у сплаві NiCrAlY, отримані шляхом обрахунку рентгенограм (рисунок 2) методом

Рітвельда, також показують, що основною складовою у сплаві є β – фаза (NiAl) (таблиця 3).

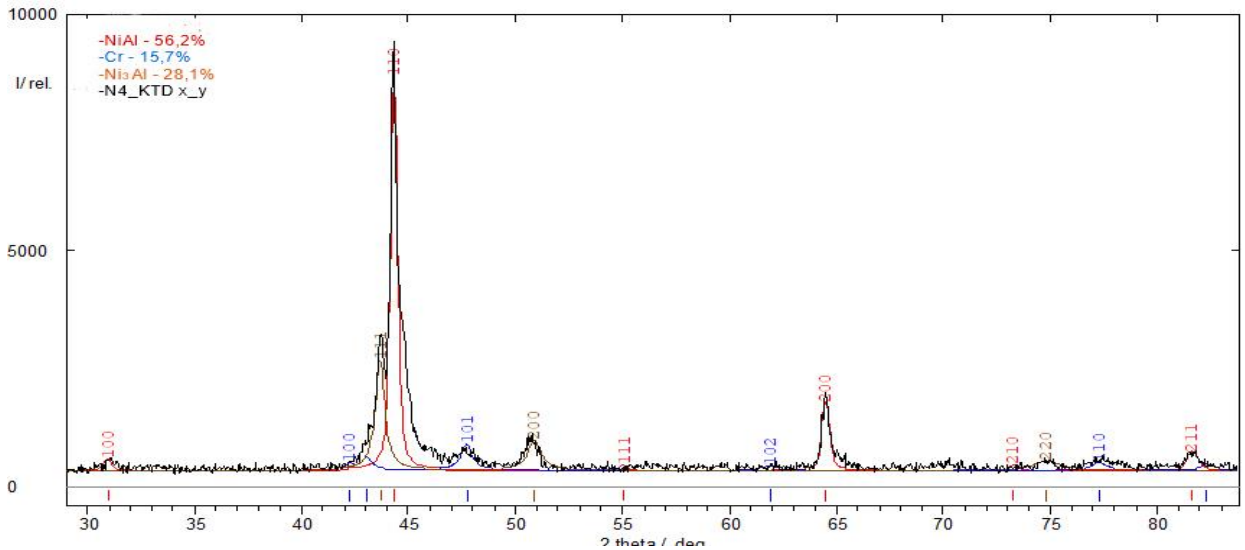


Рисунок 2 – Рентгенограма сплаву NiCrAlY, складу, % мас.: β -фаза (NiAl) – 56,2; α -фаза (Cr) – 15,7; γ' - фаза (Ni₃Al) – 28,1

Результати кількісного аналізу фаз (таблиця 3) підтверджуються картами розподілу елементів сплаву NiCrAlY (рисунок 3). Видно, що нікель і алюміній (рисунок 3, а, б світле поле) рівномірно розподілені в об'ємі β - фази (NiAl). Вміст хрому у ній мінімальний. Згідно з літературними даними, розчинність хрому у β - фазі (NiAl) при 20 °С складає 2,5% мас., а при 1445 °С - близько 10% мас.

Таблиця 3 – Параметри елементарних комірок сполук, які містяться у сплаві NiCrAlY

Зливок і ділянка зливка	Кількість фаз (% мас.) і параметри елементарних комірок (a, c), нм		
	β -NiAl	α -Cr	γ' -Ni ₃ Al
Середина	56,2 a = 0,2881	15,7 a = 0,2540 c = 0,4110	28,1 a = 0,3576

Розчинність хрому у γ' - фазі досягає 20% ат. Його більш високий вміст у γ' - фазі добре ілюструється на рисунку 3, в (світле поле). Ітрій в основному присутній у γ' - фазі (рисунок 3, г, світле поле) в областях з мінімальним вмістом хрому (таблиця 2, позиції 01-07).

У сплавах NiCrAlY при вмісті Al більше 5% мас. виявляється γ' – фаза. Залізо і вуглець у зазначеному сплаві практично відсутні (рисунок 3, д, ж). За даними спектрального аналізу їх концентрація у сплаві коливається від 0,038 до 0,06 % мас. і від 0,32 до 0,06 % мас. відповідно. Вміст азоту не перевищує 0,00109 % мас.

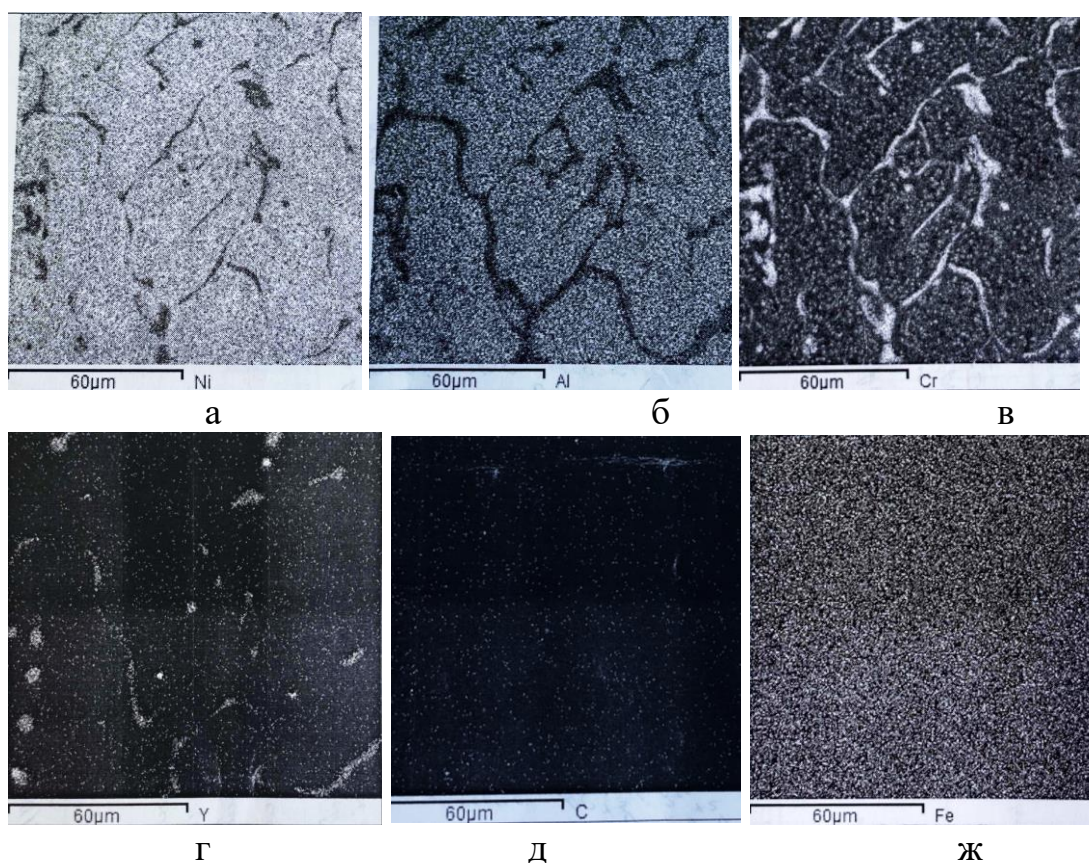


Рисунок 3 – Карти розподілу елементів у сплаві NiCrAlY

Наведені вище результати досліджень структури, хімічного, мікрорентгеноспектрального і фазового аналізів сплавів NiCrAlY свідчать про високу якість виплавлених зливків.

Залежно від умов експлуатації турбін, у першу чергу від температури газового потоку, виду використовуваного палива, насиченості повітря пиловими частинками або солями морської води для антикорозійного захисту лопаток застосовуються покриття із матеріалів різного складу.

Запропоновані автором осаджені у вакуумі покриття із матеріалів CoCrAlY на лопатках газотранспортних установок (ГТУ) можуть працювати 200 000 годин, тоді як плазмово осаджені покриття CoCrAlY працюють лише 40 000 годин. Сплави CoCrAlY(Si), які використовуються для нанесення покриттів на лопатки ГТ, отримували методом ЕПП за технологією, яка використовувалась при виробництві сплавів NiCrAlY. Усереднений хімічний склад матеріалів CoCrAlY(Si), отриманих ЕПП відповідно до ТУ, наведений у таблиці 4.

Таблиця 4 – Хімічний аналіз матеріалів сплавів CoCrAlY(Si), отриманих ЕПП

Компоненти, % мас.							Домішки, % мас.				
Позначення	Co	Ni	Cr	Al	Y	Si	Hf	Zr	Fe	Cu	C
МЗП I	осн	0–2	20–24	10–13	0,4–1	до 0,5	до 0,2	до 0,4	до 0,3	до 0,06	до 0,06

МЗП 11	осн	0,2	20– 25	10– 13	0,4–1	1,5–4	до 0,2	до 0,4	до 0,3	до 0,06	до 0,04
-----------	-----	-----	-----------	-----------	-------	-------	-----------	-----------	-----------	------------	------------

Структура сплаву CoCrAlY досліджувалась на різних ділянках зливка діаметром 70 мм і довжиною 300 мм. Типова структура сплаву представлена на рисунку 4 (нижня частина зливка), а дані мікрорентгеноспектрального аналізу у точках, зазначених на рисунку 4, наведені у таблиці 5.

З рисунку 4 видно, що переважаючою фазою у сплаві є інтерметалідна β -фаза (CoAl) (темне поле) і γ -фаза твердого розчину CoCr, збідненого алюмінієм (світле поле), що підтверджується результатами мікрорентгеноспектрального аналізу у точках позиції 07-12 (таблиця 5), зазначених на рисунку 4, картою розподілу елементів у сплаві наведеною на рисунку 5 і рентгенограмою нижньої частини отриманого зливка CoCrAlY (рисунок 6).

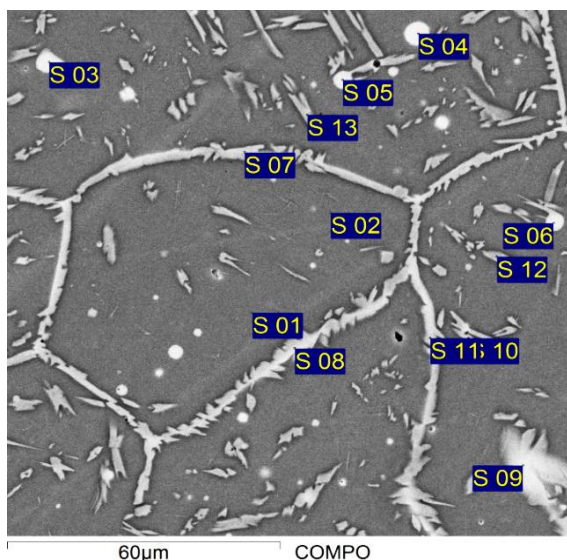


Рисунок 4 – Зображення структури сплаву CoCrAlY (нижня частина зливка) з позначенням порядковими номерами місць аналізу

Таблиця 5 – Мікрорентгеноспектральний аналіз сплаву CoCrAlY, %, мас.

S	Al	Cr	Co	Y
Sum S	10,22	23,85	65,91	
S 01	10,16	24,35	65,49	
S 02	10,33	24,14	65,53	
S 03	5,63	15,71	66,55	12,11
S 04	5,93	13,76	67,19	13,12
S 05	5,72	15,95	65,57	12,76
S 06	5,67	15,64	66,38	12,31
S 07	4,79	22,91	67,1	5,2
S 08	5,17	20,34	65,36	9,13
S 09	5,14	18,59	66,29	9,98
S 10	4,8	26,91	67,88	0,41
S 11	4,44	22,66	66,49	6,41
S 12	4,63	27,35	68,02	
S 13	5,08	26,39	67,41	1,12

Визначено, що шкідливі домішки вуглецю і кисню у сплаві CoCrAlY практично відсутні.

Якісно подібні результати отримані при дослідженні структури верхньої і середньої частини по довжині зливка сплаву CoCrAlY.

У нижній частині зливка в результаті того, що відбувається інтенсивна кристалізація зливка безпосередньо у мідному водоохолоджуваному кристалізаторі, утворюється β -фаза, γ -твердий розчин на основі кобальту і твердий розчин на основі хрому α -хром. Результати кількісного аналізу виявлених фаз, отримані шляхом обрахунку рентгенограм методом Рітвельда, і параметри решіток виявлених фаз наведені у таблиці 6.

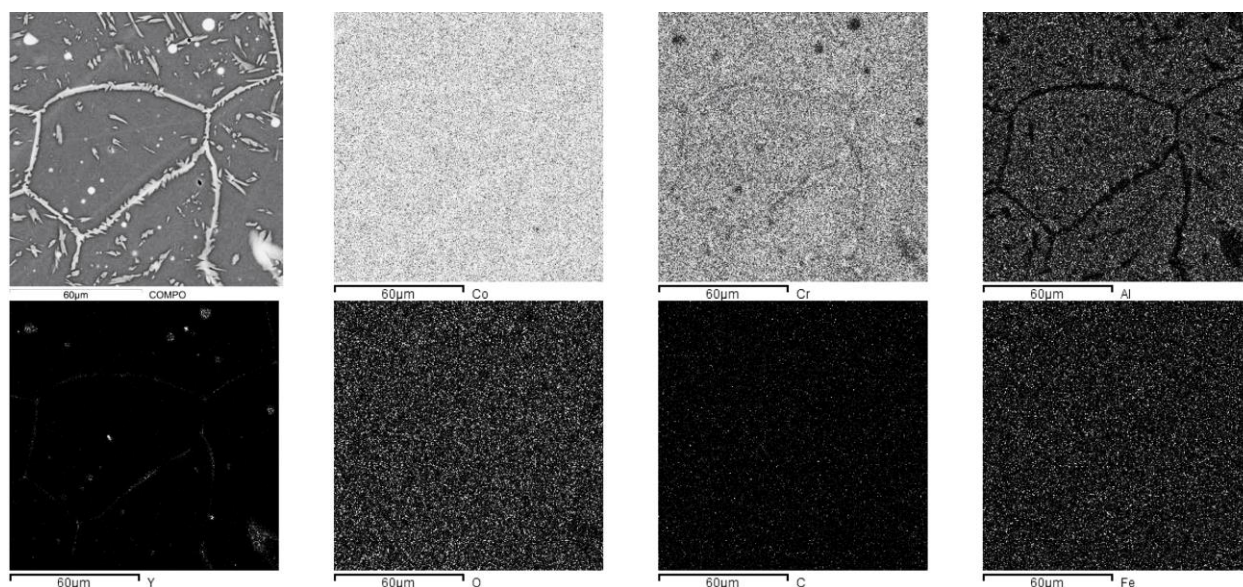


Рисунок 5 – Карта розподілу елементів у сплаві CoCrAlY

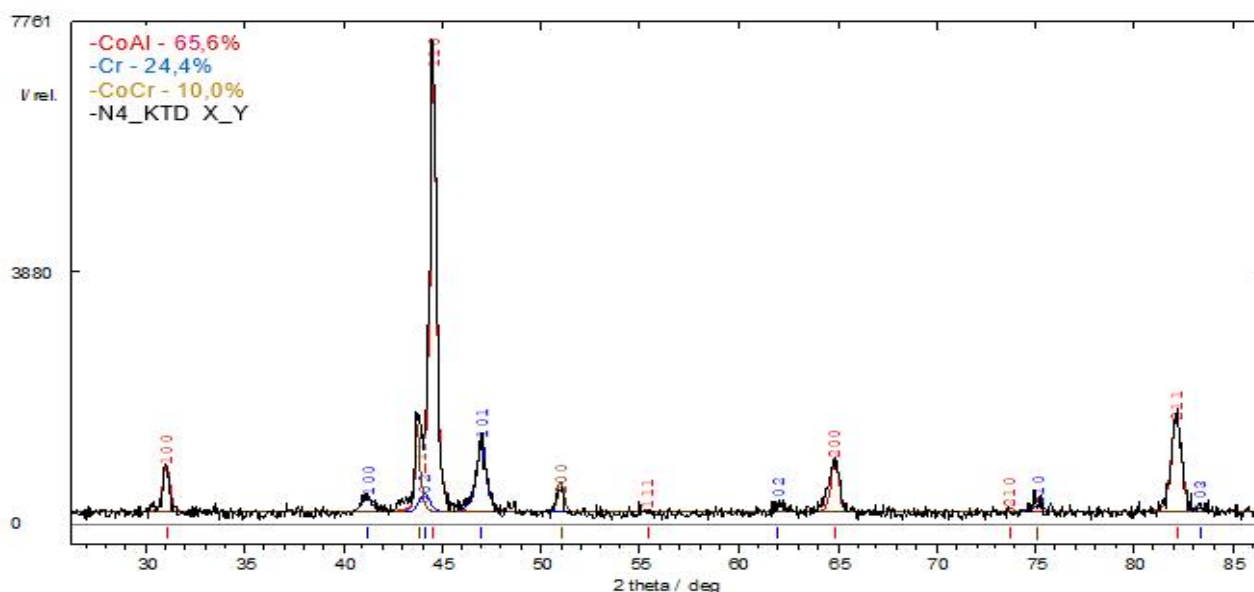


Рисунок 6 – Рентгенограма нижньої частини отриманого зливка CoCrAlY, складу, % мас.: β -CoAl – 65,6; α -Cr – 24,4; γ -CoCr – 10,0

Таблиця 6 – Кількісний аналіз фаз і параметри елементарних комірок фаз в об'ємі зливка CoCrAlY

Зливок і ділянка зливка	Кількість фаз, % мас., параметри елементарних комірок а с, нм		
	β -CoAl	α -Cr	CoCr
Низ	65,6 а = 0,2872	24,4 а = 0,2527 с = 0,4090	10 (γ -CoCr) а = 0,3576
Середина	62	24	14 (γ -CoCr)

	a = 0,2881	a = 0,2540 c = 0,4110	a = 0,3576
Верх	20 a = 0,2880	73 a = 0,2542 c = 0,4103	7 (σ -CoCr) a = 0,8693 c = 0,4482

У верхній частині зливка присутня σ - фаза (CoCr), яка, як правило, утворюється у матеріалах з підвищеною концентрацією хрому до 26-27% мас. і вмістом алюмінію до 9-10% мас. Подібні ситуації можуть виникати з огляду на особливості плавки у вакуумі складнолегованих сплавів, що містять елементи з відносно низькою пружністю пари (Cr, Al), а також зміною умов кристалізації верхньої частини зливка і його охолодження внаслідок збільшення об'єму закристалізованого металу.

Особливістю установок, які використовуються на сьогодні для ЕПП сплавів є застосування електронних гармат із стрічковим вольфрамовим катодом з ресурсом роботи катода 50-100 годин і робочим вакуумом не менше 10^{-2} Па. Однією з головних вимог, які висуваються до електронних гармат для плавильних установок, є можливість стабільно працювати в умовах інтенсивного газовиділення при плавці різних шихтових матеріалів, у тому числі і губчастих.

Найбільш перспективними для зазначених цілей у даний час представляються гармати високовольтного тліючого розряду, які є практично незамінними у випадках, коли технологічний процес вимагає обробки розплаву з газовими або парогазовими сумішами.

Отримувати високоякісні зливки і сляби необхідного хімічного і фазового складу з високореакційних і тугоплавких металів, жаростійких і жароміцних сплавів, а також інтерметалідів Ti_3Al , $TiAl$, Ni_3Al , $NiAl$ й інших дає можливість розроблена за участю автора промислова електронно-променева установка нового покоління L-4 для рафінування та виплавки металів і сплавів з використанням в якості джерела нагріву гармати з холодним катодом (газорозрядні) з ресурсом роботи катода більше 1000 годин.

Схема робочої камери і технічні параметри установки L-4 наведені на рисунку 7 і у таблиці 7.

Конструкція установки дозволяє проводити переплав як безпосередньо у кристалізатор, так і з використанням проміжної ємності. Рівень ванни розплаву підтримується витягуванням нижньої частини закристалізованого зливка.

Таблиця 7 – Технічні характеристики електронно-променевої установки L-4

№	Параметр	Значення
1	Максимальний розмір заготовок, що переплавляються мм	200×200×1500
2	Максимальний розмір виплавленого зливка, мм	∅300×1900
3	Максимальний розмір виплавленого сляба, мм	200×300×1900

4	Розміри кристалізаторів, що входять у комплект установки, мм	ø70, ø100, ø130 200×300
5	Розміри поверхні рідкої ванни металу у проміжній ємності, мм	300×300
6	Кількість і максимальна потужність електронних нагрівачів, n × кВт	4×100
7	Максимальний струм гармати, А	3,3
8	Номинальна робоча прискорююча напруга, кВ	30
9	Споживана потужність, кВт, не більше - джерелами живлення електронних гармат - допоміжним обладнанням	400 60
10	Вакуум у робочій камері, Па, в межах:	$1,3 \times 10^{-2} \div$ $1,3 \times 10^{-1}$
11	Тиск охолоджувальної води, Па, в межах	$3 \times 10^5 \div 4 \times 10^5$

Матеріали, що переплавляються, можуть бути у вигляді зливків, кускової шихти, стрижнів і різних відходів, наприклад, пресованої стружки.

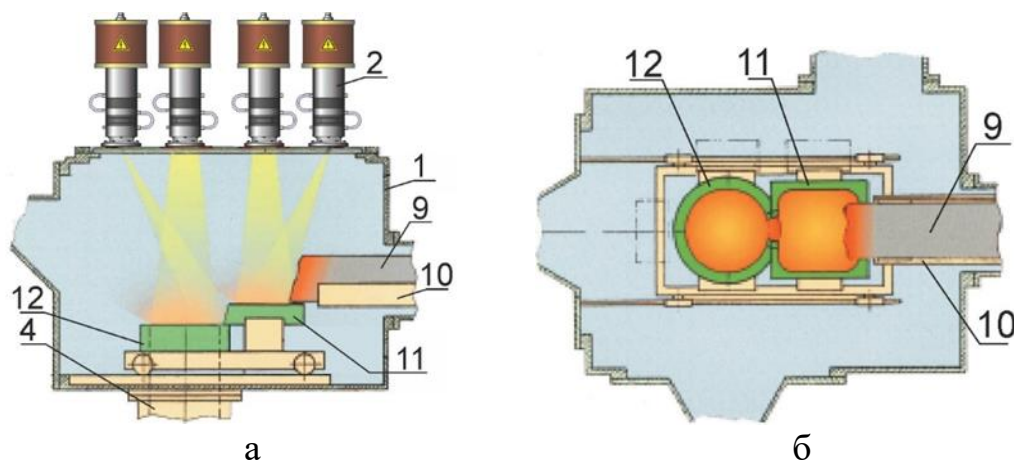


Рисунок 7 – Схема робочої камери: вид спереду (а); вид зверху (б): (1 - робоча камера; 2 - електронні гармати; 4 - механізм витягування зливка; 9 - матеріал, що переплавляється; 10 - висувний лоток; 11 - проміжна ємність; 12 – кристалізатор)

Для нанесення покриттів із CoCrAlY та інших сплавів, керамічних, композиційних, одношарових, багатошарових, градієнтних і т.п. за участю автора була також розроблена конструкторська документація і виготовлено пілотний зразок промислової електронно-променевої установки Л-8 нового покоління, яка дозволяє вести технологічний процес у ручному, напівавтоматичному і автоматичному режимах.

Відмінними рисами запропонованого автором обладнання є застосування газорозрядних гармат і можливість нанесення всіх типів і конструкцій захисних покриттів. Складні за своїм хімічним складом і конструкцією термобар'єрні покриття (ТБП) на лопатках газових турбін з довжиною пера до 500 мм і

діаметром до 300 мм можуть бути сформовані на даній установці за один технологічний цикл. Продуктивність установки становить до 60 тисяч на рік лопаток, які покриваються.

Високу ефективність при формуванні якісного захисного шару, що наноситься на матеріал лопаток, показав іонно-плазмовий метод з застосуванням в якості катодів трубчатих литих заготовок, виготовлених з високочистих сплавів NiCrAlY. У зв'язку з цим за участю автора освоєна технологія виробництва трубчатих катодів із сплавів NiCrAlY (МЗП 6) отриманих методом електронно-променевої плавки.

Виплавку трубчатих заготовок із сплавів МЗП 6 здійснювали у два етапи на електронно-променевої установці L-4. На першому етапі готували зливки сплавів МЗП 6 за зазначеною вище технологією у вигляді циліндричних заготовок діаметром 100 мм і довжиною 250 - 300 мм, складу, % мас.: Cr – 18-24, Al – 11-14, Y – 0,4-1, Ni – основа.

Для проведення плавки на другому етапі у робочій камері установки L-4 монтували спеціально розроблений тигельний пристрій для виплавки трубчатих заготовок (рисунок 8).

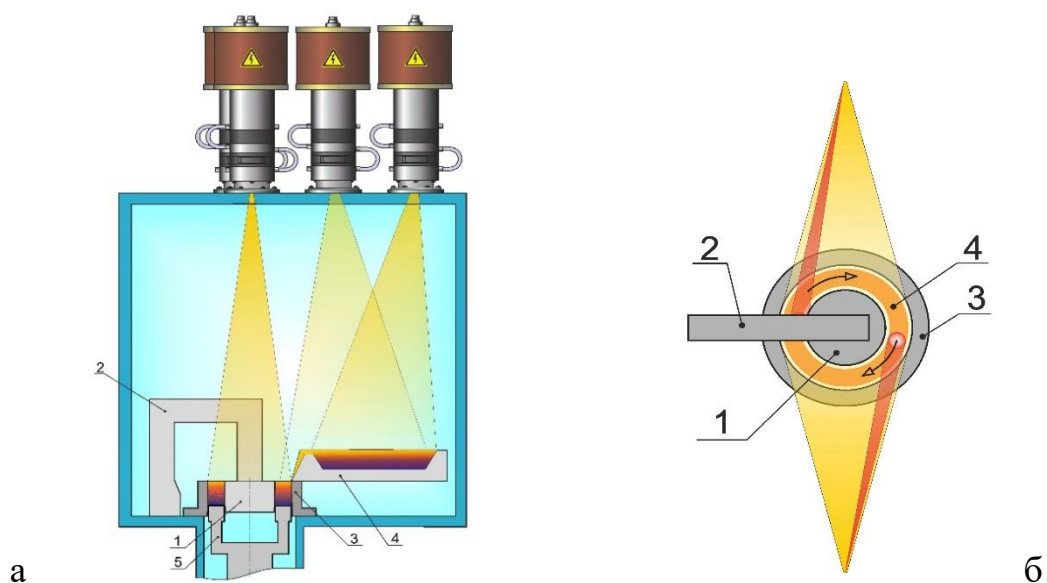


Рисунок 8 – Схема конструкції пристрою для отримання трубчатої заготовки методом ЕПП (а); схема виду зверху нагріву розплаву ванни двома електронними гарматами з розгорткою променів у формі півкілець (б): (1 – водоохолоджуваний дорн, 2 - траверса; 3 - водоохолоджуваний тигель; 4 - проміжна ємність; 5 - водоохолоджуваний шток з хвостовиком)

Нагрівання поверхні металу у кристалізаторі здійснювали за допомогою двох електронних гармат (рисунок 8, б). Промені гармат сканували за заданою програмою (частота сканування 50 Гц, струм по кожній гарматі 0,8 - 1 А), формуючи дві зони нагріву у формі дотичних півкілець (рисунок 8, б). Трубчата заготовка з зовнішнім і внутрішнім діаметрами $D_{\text{зовн}} = 198$ мм, $D_{\text{внутр}} = 114$ мм і довжиною $L = 358$ - 360 мм формувалася протягом 240 - 250 хв.

Фазовий склад матеріалу заготовок, визначений на дифрактометрі ДРОН-4 зійомкою в $\text{Cu-}\alpha$ -фільтрованому випромінюванні у діапазоні кутів $2\theta = 20-100$ град з використанням кремнію в якості еталону, показав, що основними складовими матеріалу МЗП 6 є жаростійкі β -фаза (NiAl) і γ' -фаза (Ni_3Al), а також α -твердий розчин на основі хрому (рисунок 9).

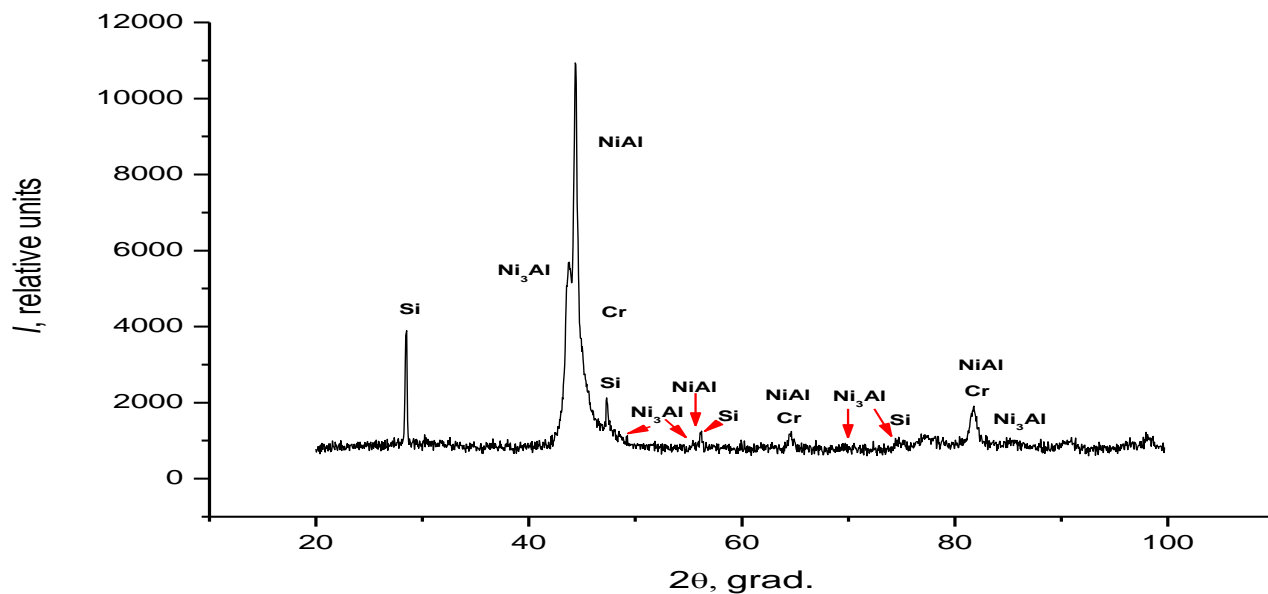


Рисунок 9 – Фазовий склад трубчатої заготовки із сплаву МЗП 6

Структура сплаву МЗП 6 характеризується плавним переходом від дрібнозернистої у зонах, прилеглих до охолоджуваних поверхонь дорна і кристалізатора, до крупнозернистої, що формується у центральних областях зливка (рисунок 10).

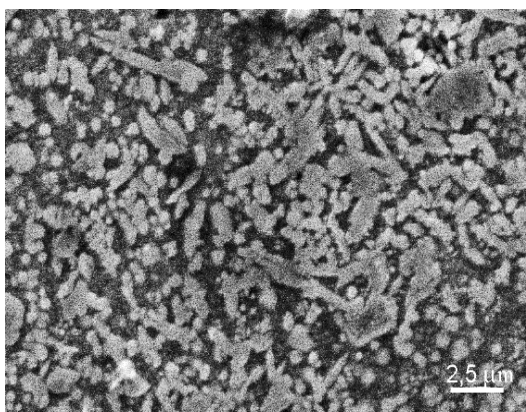


Рисунок 10 – Мікроструктура литих трубчатих заготовок із сплаву МЗП 6

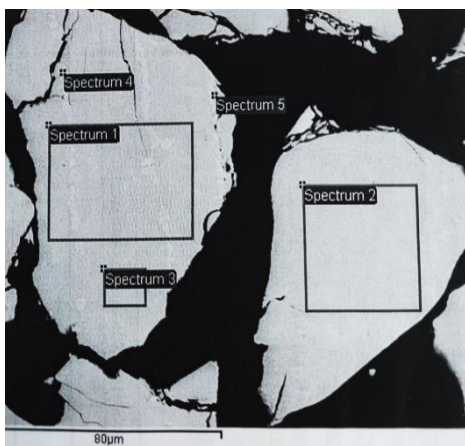
У АТ «Мотор-Січ» були проведені експериментальні роботи по оцінці можливості застосування дослідних катодів, отриманих ЕПП. У порівняльних дослідженнях з нанесення покриттів на поверхню лопаток використовували два катода із сплаву МЗП 6, отриманого ЕПП, і один серійний зразок аналогічного складу із сплаву марки СДП 2. Установка з трубчатим катодом, отриманим методом ЕПП, працювала стабільно, всі технологічні параметри відповідали параметрам серійної технології.

За участю здобувача розроблений сплав CoCrAlYSi з наступним вмістом компонентів, % мас.: Co - основа; Cr - 24,25; Al - 11,56; Si - 3,8; Y - 0,44 (МЗП-11). Зазначений сплав використовується при виготовленні порошку для плазмового нанесення покриттів.

На першому етапі отримання порошку з матеріалу CoCrAlYSi застосовували метод пресового подрібнення великих кусків зливків, який дозволяє подрібнювати матеріал розміром від 200 мм. Після подрібнення матеріалу на пресі і поділу його за фракціями процес помелу здійснюється на вертикальному двовалковому прокатному стані. При подрібненні матеріалу до розмірів частинок менше 1,6 - 2 мм помел на прокатному стані проводився із зволоженням порошку етиловим спиртом, оскільки змочування етиловим спиртом запобігає процесу окиснення за рахунок пасивації поверхні частинок порошку. Отриманий порошок розділяли на фракції.

При використанні розробленої технології отримання порошку із сплаву CoCrAlYSi вихід фракцій 40-100 мкм складає 68 -72%, тоді як при розпиленні – 50-60%. Енерговитрати майже у 7 разів нижчі у порівнянні з витратами при використанні традиційних методів (дробарки, млини) та до 20 разів менші у порівнянні з методами розпилення. Незворотні втрати матеріалу CoCrAlYSi не перевищують 3,0% мас.

Загальний вигляд порошків сплаву CoCrAlYSi з позначенням точок визначення хімічного складу і результати мікрорентгеноспектрального аналізу порошків сплаву CoCrAlYSi наведені на рисунку 11 і у таблиці 8.



Таблиця 8 – Мікрорентгеноспектральний аналіз порошку сплаву CoCrAlYSi

S	Al	Si	Cr	Fe	Co	Mo	W
S 1	11,77	2,49	24,39	1,04	59,41	0,55	0,36
S 2	8,56	0,11	28,09		62,34	0	0,9
S 3	12,14	1,29	22,98	0,93	61,12	0,45	0,5
S 4	2,45	3,64	41,45	0,94	50,64	0,58	0,29
S 5	3,07	3,07	30,18	1,11	61,07	0,54	0,35

Рисунок 11 – Загальний вигляд порошку сплаву CoCrAlYSi з позначенням точок визначення хімічного складу (верхній лівий кут прямокутників)

Частинки порошку досить однорідні за розмірами і мають поліедричну форму, близьку до округлої (рисунок 12, а, б).

Мікроструктура окремих гранул порошку сплаву CoCrAlYSi практично аналогічна структурі сплаву CoCrAlYSi після електронно-променевого переплаву (рисунок 12, в). У структурі порошку сплаву CoCrAlYSi переважною є β - фаза (CoAl) (темне поле) з голчастими включеннями різної довжини γ - фази (твердого розчину на основі кобальту).

Присутній також α -хром (твердий розчин на основі хрому), що підтверджується результатами мікрорентгеноспектрального аналізу (рисунок 11, таблиця 8, позиція S 4).

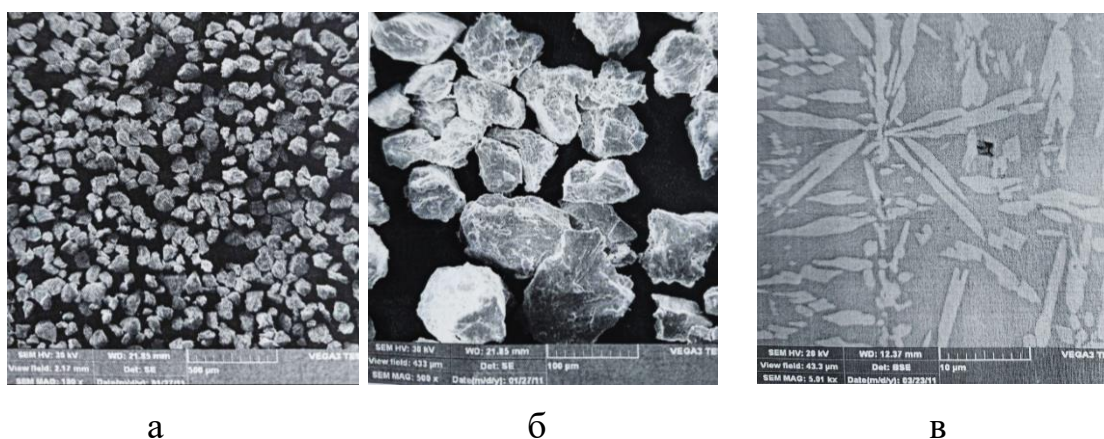


Рисунок 12 – Форма окремих гранул порошку при різних збільшеннях: 300 μm (а); 100 μm (б); та мікроструктура порошку 10 μm (в)

Вміст ітрію у порошку коливається у межах від 0,38 до 0,52% мас. Подрібнення сплаву приводить до деякого підвищення кисню із 0,05% мас. для сплаву CoCrAlYSi до 0,08 -0,09% мас. для порошку сплаву CoCrAlYSi фракційного складу 40 -100 мкм.

У розділі 4 досліджені структура, хімічний, фазовий склад і фізико-механічні властивості спеціальних сплавів, лігатур і кондиційних зливків сплаву ЖС26-ВИ, отриманого з відходів зазначеного матеріалу та розроблені дослідно-промислові технології їх отримання.

Автором одержані складнолеговані сплави TiNbZrSi методом електронно-променевої плавки, які використовуються у медичній галузі.

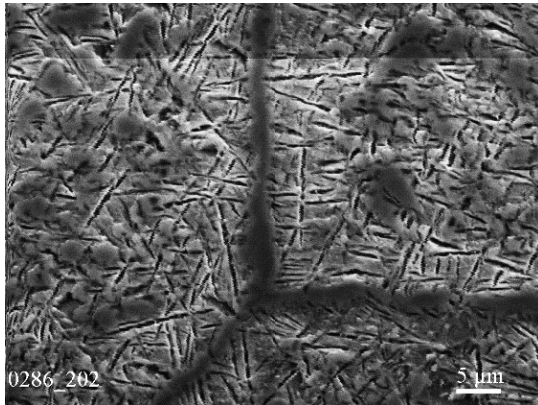
Електронно-променевою плавкою вихідних матеріалів здійснювали у проміжній ємності. Отримані заготовки після подвійного переплаву сплавляли у мідний водоохолоджуванний тигель. Таким чином, були одержані 10 зливків сплавів довжиною 640-650 мм і діаметром 60 мм (таблиця 9).

Таблиця 9 – Хімічний склад сплавів на основі титану, % мас.

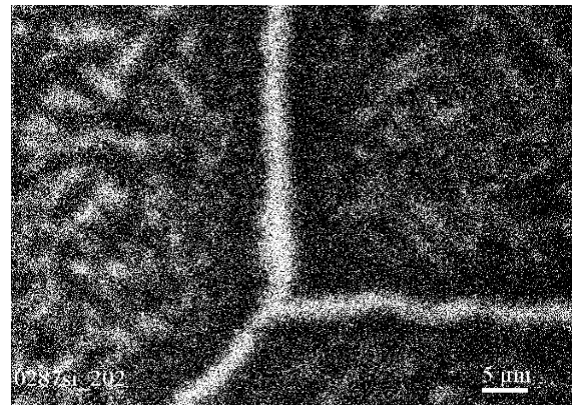
№	Ti	Nb	Si	Zr	№	Ti	Nb	Si	Zr
1	осн.	11-13	0,9–1,1	1,9 – 2,2	6	осн.	18-20	0,9–1,1	1,9 – 2,2
2	осн.	11-13	0,9–1,1	3,9 – 4,2	7	осн.	18-20	0,9–1,1	3,9 – 4,2
3	осн.	11-13	0,9–1,1	5,9 – 6,2	8	осн.	18-20	0,9–1,1	5,9 – 6,2
4	осн.	11-13	0,9–1,1	9,9 –10,2	9	осн.	18-20	0,9–1,1	9,9 –10,2
5	осн.	11-13	0,9–1,1	14,8-15,2	10	осн.	18-20	0,9–1,1	14,8 –15,2

Дослідження механічних властивостей отриманих 10 зразків сплавів системи TiNbZrSi у литому стані показали, що механічні характеристики сплаву №1 вищі у порівнянні з іншими і знаходяться у діапазоні: межа міцності - 900-950 МПа, межа плинності - 840-890 МПа, подовження - 0,3-2,5%, модуль Юнга - 70-100 ГПа. Структура сплаву Ti (18-20)Nb (1,9-2,2)Zr (0,9-1,1)Si, наведеного на рисунку 13, а, складається з первинних β -зерен, по межах яких розташована силіцидна фаза Ti_5Si_3 . У середині первинних β -зерен знаходиться дрібнодисперсна α -фаза з високодисперсними силіцидами, які виділилися по її

межах. На рисунку 13, б наведено розподіл силіцію у характеристичному випромінюванні SiK_α .



а



б

Рисунок 13 – Мікроструктура сплавів $\text{Ti}(18-20)\text{Nb}(1,9-2,2)\text{Zr}(0,9-1,1)\text{Si}$ (а); розподіл силіцію у випромінюванні SiK_α (б)

Запропонована автором схема виплавки сплавів системи TiNbZrSi з застосуванням прямокутної розгортки променю по периметру проміжної ємності дозволила отримати однорідні за структурою і хімічним складом по довжині зливки високої якості.

У цьому розділі показана також можливість отримання лігатур, які містять у своєму складі алюміній, титан, тугоплавкі і рідкоземельні елементи. Необхідність отримання лігатур різного складу Ni-Y , Hf-Ni , Al-Mo , V-Al , Zr-Ti , Nb-Ti виникла у зв'язку з тим, що якість лігатур, які використовуються на сьогодні для виплавки спеціальних сплавів, не завжди відповідає сучасним вимогам.

Плавку лігатур здійснювали на електронно-променевої плавильній установці L-4. Принципова схема виплавки всіх лігатур однакова (рисунок 14).



Рисунок 14 – Загальний вигляд пристрою для плавки лігатур

Плавки лігатур проводили за двостадійною технологією з використанням бічного механізму подачі заготовок для вторинного переплаву. Переплави здійснювали у проміжній ємності. Таким чином

були отримані лігатури різного складу (таблиця 10). Якість отриманих лігатур відповідає технічним умовам для виплавки жароміцних сплавів. Встановлено, що кількість контрольованих у лігатурах Ni-Y ; Al-Mo ; V-Al ; Nb-Ti ; Zr-Ti ; Hf-N і домішок Zn , Cd , Sn , Fe , Si , C , N , O не перевищує, % мас.: 0,001; 0,001; 0,01;

0,15; 0,12; 0,05; 0,0008; 0,05 відповідно, що в багатьох випадках більше як вдвічі нижче, у порівнянні з аналогічними матеріалами, одержаними іншими методами.

Таблиця 10 – Хімічний склад лігатур, % мас.:

Нікель – ітрій					Алюміній – молібден		
№	Ni	Y	Fe	Si	№	Al	Mo
1	основа	10,5-12,0	до 0,1	до 0,05	1	основа	45,0-55,0

Ванадій - алюміній							Ніобій - титан				
№	V	Al	Nb	Fe	Ni	Mo	№	Nb	Ti	Fe	Zr
3	61,7	37,7	0,45	0,05	0,05	0,01	2	59,1	40,7	0,14	0,03

Цирконій - титан								Гафній - нікель				
№	Zr	Ti	Nb	Fe	Mo	V	Al	№	Hf	Ni	Zr	Fe
4	77,6	21,0	0,79	0,18	0,16	0,20	0,07	3	87,1	11,1	1,7	0,05

Автором вирішена також важлива проблема переробки відходів ЖС26-ВИ, що знизило собівартість продукції при шихтовці плавки для литва лопаток.

Вихідними матеріалами для отримання кондиційних сплавів ЖС26-ВИ служили їх відходи після вакуумно-індукційного переплаву (ВІП).

Плавку здійснювали у три етапи на електронно-променевої установці L-4 з використанням проміжної ємності. Досліджували сплав, отриманий ЕПП, хімічний склад якого відповідає вимогам ТУ1-92-177-91 (таблиця 11).

Таблиця 11 – Хімічний склад сплаву ЖС26-ВИ, отриманого методом ЕПП

Місце дослідж	Вміст елементів, % мас.									
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Nb	V
Середина	0,129	4,94	9,03	11,53	5,74	0,90	1,00	0,06	1,64	0,91
ТУ1-92-177-91	0,12-0,17	4,3-5,3	8,7-9,3	11,2-12,0	5,6-6,1	0,8-1,2	0,8-1,2	≤0,5	1,4-1,8	0,8-1,2

Місце дослідж	Вміст елементів, % мас.						
	Ni	Si	Mn	S	P	O ₂	N ₂
Середина	основа	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00070	0,00106
ТУ1-92-177-91	основа	≤0,2	≤0,3	≤0,005	≤0,010	≤0,002	≤0,002

Структуру, хімічний, фазовий склад, механічні та жароміцні властивості матеріалів, отриманих методом ЕПП з відходів сплаву ЖС26-ВИ, визначали за методиками прийнятими в АТ «Мотор-Січ» м. Запоріжжя.

У макроструктурі досліджуваного сплаву ЖС26-ВИ після ЕПП і сплаву виробництва ВАТ «СМК» спостерігаються аналогічні кристалізаційні зони: дрібних підкоркових кристалів, стовпчатих кристалів, рівноосних кристалів (рисунок 15, таблиця 12). Усадочна раковина, осьова усадочна рихлість і поруватість у центральній зоні досліджуваних макротемплетів із сплаву ЖС26-ВИ після ЕПП відсутні, в той же час у центральній зоні макротемплету, вирізаного із середньої частини сплаву виробництва ВАТ «СМК», є усадочна раковина діаметром до 15 мм і осьова усадочна рихлість.

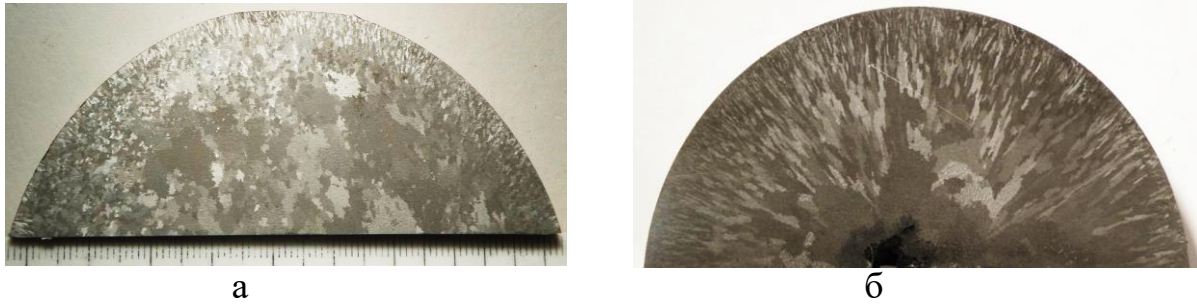


Рисунок 15 – Макроструктура у поперечному перерізі середньої частини зливок із сплавів ЖС26-ВИ після ЕПП (а) і виробництва ВАТ «СМК» (б)

Таблиця 12 – Параметри макроструктури зливок, отриманих з відходів сплаву ЖС26-ВИ методом ЕПП і виробництва ВАТ «СМК»

Спосіб отримання заготовок	Зона заміру	Розмір кристалізаційних зон, мм			Розмір макрозе-рен, мм
		кристалів підкоркових	кристалів стовпчатих	кристалів рівноосних	
ЕПП	середина	0,5 - 1,0	3 - 8	~ 78	0,3 - 5,0
ВАТ«СМК	середина	1,5 - 2,0	14 - 18	44 - 52	3,0 - 5,0

Мікроструктура зливку, отриманого з відходів сплаву ЖС26-ВИ методом ЕПП, являє собою γ - твердий розчин з наявністю інтерметалідної γ' - фази, евтектичної ($\gamma - \gamma'$) - фази, карбідів і відповідає литому стану сплаву ЖС26-ВИ (рисунок 16, таблиця 13).

Таблиця 13 – Розміри структурних складових у сплаві, отриманому ЕПП

Місце вирізк мікро шліфа	Місце заміру	Розмір структурних складових, мкм			Розмір мікро пор, мкм	Відстань між осями дендритів 2 ^{го} порядку, мкм
		евтектика ($\gamma - \gamma'$)	карбіди типа MeC	Розмір оксидів		
Середина	край	6...22	1,5...11	до 12	до 34	25...45
	центр	10...40	2...14	до 21	до 46	45...60

На стартових конусах зразків з монокристалічною структурою, отриманих методом ВСК, виявили кристалографічну орієнтацію (КГО). Результати замірів відхилення напрямку [001] від осі Z у кутових градусах показали, що

відхилення напрямку [001] від осі Z відповідає вимогам ТУ і становить: у зразках, відлитих із сплаву ЕПП – 0,3-4,3 кут. град.; у зразках, відлитих із сплаву виробництва «СМК», – 0-6,8 кут. град. (таблиця 14).

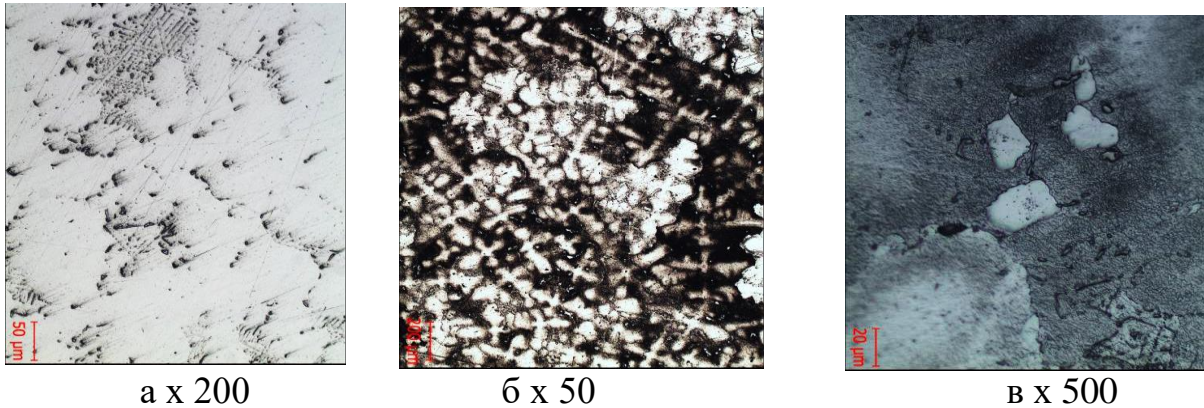


Рисунок 16 – Мікроструктура середньої частини центральної зони зливка, отриманого методом ЕПП: до травлення (а); після травлення (б, в)

Таблиця - 14 КГО зразків, відлитих із сплаву ЖС26-ВИ, отриманого методом ЕПП і виробництва «СМК»

№ п/п	Метод отримання	Відхилення напрямку [001] від осі Z, кут.град.	№ п/п	Метод отримання	Відхилення напрямку [001] від осі Z, кут.град.
1	ЕПП	4,2	6	«СМК»	1,9
2	ЕПП	3,0	7	«СМК»	6,8
3	ЕПП	0,7	8	«СМК»	1,3
4	ЕПП	1,7	9	«СМК»	0
5	ЕПП	2,4	10	«СМК»	2,2
Норми ТУ		≤ 20	Норми ТУ		≤ 20

Результати механічних випробувань і випробувань на тривалу міцність показали, що механічні і жароміцні властивості сплаву ЖС26-ВИ, отриманого методом ЕПП, а також заготовок виробництва «СМК», задовільні, відповідають вимогам ТУ і знаходяться приблизно на одному рівні (таблиця 15).

Таблиця 15 – Механічні і жароміцні властивості сплавів ЖС26-ВИ, отриманих ВАТ«СМК» і ЕПП

Метод отримання зливка	Стан матеріалу	Механічні властивості при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$			Час до руйнування при $t = 975\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 260\text{ МПа}$, τ_p , год.
		σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	
ЕПП	Без термообробки	944	11,2	12,4	72^{20}
		1023	8,8	10,4	72^{50}
	Після термообробки	1166	8,4	15,4	98^{00}
		1142	9,2	12,0	76^{30}

		1004	8,0	13,5	95 ³⁰
ВАТ «СМК»	Після термообробки	1011	8,0	-	89 ⁰⁰
Норми 18Т-ТУ-197; 18Т-ТУ-165;		≥ 900	≥ 6,0	-	≥ 40,0

Із наведеної таблиці видно, що термічна обробка за стандартним режимом сприяє деякому підвищенню як механічних, так і жароміцних властивостей, а також отриманню більш стабільних результатів, що обумовлено підвищенням структурної однорідності сплаву.

Встановлено, що структура зламів, отриманих при випробуванні зразків на розтягування, відлитих із сплавів ЖС26-ВИ, отриманих методом ЕПП і ВАТ «СМК», характеризується дендритною будовою, руйнування у процесі випробування відбулося по кристалографічній площині [001] (рисунок 17).

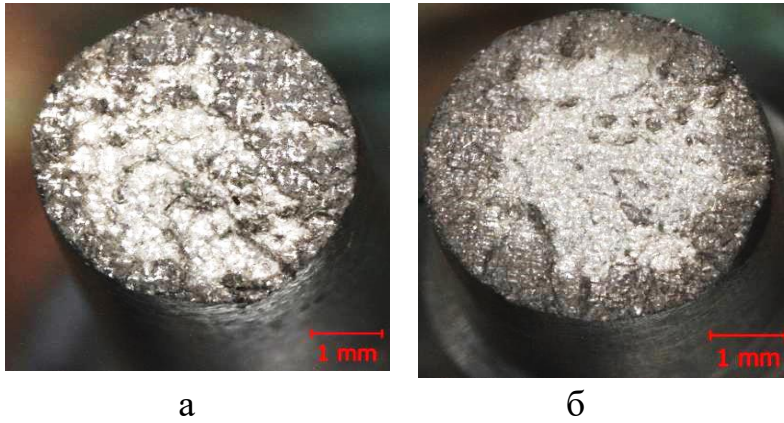


Рисунок 17 – Структура зламів зразків зі сплавів ЖС26-ВИ отриманих ЕПП (а) і ВАТ «СМК» (б) після випробування на розтягнення

Мікроструктурними дослідженнями показано, що у матеріалі зразка, отриманого ЕПП, формується структура з більшим дендритним осередком у порівнянні зі сплавом, отриманим ВАТ «СМК». При цьому, відстань між осями дендритів 2-го порядку у зразку після ЕПП в ~ 2,8 рази більше, ніж у зразку ВАТ «СМК». Приблизно таке ж співвідношення спостерігається у зміні розмірів мікропор і структурних складових.

У 5 розділі розглянуто отримання високочистих металічних сплавів трьох типів різного складу, % мас.: 1. Fe – (4,2) Al; 2. Fe - (36)Co - (1,5)Al - (0,1)Ti - (3,0)Cu; 3. Fe - (36)Co - (3,5)Al - (0,5)Ti - (3,0)Cu та сплав на основі нікелю Ni-W методом ЕПП з мінімальним вмістом домішок, % мас.: S ≈ 0,001; P ≈ 0,0028; В ≈ 0,003; О ≈ 0,069; N ≈ 0,0001, які використовуються в якості затравок для вирощування монокристалічних лопаток газових турбін (таблиці 16-19).

Таблиця 16 – Хімічний склад зливків Fe – Al

	Fe	Al	Si
	96,1	3,9	0,05
норма	95,5-96,1	3,9-4,5	<0,05

Таблиця 17 – Хімічний склад зливків Fe-Co-Al-Ti-Cu

	Fe	Co	Al	Ti	Cu

	57,6	36,9	1,8	1,0	2,7
норма	основа	35-37	1,2-1,8	0,8-1,2	2,7-3,3

Таблиця 18 – Хімічний склад зливків Fe-Co-Al-Ti-Cu

	Fe	Co	Al	Ti	Cu
	55,7	36,9	3,8	0,5	3,1
норма	основа	35-37	3,2-3,8	0,3-0,7	2,7-3,3

Таблиця 19 – Хімічний склад зливків Ni-W

Ni	W	Fe	Mo
основа	33,1	0,018	0,011

До останнього часу не вдавалося отримати зазначені матеріали методом ЕПП у зв'язку з тим, що загальною вимогою до подібних сплавів є строго регламентований хімічний склад, однорідність розподілу компонентів в об'ємі сплаву і мінімальна кількість домішок, насамперед легкоплавких і газових.

Автором одержані й запатентовані композиційні матеріали (Cu-Cr-Zr-Y-Nb)-Mo-CuO-MoO₃, (Cu-C-Zr-Y-Nb)-Mo-CuO-MoO₃ з мідною матрицею додатково легованою хромом або вуглецем для виготовлення розривних і ковзних контактів. Промислові випробування нових ковзних контактів проводилися в умовах: постійний струм до 250 А при напрузі 250 В, вологість до 80%, в атмосфері з підвищеним вмістом CO₂ і SO₂. При проведенні випробувань було встановлено, що середня температура на поверхні графітового контакту коливається у діапазоні 58-88 °С, тоді як на робочій поверхні контакту з мідною матрицею, легованою вуглецем температурні коливання перебувають у діапазоні 26,5-29,1°С. Важливим є той факт, що незважаючи на істотно вищі значення твердості композитів на основі міді і молібдену у порівнянні з графітом, не виявлено помітного зносу контактного проводу. Виходячи з результатів лабораторних випробувань, було встановлено, що введення у матрицю вуглецю (Cu-C-Zr-Y-Nb) в діапазоні до 1,5% мас. (3,5 об.) призводить до істотного зменшення (3-4 рази) приведенного зносу і майже вдвічі до зниження коефіцієнту тертя (таблиця 20).

Таблиця 20 – Триботехнічні характеристики конденсованих композитів (Cu-C-Zr-Y-Nb)-Mo-CuO-MoO₃ з різним вмістом вуглецю

№ п/п	Вміст вуглецю		Паралельно шаруватості		Перпендикулярно шаруватості	
	% мас.	% об.	Приведений знос	Коефіцієнт тертя	Приведений знос	Коефіцієнт тертя
1	0,05	0,17	0,2-0,22	0,32±0,05	0,25-0,38	0,4±0,05
2	0,5	1,7	0,08-0,1	0,24±0,03	0,12-0,14	0,27±0,03
3	1,5	3,5	0,05-0,07	0,18±0,02	0,05-0,08	0,2±0,02
4	3,0	10,2	0,3-0,35	0,15±0,02	0,18-0,22	0,15±0,02
5	2,8	13	0,5-1,0	0,1±0,02	0,7-1,0	0,1±0,02

Подальше збільшення вмісту вуглецю до 3,0% мас. (10,2% об.) різко підвищує приведений знос при подальшому зниженні коефіцієнту тертя. Тому для досягнення оптимальних триботехнічних властивостей необхідно щоб вміст вуглецю в зазначених композитах становив 0,5-1,5% мас.

У 6 розділі наведені області застосування розроблених матеріалів і універсального лабораторного та промислового обладнання для їх отримання.

Розроблені у роботі сплави Ni(Co)CrAlY використовуються для нанесення внутрішнього металічного шару двошарових покриттів метал/кераміка. Нанесення покриттів NiCrAlY здійснювали за один технологічний цикл на установці L-2. Дослідження отриманих покриттів показали, що металічний шар має досить щільну структуру (світле поле), а керамічний шар - типову стовпчату (темне поле) (рисунок 19, а, б).

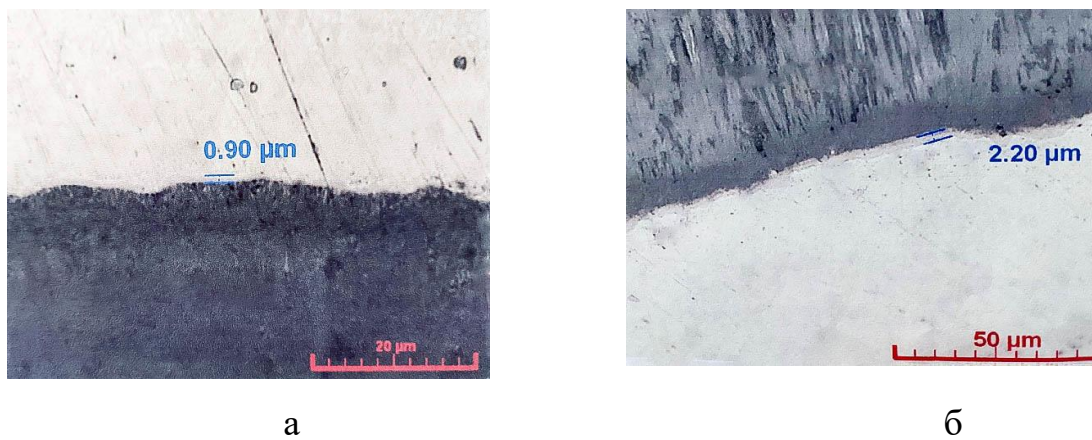


Рисунок 19 – Мікроструктура покриття NiCrAlY із зв'язуючим шаром на межі метал/кераміка з різним часом формування, хв: 10 (а); 15 (б)

Для підвищення експлуатаційної надійності покриттів важливою складовою є формування зв'язуючого шару на межі метал/кераміка. Встановлено, що формування подібного зв'язуючого шару залежить від часу витримки попередньо нагрітих до 850 ± 30 °C лопаток над поверхнею керамічного матеріалу ZrO_2 -(6-8)% мас. Y_2O_3 з температурою 2600 ± 50 °C. При витримці 10 хв. товщина зв'язуючого мікрошару не перевищує 1 мкм, тоді як збільшення часу витримки до 15 хв. призводить до збільшення його товщини до 2 мкм. Мікрорентгеноспектральним дослідженням було проведено визначення хімічного складу зв'язуючого мікрошару на межі метал/кераміка (рисунок 20).

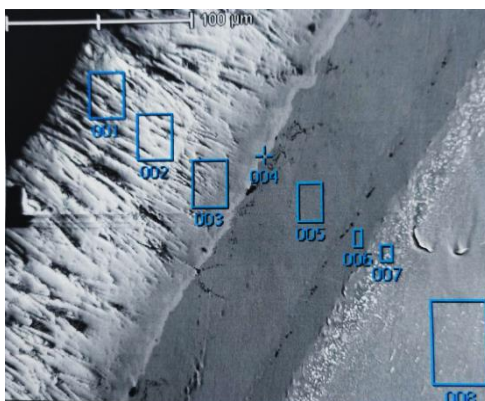


Рисунок 20 – Мікроструктура металічного, зв'язуючого і керамічного шарів термобар'єрного покриття

Результати хімічного аналізу окремих спектрів показали, що у керамічному шарі (спектр 001, 002) покриття присутні кисень і цирконій, а у внутрішньому металічному шарі (спектр 005-008) основним компонентом є нікель і легуючі добавки алюмінію, хрому, кобальту (таблиця 17)

Таблиця 17 – Хімічний склад термобар'єрного покриття, % мас.

спектр	O	Al	Cr	Co	Ni	Zr	Nb	Mo	W
001	27,05					72,95			
002	25,77					74,23			
003	16,02					83,98			
004	4,93				36,20	58,87			
005		7,30	23,63	2,26	66,81				
006		18,09	7,59	2,59	71,74				
007		11,17	12,08	3,25	64,85		1,27	0,87	6,51
008		6,40	5,16	10,49	67,17		1,26	1,23	8,29

Встановлена присутність у зв'язуючому мікрошарі кисню, нікелю та цирконію, що свідчить про утворення складних шпінелей у його складі. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу у режимі картування показали рівномірний розподіл кисню і цирконію у керамічному шарі й однорідність його структури. У внутрішньому металічному шарі нікель, алюміній і хром рівномірно розподілені в об'ємі покриття, що підтверджує стабільність випаровування вказаних елементів із сплаву (рисунок 21).

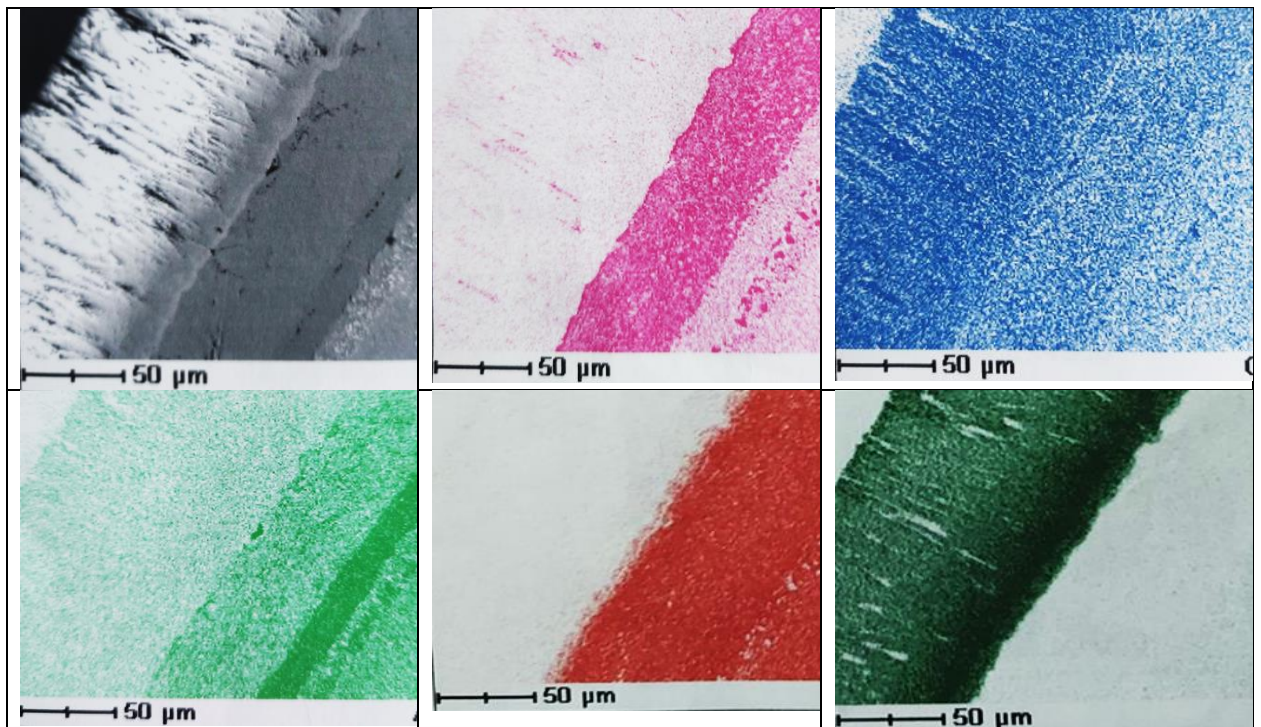


Рисунок 21 – Результати мікрорентгеноспектрального аналізу покриття в режимі картування (чим інтенсивніше забарвлення, тим більший вміст елемента)

Слід зазначити, що парофазні покриття NiCrAlY наносять на лопатки з попередньо осадженим газоциркуляційним шаром (Cr, Al), який формують для захисту від високотемпературної корозії внутрішніх порожнин лопатки, і який також присутній на зовнішній частині лопатки, про що свідчить підвищений вміст Al із розподілу компонентів у даному покритті (рис. 21). За вказаною технологічною схемою формували також покриття CoCrAlY.

Отримані із сплаву CoCrAlYSi порошки використовуються для нанесення двошарових термобар'єрних покриттів плазмовим методом. Для формування внутрішнього і зовнішнього шарів теплозахисного покриття використовують металічні і керамічні порошки фракції 40-100 мкм.

Отримані й досліджені у роботі сплави і композиційні матеріали відрізняються покращеними експлуатаційними властивостями, у зв'язку з чим вони знайшли широке застосування. Найбільшим попитом користується матеріал CoCrAlY(Si), із якого виготовляють сплави (рисунок 22, а) і порошки (рисунок 22, б) для нанесення теплозахисних покриттів на лопатки ГТД (рисунок 22, в).

Сплави TiZrNbSi у широкому інтервалі концентрацій цирконію та ніобію широко використовуються у медицині (рисунок 23, а). Важливим технологічним завданням, що було успішно вирішено, є одержання лігатур, які складаються із компонентів з великою різницею пружності пари (Al-Mo, V-Al) (рисунок 23, б). Отримані лігатури за якістю перевищують закордонні аналоги і у 1,5 рази дешевші за них. Розробка вітчизняних технологій отримання трубчатих катодів (рисунок 23, в, г) для іонно-плазмового нанесення покриттів дозволяє відмовитись від їх закупівлі за кордоном.

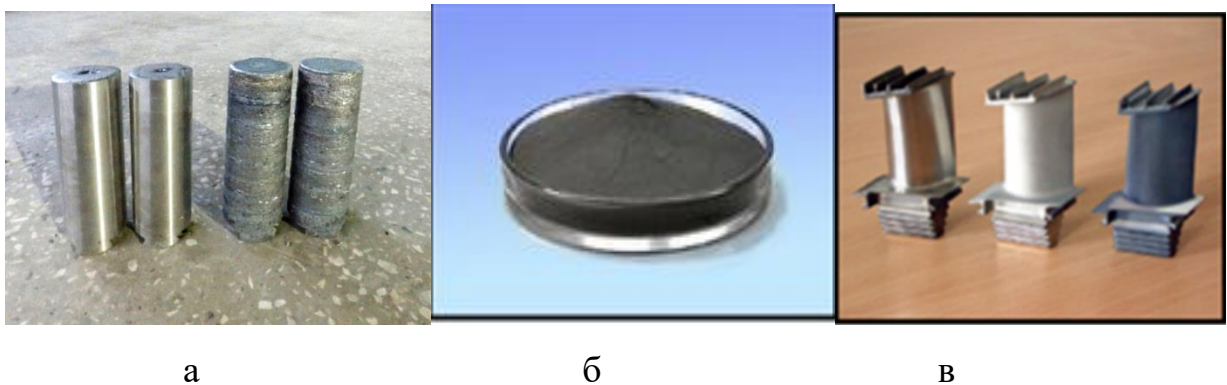


Рисунок 22 – Загальний вигляд зливків сплавів (CoCrAlY(Si) а), порошку для нанесення покриттів (б), лопаткок ГТД з покриттями CoCrAlY (в)

Отримання нових матеріалів з покращеними властивостями стало можливим у результаті розробки за участю автора, конструювання та виготовлення універсального електронно-променевого обладнання нового покоління для плавки металів і сплавів, осадження покриттів і отримання конденсованих з парової фази композиційних матеріалів.



а

б

в

г

Рисунок 23 – Сплави TiZrNbSi медичного призначення (а), лігатури Ni-Y, Hf-Ni, Al-Mo, V-Al, Zr-Ti, Nb-Ti (б), трубчаті заготовки катодів із сплаву NiCrAlY до механічної обробки (в) і після (г)

Перспективним є створення універсального лабораторного обладнання, що дозволяє, після невеликого переналагодження, вирішувати цілий ряд прикладних науково-дослідних завдань. Такі можливості надає розроблена за участю автора лабораторна електронно-променева установка L-2 багатоцільового призначення, відмінною особливістю якої є можливість здійснювати на одному обладнанні такі технологічні процеси: електронно-променева плавка і рафінування металів і сплавів; нанесення покриттів на лопатки газових турбін; отримання конденсованих з парової фази композиційних матеріалів; отримання порошків, що у даний час реалізуються за допомогою різних електронно-променевих установок цільового призначення.

З появою можливості застосування газорозрядних електронно-променевих гармат з холодним катодом за участю автора була розроблена конструкторська документація на дослідно-промислому універсальну електронно-променеву установку L-8.3. Особливості конструкції і технологічні можливості дослідно-промислової електронно-променевої установки L-8.3 дозволяють шляхом простого переналагодження виконувати ті ж самі функції що і на лабораторній установці L-2, але L-8.3 характеризується більшою надійністю та стабільністю технологічного процесу і має вищу продуктивність, що покращує якість продукції.

ВИСНОВКИ

На підставі узагальнення результатів комплексних досліджень структури, хімічного, фазового складу, механічних та експлуатаційних характеристик вперше вирішена науково-технічна проблема отримання нових матеріалів на основі нікелю, кобальту, титану, міді та виробів з них методами електронно-променевої технології.

1. Отримані жаростійкі сплави NiCrAlY, CoCrAlY, CoCrAlYSi за одностадійною технологією з використанням електронно-променевого переплаву вихідних матеріалів і вивчена їх структура, хімічний та фазовий склад. Показано покращення якості сплавів за рахунок

- зниження кількості шкідливих металічних та неметалічних домішок, % мас. : Fe<0,05; Cu< 0,05; C< 0,05; S< 0,02; P< 0,02; O< 0,08; N < 0,001; H< 0,0008. (Підтверджено розробленим ТУ на відповідні матеріали).
2. Досліджена структура, хімічний і фазовий склад покриттів, нанесених електронно-променевим та плазмовим методами із матеріалів Ni(Co)CrAlY(Si). Визначено параметри формування зв'язуючого шару на межі метал/кераміка та встановлено його хімічний склад. Показано, що із підвищенням часу витримки попередньо нагрітих до температури $880\pm 30^{\circ}\text{C}$ лопаток над поверхнею керамічного матеріалу $\text{ZrO}_2\text{-(6-8)\% мас. Y}_2\text{O}_3$ з температурою $2600\pm 50^{\circ}\text{C}$ з 10 до 15 хвилин товщина зв'язуючого шару збільшується з 0,9 до 2,2 мкм.
 3. Проведено комплексне вивчення структури, хімічного і фазового складу сплавів NiCrAlY (МЗП 6) та розроблено електронно-променеву технологію виплавки трубчатих катодів із них для іонно-плазмового нанесення покриттів. Встановлено, що основними складовими матеріалу МЗП 6 є жаростійкі β -фаза (NiAl) і γ' -фаза (Ni₃Al), а також α -хром (твердий розчин на основі хрому). Експлуатаційні характеристики покриттів на лопатках, отриманих розпиленням дослідних катодів, відповідають характеристикам серійних покриттів.
 4. Проведені системні дослідження структури, хімічного, фазового складу складнолегованих порошків фракції 40-100 мкм із сплавів CoCrAlYSi з підвищеним вмістом алюмінію (10-13 % мас.), отриманих за новою технологією ЕПП, що неможливо було здійснити стандартними методами атомізації. Встановлено, що порошки мають полідрічну форму, у структурі порошку переважною є β -фаза (CoAl) з гольчастими включеннями різної довжини γ -фази (твердого розчину на основі кобальту), присутній також α -хром (твердий розчин на основі хрому). (Підтверджено розробленим ТУ на сплави CoCrAlYSi для виготовлення порошку).
 5. Визначено хімічний, фазовий склад, структуру та фізико-механічні властивості жароміцного сплаву ЖС26-ВИ, отриманого з відходів зазначеного матеріалу. Показано, що механічні властивості і характеристики тривалої міцності отриманого з відходів сплаву ЖС26-ВИ відповідають властивостям, притаманним сплаву ЖС26-ВИ, виготовленому із вихідних матеріалів. Встановлено, що застосування технології ЕПП відходів дозволяє економити до 20% вихідних матеріалів.
 6. Вивчені структура, хімічний, фазовий склад та механічні властивості сплавів TiZrNbSi медичного призначення у широкому інтервалі концентрацій цирконію та ніобію. Визначено хімічний склад сплаву, механічні властивості якого знаходяться у діапазоні: межа міцності – 900-950 МПа, межа плинності – 840-890 МПа, подовження – 0,3-2,5%, модуль Юнга – 70-100 ГПа. За механічними характеристиками сплав

- TiZrNbSi перевищує сплав ВТ-6 і не має шкідливих для людського організму домішок алюмінію і ванадію.
7. Отримані лігатури різного хімічного складу: Ni-Y; Al-Mo; V-Al; Nb-Ti; Zr-Ti; Gf-Ti із компонентів, які суттєво відрізняються пружністю пари, методом електронно-променевої плавки. Встановлено, що концентрація у лігатурах домішок Zn, Cd, Sn, Fe, Si, C, N, O не перевищує, % мас.: 0,001; 0,001; 0,01; 0,15; 0,12; 0,05; 0,0008; 0,08 відповідно, що майже у 2 рази менше у порівнянні з аналогічними сплавами, отриманими іншими методами. Це дає широкі можливості використання отриманих лігатур при виплавці сучасних та перспективних жаростійких та жароміцних сплавів.
 8. Одержано високочисті сплави систем: Ni-W; Fe-Al; Fe-Co-Al-Ti-Cu з вмістом контрольованих домішок, % мас.: S \approx 0,001; P \approx 0,0028; B \approx 0,003; O \approx 0,069; N \approx 0,0001, які до останнього часу не вдавалося отримати методом ЕПП. Завдячуючи цьому їх використовують в якості затравок для вирощування монокристалічних лопаток газових турбін.
 9. Розроблено композиційні матеріали на основі міді і молібдену додатково леговані хромом і вуглецем для розривних і ковзних контактів. Встановлено, що введення у склад матричного сплаву до 1,5 % мас. вуглецю призводить до зменшення у 3-4 рази зносу контактів і майже вдвічі - до зниження коефіцієнта тертя матеріалу. Оптимальне співвідношення характеристик міцності й пластичності композитів досягається при концентрації молібдену близько 11-13% мас.
 10. Для отримання одержаних у роботі матеріалів за участю автора розроблена конструкторська документація й виготовлені пілотні зразки електронно-променевого обладнання: універсальна лабораторна установка L-2 для плавки й рафінування металів та сплавів, нанесення захисних покриттів на лопатки турбін, отримання конденсованих з парової фази композиційних матеріалів (до 5 мм); промислова установка L-4 для плавки та рафінування металів та сплавів; промислова установка L-8 для осадження захисних покриттів на лопатки турбін; універсальна промислова установка L-8.3. Відповідне обладнання поставлено у країни: L-2 – Україна, КНР; L-4 – Україна, Вірменія, L-8 – Англія. Сплав TiZrNbSi поставляється у США; сплави - Fe-Al, Fe-Co-Cr-Al-Si у КНР. На підприємства України поставляється промислова продукція: зливки сплавів CoCrAlY; порошок сплаву CoCrAlYSi; лігатура Ni-Y (Підтверджено листом: Державне Підприємство «Науково-Виробничий комплекс газотурбобудування «ЗОРЯ-«МАШПРОЕКТ» на серійне постачання розроблених матеріалів).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Minakova R.V. Structure, electrical conductivity and mechanical characteristics of copper-tungsten composite obtained by electron beam physical vapour deposition

- (EB-PVD) technique / R.V. Minakova, **I.N.Grechanyuk**, V.V. Bukhanovsky, N.P.Rudnitsky, I. Mamuzić // Transactions of Famena.– 2010. – 34(2), С.37-46. (<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=20325&tip=sid>, Famena, Croatia, indexed in Web of Science, Scopus, Google Scholar) (*Автором проведено дослідження структури і механічних характеристик мідь-вольфрамових композицій*).
2. Bukhanovskii V.V. Effect of composition and heat treatment on the structure and properties of condensed composites of the Cu - W system / V.V. Bukhanovskii, R.V. Minakova, **I.N. Grechanyuk**, I. Mamuziæ, N.P.Rudnitskii // Metal Science and Heat Treatment. – 2011. – 53 (1-2). – 14-23 (doi: [10.1007/s11041-011-9334-x](https://doi.org/10.1007/s11041-011-9334-x) , Springer, USA, indexed in Web of Science, Scopus, Google Scholar) (*Автор прийняв участь у встановленні впливу термообробки на структуру і властивості конденсованих композицій Cu – W*).
3. Bogdan M. The actual state and prospects of a high power electron beam technology for metallic and non-metallic compositions used in electric contacts and electrodes / M. Bogdan, H. Marcin , **I.N. Grechanyuk**., R.V. Minakova., Xu L.J. // Advanced Materials Research. – 2014. V. 875-877. – P. 1437-1448 (doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.1437](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.1437), Trans Tech Publication, Germany, indexed in EBSCO , Cambridge Scientific Abstracts, Google Scholar) (*Автором проведений аналіз використання металічних і неметалічних композицій для електричних контактів*).
4. Grechyanyuk N.I. Industrial electron-beam installation L-4 for melting and vacuum refining of metals and alloys / N.I Grechyanyuk, P.P. Kucherenko, A.G. Melnik, **I.N. Grechanyuk**, Y.A. Smashnyuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2016. – Vol. 55. – № 7-8. – P. 489-495 (doi: <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9831-y>, Springer, USA indexed in Web of Science, Scopus) (*Автор приймав участь в розробці конструкторської документації для електронно-променевої установки Л-4*).
5. Grechanyuk N.I. Laboratory Electron-Beam Multipurpose Installation L-2 for Producing Alloys, Composites, Coatings, and Powders. / N.I. Grechanyuk, G.A. Baglyuk, P.P Kucherenko, A.G. Melnik, **I.N. Grechanyuk**, V.G. Grechanyuk, Y.A Smashnyuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2017. – № 56(1-2). – P.113-121 (doi: [10.1007/s11106-017-9878-4](https://doi.org/10.1007/s11106-017-9878-4), Springer, USA, indexed in Web of Science, Scopus, Google Scholar) (*Автор приймав участь у розробці конструкторської документації для електронно-променевої установки Л-2*).
6. Grechanyuk, N.I. New Electron-Beam Equipment and Technologies for the Production of Advanced Materials Using Vacuum Melting and Evaporation Methods Developed at SPE “Eletekhmash” /N.I.Grechanyuk, P.P.Kucherenko, A.G.Melnik, **I.N. Grechanyuk**, Y.A. Smashnyuk, V.G.Grechanyuk, A. Manulyk // Minerals, Metals and Materials Series. – 2019. – P. 105-113. (doi: [10.1007/978-3-030-35790-0_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35790-0_9), Springer, USA, indexed in Web of Science, Scopus, Google Scholar) (*Автор прийняв участь у розробці нового обладнання і технологій для отримання композиційних матеріалів і покриттів*).

7. Гречанюк Н.И. Новое электронно-лучевое оборудование и технологии получения современных материалов и покрытий / Н.И. Гречанюк, П.П. Кучеренко, **I.M. Гречанюк** // Автоматическая сварка. – 2007. – № 5 (649). – С. 36-41 <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2007/05/00>, (indexed in «Welding Abstracts» UK) (*Автором зроблений огляд по застосуванню нових розробок електронно-променевого обладнання для отримання сучасних матеріалів*).
8. Grechanyuk N.I. Modern Electron Beam Technologies and Equipment for Melting of Metals and Alloys, deposition of Protective Coatings, Production of Composites Condensed from Vapor Phase and Powders / N.I. Grechanyuk, A.G. Melnyk, **I.N. Grechanyuk**, V.I. Melnyk, D.V. Kovalchuk // Elektrotechnica and Elektronika (Bulgaria). – 2014. – Vol. 49. – № 5-6. – P.115-121. <https://epluse.ceec.bg/modern-electron-beam-technologies-and-equipment-for-melting-of-metals-and-alloys-deposition-of-protective-coatings-production-of-composites-condensed-from-vapor-phase-and-powders/#example>, (indexed by EBSCO, ROAD, Google Scholar, and at the [RSC](#)) (*Автор експериментально довів можливість використання технології плавки для отримання сучасних сплавів*).
9. Grechanyuk N.I. Industrial electron beam installation L-8 for deposition of heat – protective coatings on turbine blades / N.I. Grechanyuk, P.P. Kucherenko A.G. Melnik, D.V. Kovalchuk, **I.N. Grechanyuk** // The Paton Welding Journal. – 2014, No 10. – P. 45-50. (<https://doi.org/10.15407/tpwj2014.10.09>, IA "Welding", indexed by SCOPUS, Google Scholar, and „Welding Abstracts” UK) (*Автор приймав участь у розробці конструкторської документації для електронно-променевої установки Л-8*).
10. Grechanyuk N. I. The new condensed from vapor phase composite materials based on copper and their applications / N. I. Grechanyuk, V.G. Grechanyuk, E.V. Khomenko, **I. N. Grechanyuk**, V.G. Zatovskii, D. Kovalchuk // Elektrotechnica & Elektronika (Bulgaria). – 2016. – № 5-6. – P. 199-205. (<https://epluse.ceec.bg/wp-content/uploads/2018/09/20160506-34.pdf>, IA "Welding", indexed by EBSCO, ROAD, Google Scholar, and at the [RSC](#)) (*Автор узагальнив результати по використанню конденсованих матеріалів на основі міді*).
11. Grechanyuk N.I. Modern composite materials for switching and welding equipment Information 2. Application of high-rate vacuum evaporation methods for manufacturing electric contacts and electrodes / N.I. Grechanyuk, V.G. Grechanyuk, E.V. Khomenko, **I.N. Grechanyuk**, V.G. Zatovsky // The Paton Welding Journal. – 2016. – № 2. – P. 34-39. (<https://doi.org/10.15407/tpwj2016.02.06>, IA "Welding", indexed by SCOPUS, Google Scholar, and Welding Abstracts UK) (*Автор проаналізував сучасний стан використання конденсованих матеріалів для контактів і електродів*).
12. Grechanyuk N.I. New electron beam equipment and technologies for producing of advanced materials using vacuum melting and evaporation methods developed at SPE Eltekhmash / N.I. Grechanyuk, P.P. Kucherenko, A.G. Melnik, **I.N.**

Grechanyuk, Y.A. Smashnyuk, V.G. Grechanyuk // The Paton Welding Journal. – 2016. – № 5-6. – P. 48-55. (<https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.08>, IA "Welding", indexed by SCOPUS, Google Scholar, and "Welding Abstracts"UK) (*Автор узагальнив результати по використанню електронно-променевого обладнання для плавки металів і сплавів з 2008 по 2015 рік*).

13. Клочихин В.В. Структура и свойства слитков, полученных электронно-лучевым переплавом кондиционных возвратных отходов жаропрочного сплава ЖС-26 ВИ / В.В. Клочихин, Н.И. Гречанюк, Ю.А. Смашнюк, **И.Н. Гречанюк**, В.В. Наумик // Современная электрометаллургия. – 2017. – №4 (129). – С. 17-27 (<https://doi.org/10.15407/sem2017.04.03>, IA "Welding", indexed in EBSCO, Google Scholar, "Welding Abstracts"UK) (*Автор визначив режими електронно-променевого переплаву для отримання зливок сплавів із відходів жароміцного сплаву ЖС-26 ВИ*).

14. **Hrechaniuk I.M.** Possibility of the method of explosive electron-beam evaporation- condensation in vacuum to obtain the refractory and complexly doped compounds for various purposes / I.M. Hrechaniuk, O.V. Khomenko, G.A. Bagliuk // KPI Science News. – 2019. – №4. – С. 54-64.

(DOI: <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.4.180747>, NTU, indexed in EBSCO, Index Copernicus, Google Scholar) (*Автор отримав зразки складнолегованих порошків*).

15. Гречанюк Н.И. Электронно-лучевая выплавка трубчатых заготовок из сплавов NiCrAlY, используемых в качестве катодов для ионно-плазменного нанесения покрытий / Н.И. Гречанюк, Ю.О. Смашнюк, Е.В. Хоменко, В.В. Клочихин, **И.Н. Гречанюк** // Современная электрометаллургия. – 2019. – №1. – С.17-23 (<https://doi.org/10.15407/sem2019.01.02>, IA "Welding", indexed in EBSCO, Google Scholar, "Welding Abstracts"UK) (*Автор запропонував технологію отримання трубчатих заготовок із сплавів NiCrAlY*).

16. **Гречанюк I.M.** Корозійна й ерозійна стійкість конденсованих з парової фази композиційних матеріалів на основі міді й молібдену / I.M. Гречанюк, В.Г. Гречанюк // Современная электрометаллургия. – 2020. – № 1. – С. 32-38 (International Association "Welding", indexed in EBSCO, Google Scholar, "Welding Abstracts"UK) <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.04> (*Автор виготовив зразки для проведення дослідів по вивченню корозійної та ерозійної стійкості композиційних матеріалів*).

17. Дуднік О.В. / Високоентропійна кераміка для термобар'єрних покриттів на основі ZrO₂, комплексно легovanого оксидами РЗЕ / О.В. Дуднік, С. М. Лакиза, **I.M. Гречанюк**, В.П. Редько, М.С. Глабай, В.Б. Шмібельський, І.О.Марек, О.К. Рубан, М. І. Гречанюк // Порошковая металлургия. – 2020. - № 9-10. – С. 12-21 (ІПМ НАНУ, ІПМ НАНУ, indexed in Web of Science, Scopus) (*Автор запропонував технологію нанесення термобар'єрних покриттів з використанням нової кераміки*).

18. Dudnik E.V. Protective and Functional Powder Coatings Thermal Barrier Coatings Dased on ZrO₂ Solid Solutions / E.V. Dudnik, S.N. Lakiza, **I.N. Hrechanyuk**, A.K. Ruban, V.P. Redko, I.O. Marek, V.B. Shmibelsky, A.A.

Makudera, N.I. Hrechanyuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2020. – Vol. 59. – №. 3-4. – P. 179-200 ([DOI: 10.1007/s11106-020-00151-8](https://doi.org/10.1007/s11106-020-00151-8), Springer, USA, indexed in Web of Science, Scopus) (Автор приймав участь в узагальненні результаті по використанню твердих розчинів ZrO_2).

19. Денисенко В.О. Структура і фізико-хімічні властивості композиційних матеріалів на основі міді та вольфраму, отриманих методом електронно-променевого випаровування / В.О. Денисенко, Р.В. Мінакова, В.Г. Гречанюк, **І.М. Гречанюк** // Науковий вісник Чернівецького університету. – 2008.– вип. 422 – С.26-33

(http://library.chnu.edu.ua/res//library/elib/visnyk_chnu/visnyk_chnu_2008_0422.pdf, ЧТУ МОНУ, журнал входить до переліку фахових видань МОН України в галузі технічних наук) (Автор провів дослідження по вивченню механічних властивостей композиційних матеріалів на основі міді).

20. Гречанюк Н.И. Современные теплозащитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей и оборудование для их получения / Н.И. Гречанюк, П.П. Кучеренко, **И.Н. Гречанюк**, О.П. Василега, Р.В. Мінакова // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Луцьк. – 2011. – № 30. – С. 92 – 100 (http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2011_31_19, ЛНТУ МОНУ, журнал входить до переліку фахових видань МОН України в галузі технічних наук) (Автор розробив технологію осадження теплозахисних покриттів на лопатки газотурбінних двигунів).

21. Гречанюк Н.И. Современное состояние и перспективы применения технологии высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов для получения материалов электрических контактов и электродов / Н.И. Гречанюк, Р.В. Мінакова, О.П. Василега, **И.Н. Гречанюк**, Г.Е. Копылова, Б. Медзинский // Серия «Композиционные слоистые и градиентные материалы и покрытия» сборник ИПМ НАНУ. – 2010. – С. 54-67.

(<http://www.materials.kiev.ua/issue/39/article/462> , ИПМ НАНУ, журнал входить до переліку фахових видань МОН України в галузі технічних наук) (Автор експериментально показав можливість використання електронно-променевої технології для отримання матеріалів електричних контактів).

22. Grechanyuk N.I. Current state and prospects for application of a high power electron beam technology to produce metallic and nonmetallic components for electric contacts and electrodes / N.I. Grechanyuk, R.V. Minakova, **I.N. Grechanyuk**, В. Miedzinski, L.Xu // Труды ИПМ НАН Украины. Серия «Композиционные слоистые и градиентные материалы и покрытия». Киев. – 2014. – С. 233-245 (<http://www.materials.kiev.ua/issue/72/article/1157>, ИПМ НАНУ, журнал входить до переліку фахових видань МОН України в галузі технічних наук) (Автор встановив вплив технологічних параметрів на експлуатаційні характеристик композитів).

23. Гречанюк І.М. Вибір зміцнюючих фаз для формування композицій з заданими фізико-хімічними властивостями / **І.М. Гречанюк**, В.Г. Гречанюк //

Труды ИПМ НАНУ. Серия «Композиционные слоистые и градиентные материалы и покрытия», Киев. – 2016. – С. 83-88.

(<http://www.materials.kiev.ua/article/2349>, ИПМ НАНУ, журнал входить до Переліку фахових видань МОНУ) (Автор провів експериментальні дослідження по вибору зміцнюючих фаз).

24. **Гречанюк І.Н.** Новые направления работ НПП «Элтехмаш» по получению перспективных материалов и покрытий методами электронно-лучевой плавки и высокоскоростного испарения-конденсации в вакууме / И.Н. Гречанюк // Труды ИПМ НАН Украины. Серия «Композиционные слоистые и градиентные материалы и покрытия» Киев. – 2018. – С.108-112 (<http://www.materials.kiev.ua/article/2615>, ИПМ НАНУ, журнал входить до Переліку фахових видань МОНУ).

25. Акримов В.А. Промислова технологія нанесення двошарових плазмових теплозахисних покриттів на лопатки газових турбін / В.А.Акримов, **І.М.Гречанюк**, Ю.О.Смашнюк, В.Г.Гречанюк, М.П.Любаренко // Сучасна електрометалургія. – 2020. – № 4. – С.28-31.

<https://doi.org/10.37434/sem2020.04.05> (Автор приймав участь у дослідженні структури покриттів).

26. Гречанюк М.І. Патент України на винахід №114451 «Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання» / М.І.Гречанюк, **І.М.Гречанюк.**, В.Г.Затовський., В. Г. Гречанюк. Бюл. №11 від 2017 р. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/710578/>, (Автор розробив метод легування для покращення експлуатаційних властивостей контактів).

27. Гогаєв К.О. Патент України на винахід № 99557 «Спосіб одержання складнолегованих порошків на основі кобальту» / К.О. Гогаєв, М.І. Гречанюк, В.К. Грибков, В.Г. Затовський, Р.В. Мінакова, О.П. Василега, В.О. Акримов, Є.В. Онопрієнко, **І.М. Гречанюк**, Бюл. № 16 від 2012 р. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1278088>, (Автор приймав участь у розробці технології отримання порошків).

28. Гречанюк М.І. Патент України на винахід №104673 «Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання» / М.І.Гречанюк, В.Г. Гречанюк, Р.В. Мінакова, **І.М. Гречанюк**, В.В. Бухановський, Бюл. № 4 від 2014 р.

<https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1020065/> (Автор запропонував склад композиційного матеріалу).

які додатково відображають наукові результати дисертації

29. **Grechanyuk I.N.** Influence of treatment of surface of substrate on mechanical properties of condensed from steam phase materials / I.N. Grechanyuk // Metalurgija. – 2008. – vol.47. – № 3. – P. 236-239.

30. **Grechanyuk I.N.** The Modern State of Works in Field of electron-biamTechnology of Melting and evaporation of Metals and non-Metals in a Vacuum / I.N. Grechanyuk, N.I. Grechanyuk, G. Croitoru // Metallurgy and Materials science. – 2008. – № 2. – P. 85-90.

<https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mms/article/view/3108> (Автор приймав участь в обговоренні та узагальненню результатів).

31. **Grechanyuk I.N.** Physical-Chemical Properties of Composition Materials (Cu-Sn)-Mo/ I.N. Grechanyuk, V.G. Grechanyuk, Y.U.Artuh, // Metallurgy and Materials science. – 2009. – №1. – P. 3-5.

http://www.fascicula9.ugal.ro/uploads/pdf/A1_1_2009.pdf (Автор провів дослідження по вивченню корозійної стійкості композитів).

32. Grechanyuk N.I. Composite Materials with Metal Matrix Condensed from Vapor Phase: Microlayer Metarials / N.I. Grechanyuk, **I.N.Grechanyuk**, E.V Khomenko, A.G. Melnik, V.G. Grechanyuk // Elektrotechnica and Elektronica (Bulgaria). – 2014. – Vol. 49. – № 5-6. – P. 201-205.

<https://epluse.ceec.bg/composite-materials-with-a-metal-matrix-condensed-from-vapor-phase-dispersion-strengthened-metals/> (Автор вивчив механічні властивості конденсованих матеріалів).

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на конференціях

33. Equipments and applications of electron-beam technology for obtaining of new type of materials and remelting / N. Grechanyuk, V. Osokin, **I. Grechanyuk**, P. Shpak // NATO Advanced research workshop “Fuel cell technologies: state and perspectives”, Kiev. – 2004. – P. 25 (Автор приймав участь у розробці нових матеріалів, отриманих методом переплаву) (очна участь).

34. Protective and decorative vacuums coatings on wares of artistic castings / N. Grechanyuk, V. Grechanyuk, **I.Гречанюк** //“Turnatoria de la rigoarea tehnicii la arta “Artcast 2006”, Romania. – 2006. – P.131-135 (Автор приймав участь у розробці покриттів) (заочна участь).

35. Structure, physico-chemical, mechanical, and operational characteristics of condensed composite materials of the Cu-W system far electric contacts / N. I.Grechanyuk, **I. N.Grechanyuk**, V. A. Osokin, V.V.Kharchenko, V.V. Bukhanovskii, N.P. Rudnitskii, R. Krizanic // 8 th International symposium of Croatian metallurgical society SHMD-2008, Sibenik, Croatia, (June 2008). – 2008. – P. 232 (Автор досліджував структуру композитів)(заочна участь).

36. Коррозия парофазных конденсатов (Cu-Gr)-Mo / Я.Ю. Артюх, В.Г. Гречанюк, **I.M. Гречанюк**, I.Ф. Руденко //Международная конференция”Электрические контакты и электроды” (Сентябрь 21-27). – Кацивели, Украина, 2009. – С. 34-36 (Автор отримав парофазні композити (Cu-Gr)-Mo) (очна участь).

37. Electron Beam Technologies and Equipment for Melting Metals and Alloys, Covering Depositions, Producing of the Composition, Producing of the Composition Materials Condensed from a Steam Phase and Powders / N.I. Grechanyuk, **I.N. Grechanyuk**, G. Groitoru // Tehnologii si materiale avantsate, Conferinta internationala, universiara «Dunarea de Jos», Galati (Oct 23-24). – 2009. – P. 394-398 (Автор приймав участь у проведенні досліджень і обговоренні результатів) (очна участь).

38. Современные электронно-лучевые технологии и оборудование для плавки металлов и сплавов, получения конденсированных из паровой фазы композиционных материалов, покрытий и порошков / В.В. Скороход, Н.И. Гречанюк, Р.В. Минакова, **И.Н. Гречанюк** // 6 Международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий»: Тезисы докладов (Сентябрь 20-24). – Украина, Крым, Ялта, 2010. – С. 398 (*Автор прийняв рівноцінну участь у проведенні досліджень і обговоренні результатів*) <https://refdb.ru/look/2854832-pall.html> (очна участь).
39. Современное лабораторное и промышленное электронно-лучевое оборудование для плавки металлов и сплавов, получение композиционных материалов и нанесение покрытий / В.В. Скороход, И.Н. Гречанюк, Р.В. Минакова, П.П. Кучеренко, **И.Н. Гречанюк**, О.П. Василега // 3-я Междун. конф. "HighMatTech": тезисы докладов (Октябрь 03-07). – Киев, Украина, 2011. – С. 349 (*Автор прийняв участь в обговоренні використання сучасного електронно-променевого обладнання для нанесення покриттів*) (очна участь).
40. Влияние состава и термической обработки на структуру и свойства конденсированных композитов системы Cu-W / Н.И. Гречанюк, В.В., Бухановский, Р.В. Минакова, **И.Н. Гречанюк**, И. Мамузич, Н.П. Рудницкий // Форум «Металловедение и термическая обработка металлов. Композиционные материалы», Москва (январь). – 2011. – №1(687). – С. 9 (*Автор приймав участь у дослідженні механічних властивостей композицій*) (заочна участь).
41. Corrosion Resistance in Excited Environments of Composite Materials on the Basis of Copper and Molybdenum / **I.N. Grechanyuk**, V.G. Grechanyuk, V.J. Aranasenko, I.F. Rudenko // 10th International symposium of Croatian metallurgical society SHMD-2006, Metalurgija, Sibenik, Croatia (June). – 2012. – P. 387 (*Автор досліджував корозійну стійкість мікрошарових матеріалів мідь молібден*) <https://www.yumpu.com/en/document/read/10596340/metallurgy-51-carnet> (заочна участь).
42. Composite Materials with a Metal Matrix Condensed from Vapor Phase: Dispersion-Strengthened Metals / N.I. Grechanyuk, **I.N. Grechanyuk**, E.V. Khomenko, A.G. Melnik, V.G. Grechanyuk // 11th International Conference on Electron Beam Technologies, Varna, Bulgaria (June 2014). – 2014. – P. 196-200 (*Автор приймав участь в отриманні дисперсно-зміцнених матеріалів для досліджень*) <https://epluse.ceec.bg/modern-electron-beam-technologies-and-equipment-for-melting-of-metals-and-alloys-deposition-of-protective-coatings-production-of-composites-condensed-from-vapor-phase-and-powders/> (заочна участь).
43. **Гречанюк И.Н.** Современные теплозащитные покрытия для лопаток авиационных двигателей и электронно-лучевое оборудование для их нанесения // Proceedings of XIII International Conference on Modern Achievements of science and Education, Netanya, Israel (September 6-13). – 2018.

- Р. 64-67. http://lib.khnu.km.ua/konfer_HNU/2018/MASE-2018.pdf (очна участь).
44. **Гречанюк І.Н.** Електронно-лучеве обладнання для плавки і випаровування металів і сплавів // Proceedings of XIII international conference on science and education, Hungary (January 4-13). –2019. – Р. 44-47.
<http://iftomm.ho.ua/docs/SE-2019> (очна участь).
45. New electron-beam equipment and technologies for production of advanced materials using vacuum melting and evaporation methods developed at SPE «ELTECHMASH» / A. Manulyk, N. I. Grechanyuk, P.P. Kucherenko, A.G. Melnik, **I.N. Grechanyuk**, Y.A. Smashnyuk, V.G. Grechanyuk // Proceedings of 20 th World Congress on Materials Science and Engineering, Vienna, Austria (June 24-26). –2019. – Р.29-30.
<https://materialsscience.insightconferences.com/2019/scientific-program.php?day=1&sid=4835&date=2019-06-24> (Автор прийняв рівноцінну участь в обговоренні щодо використання новітнього обладнання та технологій) (заочна участь).
46. **Гречанюк І.Н.** Получение высокочистых молибдена и вольфрама методом электронно-лучевой плавки // Proceedings of XIV International Conference on Modern Achievements of science and Education Netanya, Israel (September 26-October 3). –2019. – Р. 45-48.
https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/11376/3/Kyriy_Peresada_2019_10.pdf (очна участь).
47. **Гречанюк І.Н.** Производство кондиционных слитков из отходов жаропрочных сплавов методом электронно-лучевой плавки // Proceedings of XIII international conference on science and education, Hungary (January 4-13). – 2020. – Р. 27-30. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/8510/1/SE-2020.pdf#page=30> (очна участь).

АНОТАЦІЯ

Гречанюк І.М. Науково-технологічні засади створення нових композиційних матеріалів на основі нікелю, кобальту, титану й міді та новітнього електронно-променевого обладнання для їх отримання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01–матеріалознавство (13 – механічна інженерія). Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, Київ, 2021.

У роботі вперше комплексно вирішена науково-технічна проблема створення нових композиційних матеріалів на основі Ni, Co, Ti і Cu та розроблено досконале електронно-променеве обладнання для їх отримання.

Досліджено структуру, хімічний і фазовий склад, фізико-механічні властивості та розроблено технології отримання: сплавів і порошків із матеріалу Ni(Co)CrAlY для осадження захисних покриттів; трубчастих заготовок із сплавів NiCrAlY для осадження жаростійких іонно-плазмових покриттів на установках серії МАП; кондиційних жароміцних сплавів ЖС26-

ВИ, отриманих з їх відходів; лігатур різного складу: Ni-Y, Hf-Ni, Al-Mo, V-Al, Zr-Ti, Nb-Ti; спеціальних сплавів TiZrNbSi медичного призначення; високочистих сплавів на основі заліза та нікелю для виготовлення затравок, які використовуються при вирощуванні монокристалічних лопаток; композиційних матеріалів на основі міді додатково легованих хромом і вуглецем, використання яких підвищило експлуатаційні властивості виробів.

Для отримання нових матеріалів за участю автора розроблена конструкторська документація і виготовлені пілотні зразки промислових установок для плавки металів і сплавів L-4, нанесення покриттів L-8, універсальні лабораторна L-2 і промислова L-8.3.

Ключові слова: електронно-променеве обладнання, плавка металів і сплавів, покриття, конденсовані з парової фази композиційні матеріали, структура, фазовий і хімічний склад, механічні характеристики.

АННОТАЦІЯ

Гречанюк І.Н. Научно-технологические основы создания новых композиционных материалов на основе никеля, кобальта, титана и меди и новейшего электронно-лучевого оборудования для их получения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01–материаловедение (13 - механическая инженерия) Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАН Украины, Киев, 2021.

В работе впервые комплексно решена научно-техническая проблема создания новых композиционных материалов на основе Ni, Co, Ti и Cu и разработано совершенное электронно-лучевое оборудование для их получения.

Исследованы структура, химический и фазовый состав, физико-механические свойства и разработаны новые технологии получения: сплавов и порошков из материала Ni(Co)CrAlY для осаждения защитных покрытий; трубчатых заготовок из сплавов NiCrAlY для осаждения жаростойких ионно-плазменных покрытий на установках серии МАП; кондиционных жаропрочных сплавов ЖС26-ВИ, полученных из их отходов; лигатур различного состава: Ni-Y, Hf-Ni, Al-Mo, V-Al, Zr-Ti, Nb-Ti; специальных сплавов TiZrNbSi медицинского назначения; високочистых сплавов на основе железа и никеля для изготовления затравок, используемых при выращивании монокристаллических лопаток; композиционных материалов на основе меди дополнительно легированных хромом и углеродом, использование которых повысило эксплуатационные свойства изделий.

Для получения новых материалов с участием автора разработана конструкторская документація і виготовлені пілотні образці промислових установок для плавки металлов и сплавов L-4, нанесения покрытий L-8, универсальные установки: лабораторная L-2 и промышленная L-8.3.

Ключевые слова: электронно-лучевое оборудование, плавка металлов и сплавов, покрытия, конденсированные с паровой фазы композиционные материалы, структура, фазовый и химический состав, механические характеристики.

ABSTRACT

Grechanyuk I.M. Scientific and technological principles of creating new composite materials based on nickel, cobalt, titanium and copper and the latest electron-beam equipment for their production. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.02.01 – materials science (13 Mechanical engineering). Institute of Problems of Materials Science named after I.N. Frantsevich NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

In this work has been comprehensively solved the scientific and technological problem of creation and improvement of new materials and electron-beam equipment for their production.

The structure, chemical, phase composition also physical and mechanical properties have been investigated and receiving technologies have been developed: alloys and powders from the material based on Ni(Co)CrAlY(Si) for protective coatings application; tubular cathodes made of NiCrAlY alloys for applying heat-resistant ion-plasma coatings on МАП devices; conditional ingots of heat-resistant ЖС26-ВИ alloys, obtained from their wastes, what made it possible to save up to 20% of raw materials during their production; medical grade TiZrNbSi alloys that are not toxic to the human body; ligatures of various compositions: Ni-Y, Hf-Ni, Al-Mo, V-Al, Zr-Ti, Nb-Ti, the impurities concentration in which is almost two times lower compared to similar alloys obtained by other methods; high-purity Fe-Al, Fe-Co-Al-Ti-Cu, Ni-W alloys for monocrystalline blades growth; vapor-condensed (Cu-C-Zr-Y-Nb)-Mo-CuO-MoO₃ composite materials for discontinuous and (Cu-Cr-Zr-Y-Nb)-Mo-CuO-MoO₃ sliding contacts. The dependence of the mechanical properties of pseudoalloys based on copper and molybdenum, additionally alloyed with chromium and carbon, on the molybdenum content has been established.

Industrial batches of CoCrAlY, TiZrYSi alloys, CoCrAlYSi powders, ligatures of various types are supplying to Ukraine, China and USA.

With the author participation, to obtain the materials indicated in this work, design documentation has been developed and pilot samples of industrial installations have been created: for metals and alloys L-4 melting; coating L-8; universal laboratory L-2; industrial L-8.3. Manufactured units have been delivered to enterprises in Ukraine, China, Armenia and England.

Key words: electron beam equipment, melting of metals and alloys, coatings, vapor-condensed composite materials, structure, phase and chemical composition, mechanical characteristics.