

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона

На правах рукопису

К О Р Ж
Олександр Вікторович

УДК 669.187.526

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА
ЕЛЕКТРОННО — ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ
ОСАДЖЕННЯ ІЗ ПАРОВОЇ ФАЗИ
МІКРОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ

Спеціальність 05.16.07

„Металургія металів високої чистоти та спеціальних сплавів“

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Київ 1997

Робот ЛННБ України ім.В.Стефаніка і Уїтні - Патон" та
Інститути



00753888 (\$)

Науки

Б.А.Мовчан

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ю.С.Борисов

доктор технічних наук, професор
С.П.Ошкадеров

Провідна установа: НВП "Машпроект"

Надсилаємо Вам для ознайомлення автореферат дисертації інженера
Коржа О.В. Просимо Вас та співробітників Вашої установи взяти участь у
засіданні спеціалізованої ради або надіслати свої відгуки у двох
примірниках, завірені гербовою печаткою установи, за адресою:

252650, Київ, вул.Боженка, 11, ІЕЗ ім. Є.О.Патона, вченому
секретарю спеціалізованої ради.

Захист дисертації відбудеться "25" червня 1997 р. о 10
годині на засіданні спеціалізованої ради К 50.02.02 при Інституті
електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці
інституту.

Автореферат розісланий "22" травня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради

доктор технічних наук
А.А.Бондарев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена розробці електронно-променевої технології одержання матеріалів та покриттів на основі титану.

Актуальність теми. Надійність та довговічність машин і апаратів визначаються високою конструктивною міцністю матеріалів та їх сумісністю з навколишнім середовищем. Більша частина цих матеріалів зазнає дії високотемпературного окислення, корозії, ерозії, та спрацьовується в процесі експлуатації.

Газові турбіни широко застосовуються в енергетиці, авіації, суднобудівництві, для перекачування газу і т.і. Основними шляхами покращення ефективності газових турбін, підвищення їх ККД, довговічності та надійності експлуатації є використання нових жаростійких і жароміцних конструкційних матеріалів, зокрема з титану та його сплавів.

Робочі та направляючі лопаті та інші деталі проточної частини газотурбінних двигунів (ГТД) експлуатуються в умовах все зростаючих швидкостей, навантажень та температур. Для збільшення ресурсу їх роботи розробляються матеріали з більш високим рівнем експлуатаційних властивостей.

Використання технології електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі дозволяє отримати матеріали, які можуть забезпечити потрібний рівень фізичних і механічних властивостей лопатей турбіни або компресора.

Представлена до захисту робота виконувалась як частина проекту 1239 "Розробити нові конструкційні мікродисперсні та мікрошарові матеріали на основі алюмінію, заліза, міді, нікелю, титану та методи їх одержання з використанням електронно-променевої технології", ДНТП 7.05.05/095-92 "Розробка та одержання нових класів металічних композиційних матеріалів", а також як частина технічної програми дослідницького центру "Пратт і Уїтні - Патон".

Метою роботи є визначення умов реалізації процесу високошвидкісного випаровування титану та його сплавів і створення на його основі технології одержання мікрокристалічних матеріалів на основі титану, які мають комплекс поліпшених фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей для використання у будівництві двигунів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались такі задачі:

1. Розробка способу високошвидкісного випаровування титану та його сплавів з використанням ванни-посередника.

2. Визначення закономірностей зміни структури і механічних властивостей двофазних конденсованих матеріалів на основі твердих розчинів титану з дисперсними частками оксиду итрію та бориду цирконію.

3. Розробка способу одержання мікрокристалічного матеріалу на основі титану, який має надпластичні властивості при зниженій (~ 600°C) температурі.

4. Розробка способу дифузійного зварювання титанових сплавів при зниженій температурі з використанням мікрокристалічних надпластичних та мікрошарових конденсованих матеріалів.

5. Розробка демпфуючого покриття для виробів з титанових сплавів.



6. Вивчення можливостей оптимізації структури та комплексу фізико-механічних властивостей квазімікрошарових матеріалів Ti/Ti₃Al.

Автор захищає:

1. Фізико-хімічний спосіб підвищення швидкості випаровування титану та його сплавів шляхом використання гарячого джерела, коли у ванну-посередник додається тугоплавкий метал (Nb, W, Ta або їх суміші),

2. Наукове та технологічне вирішення задачі підвищення рівня жароміцності дисперсноміцнітих титанових сплавів шляхом введення у матрицю зміцнюючої фази оксиду итрію (0.8-1.5 ваг.%) та підвищення міцності титанових сплавів за рахунок введення 0.5-2.5 ваг.% бориду цирконію (бориду титану) і відповідної термообробки.

3. Наукове та технологічне вирішення задачі одержання мікрокристалічних сплавів титану, надпластичних при температурі ~600°C.

4. Спосіб дифузійного зварювання титанових сплавів (наприклад Ti6Al4V), інтерметалідів та різнорідних матеріалів при зниженій (~700°C) температурі з використанням мікрошарової фольги або покриття, в котрих одним із шарів мікрошарового матеріалу є найбільш легкоплавкий компонент сплаву (наприклад алюміній), а другим шаром - матеріал того ж сплаву за винятком найбільш легкоплавкого компоненту (наприклад, сплав Ti4V для первинних деталей з Ti6Al4V).

5. Спосіб дифузійного зварювання титанових сплавів, наприклад Ti6Al4V, з прошарком надпластичного мікрокристалічного конденсату Ti6Al4V у вигляді фольги або покриття.

6. Спосіб підвищення декременту коливальних і загальної вібраційної стійкості деталей типу лопатей компресора ГТД шляхом нанесення двошарових (Ti+Ti6Al4V) покриттів методом електронно-променевого випаровування та конденсації з проміжною термомеханічною обробкою.

7. Результати досліджень стосовно закономірностей формування структури квазімікрошарових матеріалів Ti/Ti₃Al при осадженні з парової фази та подальшій термічній обробці, а також комплексу фізико-механічних властивостей таких матеріалів.

Наукова новизна роботи.

Встановлені закономірності підвищення швидкості випаровування титанових сплавів при електронно-променевому нагріванні матеріалу з використанням ванни-посередника різної форми, яка вміщує, окрім титану, метал з більш низькими значеннями пружності пари, теплопровідності, та такий що не утворює хімічних сполук з титаном. Запропоновано пояснення механізму підвищення швидкості випаровування і шляхи оптимізації цього процесу.

Експериментально показано можливість підвищення міцності і жароміцності сплавів титану завдяки зведенню зміцнюючих фаз бориду цирконію, оксиду итрію.

Вперше експериментально показано можливість одержання мікрокристалічного конденсату титанового сплаву Ti6Al4V, який демонструє відносне подовження ~500% при температурі 600°C. Запропоновано механізм низькотемпературної надпластичності,

визначено умови, необхідні для надпластичної поведінки конденсованого сплаву Ti6Al4V при зниженій температурі.

Запропоновано нове вирішення проблеми дифузійного зварювання матеріалів, в тому числі інтерметалідів і різномірних матеріалів, що базується на використанні конденсованих матеріалів, включаючи надпластичні конденсати та мікрошарові конденсати з відокремленим легкоплавким шаром.

Запропоновано спосіб підвищення декременту загасання коливань деталей типу лопатей ГТД шляхом нанесення одно- та двошарових покриттів та використання термомеханічної обробки.

Показано можливість одержання квазімікрошарових матеріалів типу твердий розчин - інтерметалід титану, який має унікальне поєднання пластичності та модулю пружності при кімнатній та підвищеній температурі.

Практична цінність роботи.

1. Розроблено процес високошвидкісного випаровування титанових сплавів з застосуванням ванни-посередника, який використовується при одержанні композиційних матеріалів і покриттів на основі титану різного призначення. Окрім підвищеної швидкості, процес суттєво відрізняється (у 3 рази) меншою енергомісткістю порівняно з базовим процесом.

2. Розроблено принципово нову технологію одержання заготовок (масивних дисків та фольги) із сплаву Ti6Al4V, які можуть надпластично деформуватися при температурах, нижчих на 200-300°C ніж сучасні листові заготовки із сплаву Ti6Al4V, які одержують методом багатоступінного прокатування/відпалювання. Такі заготовки можуть використовуватися при формуванні деталей складної форми, наприклад лопатей вентилятора та компресора ГТД як методами традиційного кування або штампування, але при суттєво знижених температурах, так і новітніми технологічними процесами типу SPF/DB.

3. Запропоновано спосіб дифузійного зварювання сплаву Ti6Al4V із використанням надпластичного покриття або фольги, який дозволяє значно знизити температуру зварювання, що набагато спрощує вимоги до обладнання для дифузійного зварювання виробів із сплаву Ti6Al4V. Показано можливість використання цього способу для виготовлення компресорних лопатей розміром до 250x250 мм сучасного ГТД.

4. Запропоновано спосіб низькотемпературного дифузійного зварювання сплавів на основі титану з використанням мікрошарових конденсатів у вигляді покриття або фольги. Можливості електронно-променевої технології щодо одержання мікрошарових конденсатів широкого спектру хімічного складу дозволяють поширити перевагу цього способу дифузійного зварювання на деталі з інтерметалідів та різномірних матеріалів.

5. Запропоноване двошарове покриття Ti-Ti6Al4V для компресорних лопатей ГТД із сплаву Ti6Al4V, що дозволяє суттєво (до 100%) підвищити довговічність цих лопатей в умовах втомленості від циклічного навантаження, яке оцінюється з урахуванням як декременту загасання коливань, так і межі втомленості за критерієм $R = \delta \cdot \sigma_{-1}$.

Апробація роботи. Основні наукові положення дисертації доповідалися і обговорювалися на XXIV сесії наукової ради "Нові процеси одержання і обробки металічних матеріалів" (Київ, 1988 р.), на загальносоюзних семінарах "Нові матеріали та виробы, одержані електронно-променевою технологією" (Київ, 1989 р.), "Структура та властивості алюмінідів титану" (Москва, 1991 р.), на третій Європейській (Схід-Захід) конференції по матеріалах та процесах (Страсбург, Франція, 1992 р.), на наукових семінарах у Дослідному Центрі компанії "Юнайтед Текнолоджіс" - "Можливості електронно-променевої технології одержання надпластичних матеріалів" та "Електронно-променеві демпфуючі покриття для виробів з титанових та нікелевих сплавів" (Іст Хатфорд, Конектікут, США, серпень та грудень 1993 р.), міжнародному симпозіумі "Перспективні матеріали та технології для XXI сторіччя" в межах 117-ї щорічної конференції Японського інституту металів (Гонолулу, Гавайї, США, 1995 р.), на науковому семінарі "Електронно-променеве фізичне осадження з парової фази" (Стейт Колледж, Пенсильванія, США, 1996 р.), на 5-й Міжнародній конференції з надпластичності у перспективних матеріалах (ICSAM'97, Бангпур, Індія, 1997 р.)

Публікації. Матеріали дисертації висвітлено у 14 публікаціях, у тому числі в 3 статтях у науково-технічному журналі "Проблеми спеціальної електрометалургії", 4 статтях у збірниках наукових праць ІЕЗ ім.Є.О.Патона, НВО "Сатурн" та Інституту проблем міцності НАН України, в одному патенті Російської Федерації та 3 позитивних рішеннях про видачу патенту України.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, 5 глав, загальних висновків, списку літератури із 132 джерел та додатку. Роботу викладено на 141 сторінках друкованого тексту, вона містить 87 малюнків, 12 таблиць.

У вступі обгрунтовано актуальність теми, наведено мету та поставлені завдання, які вирішувались у роботі, розкрито наукову новизну та практичну цінність роботи, наведено основні положення, що виносяться на захист.

В першій главі проведено аналіз літератури за питаннями дисертації. Розглянуто основні методи підвищення технологічних та експлуатаційних характеристик титанових сплавів, показано перспективність підвищення рівня цих характеристик шляхом створення мікрокристалічних структур методом швидкісного випаровування та конденсації. Проаналізовано сучасний стан досліджень, присвячених створенню надпластичних матеріалів на основі титану, показано можливість використання надпластичності матеріалів для одержання виробів складної форми, особливо в комбінації з дифузійним зварюванням. Звернуто увагу на те, що дослідження в цій галузі далеко не закінчені. В результаті сформульовано мету та завдання дослідження.

У другій главі наведено характеристики технологічного обладнання для одержання товстих конденсатів у вакуумі з використанням електронно-променевої технології випаровування та конденсації, розглянуто методики дослідження структури і властивостей покриттів та конденсатів.

У третій главі досліджено процес швидкісного випаровування титану з використанням гарячої ванни-посередника різної форми та розмірів. Оцінено енергетичні характеристики різних типів гарячих джерел. Наведено результати експериментальних досліджень щодо впливу швидкості випаровування на хімічний склад, структуру та властивості матеріалів та покриттів.

Четверту главу присвячено дослідженню структури та фізико-механічних властивостей дисперснозміцнених систем на основі твердих розчинів титану. Проаналізовано вплив зміцнюючої фази Y_2O_3 та ZrB_2 на механічні властивості конденсатів $Ti_2.SAl-Y_2O_3$, $Ti_2.SAl-ZrB_2$ та $Ti_6Al_4V-ZrB_2$ при кімнатній та підвищеній температурах. Виявлено ефект низькотемпературної ($600^\circ C$) надпластичності у вакуумних конденсатах типу $Ti_6Al_4V-ZrB_2$.

У п'ятій главі досліджено можливість дифузійного зварювання сплаву Ti_6Al_4V при знижених температурах з використанням прошарку мікрокристалічного надпластичного конденсованого титану та мікрошарових конденсатів Ti/Al і Ti_4V/Al . Продемонстровано можливість одержання мікрокристалічного конденсату рівномірної товщини для дифузійного зварювання великогабаритних лопатей компресора ГТД. Викладено результати досліджень, присвячених підвищенню демпфруючих властивостей титанових конструкцій шляхом нанесення двошарових покриттів. Наведено приклади експериментально-виробничого використання швидкісного електронно-променевого випаровування і конденсації в процесі ремонту титанових валів та нанесення титанових покриттів для дифузійного зварювання лопатей вентилятора і зменшення вібраційності лопатей компресора ГТД.

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експерименти з техніки високошвидкісного випаровування, одержання матеріалів і покриттів на основі титану методом електронно-променевого випаровування і конденсації виконувалися на електронно-променевих установках моделей УЕ-204 та УЕ-193 конструкції Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона.

Термообробка матеріалів і покриттів виконувалася в повітрі у печі типу СНОЛ-3 та у вакуумі в печі типу СНВ-1-3-1/16И1 з записом кривих температурного циклу віддалення. Обробка покриттів мікрокульками із сталі Р6М5 діаметром 160-200 мкм здійснювалася на установці УДМ-4 із швидкістю обертання ротора 3600 об/хв та безперервному обертанні зразків навколо власної осі із швидкістю 15 об/хв. Експерименти із дифузійного зварювання провадилися на машині У-847 конструкції Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона та на машині для дифузійного зварювання компанії "Texas Instruments", встановленій на фірмі "Pratt & Whitney", США.

Мікроструктуру матеріалів та покриттів, розподіл їх товщин вивчали за допомогою оптичних мікроскопів "Neophot-21" та "Polyvar-Met", а також растрового електронного мікроскопу "CamScan-4". Для виявлення мікроструктури титанових матеріалів хімічне травлення провадили у

реагтиві Кролла. Мікротвердість визначали за ГОСТ19440-74 на приладі ПМТ-3 під навантаженням 0.5 Н та 1.0 Н.

Тонку структуру мікрокристалічних конденсатів досліджували за допомогою трансмісійного електронного мікроскопа "Phillips-400".

Хімічний аналіз конденсатів провадився як традиційними методами "микрохімії", так і рентгенівським флюоресцентним способом на приладі "X'Unique" фірми "Phillips". Вміст кисню вимірювався на приладі RO-316 фірми "LECO" методом відновлюючого плавлення в потоці газу-носія. Мікрорентгеноспектральні дослідження провадилися на приладах MS-46 "Cameca" та "Camebax".

Фазовий аналіз конденсатів виконували на дифрактометрі ДРОН-3.

Умовну межу текучості, межу міцності та відносно подовження конденсатів визначали в іспитах на розтяг стандартних плоских зразків на машині ПРВ-302М із записом зусиль від тензометричного мосту на потенціометрі ЕПП-069. Визначення механічних властивостей в умовах підвищених температур провадилося на тому ж обладнанні у вакуумі 1.3×10^{-1} Па.

Механічні властивості дифузійних з'єднань визначали випробуванням на розтяг при кімнатній температурі на циліндричних зразках на розтяжній машині ПРВ1500. Зразки вирізалися із зварених деталей, таким чином, щоб площа дифузійного з'єднання була перпендикулярною напрямку прикладання розтягуючого зусилля і знаходилася посередині довжини робочої частини зразка.

Вимірювання модуля пружності та межі витривалості досліджуваних матеріалів провадилися за методиками Інституту проблем міцності НАН України на установці УП-2. Декремент коливань визначався на тому ж обладнанні за шириною піка резонансної кривої на рівнях 0.5 та 0.7 від максимальної циклічної деформації.

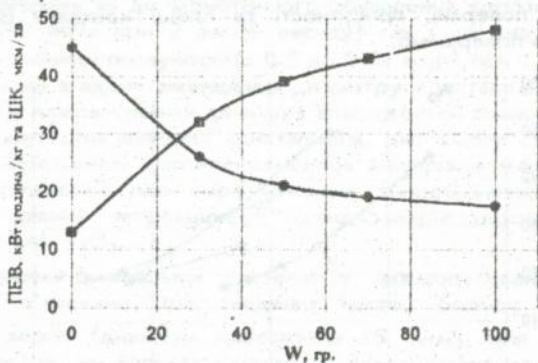
Статистичну обробку одержаних результатів (розрахунок середніх значень, середньоквадратичного відхилення, коефіцієнта варіації) провадили із застосуванням пакета програм "Statgraphics 6.0".

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Практичне використання електронно-променевої технології залежить від розробки та впровадження нових методів високошвидкісного випаровування та конденсації, які б зменшили собівартість нанесення покриттів або одержання конденсованих матеріалів. В сьогоденній практиці для випаровування титану та його сплавів використовують стандартний водоохолоджуваний мідний тигель; титановий сплав подається для випаровування у вигляді стрижню діаметром 68.5 мм. Завдяки вивченню процесу випаровування та конденсації титану з такого тигля зроблено висновок, що, окрім добре відомої з літератури залежності механічних властивостей титану від температури конденсації, існує також залежність цих властивостей від швидкості конденсації, зокрема відносно подовження конденсатів йодидного титану збільшується із 20 до 38 % з зростанням швидкості конденсації від 5 до 11 мкм/хв. Взагалі, випаровування титану із стандартного тигля характеризується питомою енергією випаровування (ПЕВ) 42-50 кВт·год/кг та швидкістю конденсації (ШК) на стаціонарну підложку, розташовану на відстані 300 мм, 5-15 мкм/хв.

В подальших дослідженнях було зроблено спробу підвищення швидкості випаровування двома способами: 1) шляхом збагачення ванни, що виникає у стандартному тиглі під час випаровування, тугоплавкими речовинами (вольфрамом, ніобієм або танталом); 2) шляхом переливання розплавленого титану на гарячу поверхню вольфраму або ніобію, що знаходилися у суміжному тиглі. Суттєвим в обох випадках було те, що пружність пари вказаних тугоплавких речовин в усьому потенційному діапазоні температур випаровування титану (1900-2200°C) була на 4-6 порядків меншою за пружність пари титану. Жодна з цих речовин також не створювала хімічних сполук із титаном, що є передумовою відтворення добре контрольованої за формою ванни.

За даними експериментів, проведених за першим способом, типовий вигляд залежності ПЕВ та ШК від маси доданої тугоплавкої речовини (в цьому випадку вольфраму) наводиться на мал.1. При постійних значеннях електричного струму електронно-променевого нагрівання, збільшення вмісту вольфраму до 100 г викликає зменшення ПЕВ до 18 кВт·год/кг та збільшення ШК до 48 мкм/хв. Аналогічні закономірності встановлено для ніобію та танталу.



Мал.1. ПЕВ (■) та ШК (●) в залежності від маси доданого вольфраму.

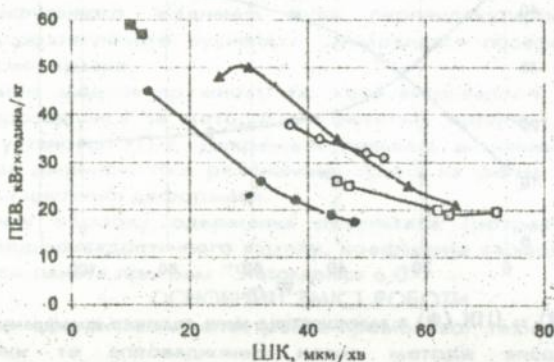
В ході виконання експериментів за другим способом, були створені спеціальні системи випаровувачів з робочими назвами "70-100", "70-70", "70-60", де перша цифра "70" відповідає діаметру підживлюючого стрижня титану, а друга цифра відповідає діаметру поверхні випаровування суміжного тиглю, до якого завантажувався тугоплавкий елемент. Випаровувачі мали різну геометрію зони переливання. Вивчалися можливі варіанти техніки переливання титану, залежності ПЕВ та ШК від струму випаровування.

В результаті експериментів з'ясовано, що в усіх досліджених системах при стаціонарному підживленні титаном виникає спільна ванна, збагачена важкими елементами, яка може використовуватися в режимі стаціонарного випаровування. В таких системах з переливанням було досягнуто значення ПЕВ в діапазоні 19-31 кВт·год/кг та значення ШК в

діапазоні 55-70 мкм/хв. Різноманітна геометрія випаровувачів дає змогу ефективно змінювати геометрію парового потоку, оптимізуючі її для конденсації покриття на конкретній виріб.

На мал.2 наведено криві "ПЕВ-ШК", які є енергетичними характеристиками вивчених джерел випаровування титану. Їх подібний вигляд дає підставу зробити припущення, що явище зростання швидкості випаровування з одночасним зменшенням питомої енергії випаровування має спільну природу для всіх розглянутих випадків. Введення у ванну вольфрам, ніобію або танталу змінює тепловий баланс процесу випаровування і призводить до зростання температури ванни. Одночасне підвищення щільності та кінематичної в'язкості ванни гальмує процес виникнення бульбашок, що містять пару домісних елементів, і таким чином зменшує розбризкування ванни під час випаровування. Швидкість випаровування та енергетична ефективність підвищуються завдяки експоненційному збільшенню пружності пари титану при підвищенні температури ванни.

Різниця в енергетичних характеристиках систем випаровувачів зумовлена особливостями тепловідводу від гарячої ванни - розміром тепловідвідної поверхні, присутності та площі контакту рідкої фази з тепловідвідною поверхнею.



Мал.2. Залежності "ШК-ПЕВ" для стандартного тигла з вольфрамом (●), випаровувачів "70-100" (▲), "70-70" (○), "70-60" (□) та тигла з великим внутрішнім об'ємом (■).

Вакуумні конденсати, одержані в експериментах з високошвидкісного випаровування, були досліджені на механічні властивості та вміст кисню в залежності від швидкості конденсації. Встановлено, що збільшення швидкості процесу випаровування і конденсації матеріалу на основі титану сприяє підвищенню чистоти конденсату, що в свою чергу підвищує його пластичність. Так, за даними випробувань 5 конденсатів, одержаних за схемами "70-100" та "70-70", підвищення швидкості конденсації технічно чистого титану (сплав ВТ-1-0) на підложку, що обертається, з 7 до 28 мкм/хв зменшує вміст кисню більше ніж у 2 рази (з 0.11 до 0.04 wag.%) і

в 2.5-3.0 рази збільшує пластичність конденсату (з 7-10 до 25-30 %) при постійній межі міцності.

За результатами вивчення процесу високошвидкісного випаровування титану було прийнято рішення використовувати у подальших дослідженнях найбільш практичну з точки зору контролю рівня ванни схему випаровування із стандартного тиглю з додаванням до ванни ніобію.

Для дослідження впливу дисперсних часток на структуру та властивості конденсованих сплавів титану були одержані конденсати систем $Ti2.5Al-Y_2O_3$, $Ti2.5Al-ZrB_2$, $Ti6Al4V-ZrB_2$ з градієнтом концентрації часток вздовж поверхні конденсації. Під час досліджень системи $Ti2.5Al-Y_2O_3$ встановлено, що конденсати з однофазною α -матрицею мають стовпчасту структуру, діаметр кристалітів зменшується з 10 до 2 мкм із збільшенням вмісту оксиду титану до 1.25 ваг.%. Сферичні частки Y_2O_3 мають діаметр 30...60 нм. Залежності механічних властивостей від вмісту часток при кімнатній температурі мають немонотонний вигляд з максимумом як міцності (920 МПа) так і відносного подовження (6%) близько 1 ваг. % вмісту оксиду. При 600°C зростання вмісту дисперсних часток призводить як до монотонного збільшення короточасної міцності (до рівня 150 МПа при 2 ваг. % оксиду) так і до значного зменшення швидкості усталеної позачастотності (з 0.5 до 0.01 год⁻¹ при 1.3 ваг. % оксиду), незважаючи на згадане зменшення діаметру кристалітів. Зіставлення цих результатів із літературними даними з властивостей аналогічних матеріалів, отриманих методом швидкої кристалізації, дає змогу стверджувати, що електронно-променеві дисперснозміцнені матеріали мають дещо вищий рівень властивостей при короточасних випробуваннях і відповідають приблизно рівню жароміцності швидкозакристалізованих матеріалів системи $Ti2.5Al-Y_2O_3$.

При вивченні модельної системи з низьколеговою α -матрицею $Ti2.5Al-ZrB_2$ з'ясовано, що введення часток бориду при конденсації подрібнює зерно (діаметр кристалітів ≤ 5 мкм), але як і у випадку оксидних часток, не впливає суттєво на стовпчастість структури - висота кристалітів щонайменше у 10 разів перевищує їх діаметр. Із збільшенням вмісту часток (до 4-5 ваг. %) межа міцності монотонно зростає з 700 до 1050 МПа, а відносне подовження зменшується з 9 до 1.5 %. Відпалювання у β -зоні, що провадилося для вивчення можливостей гомогенізації хімічного складу та потенційно можливого негативного ефекту коагуляції часток бориду, продемонструвало стабільність властивостей конденсату при вмісті часток до 2 ваг. %, та істотне окрихчування матеріалу з більшим вмістом бориду. В цілому доведено можливість використання боридних часток для зміцнення низьколегової α -матриці та гомогенізації структури шляхом відпалювання з одержанням оптимальних властивостей конденсату при вмісті бориду цирконію у межах 0.7-1.0 ваг. %.

Найбільш цікаві результати було одержано при вивченні системи $Ti6Al4V-ZrB_2$. Підтверджено, що як і у випадку з однофазною α -матрицею $Ti2.5Al$, так і з двофазною ($\alpha+\beta$)-матрицею міцність конденсату при

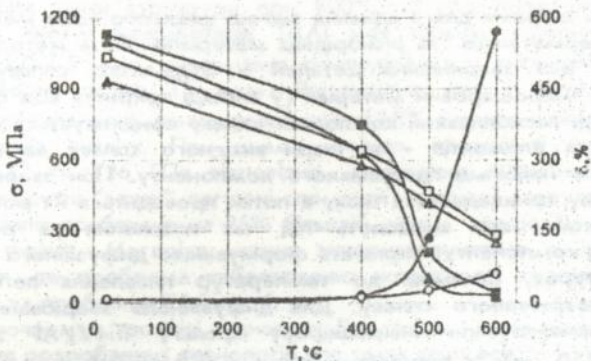
введенні бориду підвищується. Пластичність змінюється немонотонно, положення максимуму пластичності в залежності від концентрації бориду пов'язане з температурою конденсації. При 800°C він сягає 11% і відповідає 2.5 ваг.% бориду, при 650°C він дорівнює 7.5% і відповідає 0.5-1.0 ваг.% бориду (межа міцності в обох випадках ≥ 1000 МПа).

Високотемпературні (600°C) механічні випробування матеріалу Ti6Al4V-ZrB₂, що був конденсований при 650°C, виявили, що існують монотонні концентраційні залежності межі міцності та відносного подовження, причому мінімальна міцність (≤ 50 МПа) та максимальне подовження ($\approx 600\%$) відповідають найменшому дослідженому вмісту часток 0.25 ваг.%. Порівняння цих даних з літературними даними дозволяє стверджувати, що ми маємо справу з надпластичною поведінкою матеріалу на основі сплаву Ti6Al4V при надзвичайно низькій температурі; типова температура переходу сплаву Ti6Al4V до стану надпластичності за даних умов навантаження (швидкість розтягування $\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) становить 900-925°C.

Структурні дослідження, проведені для з'ясування природи зафіксованого явища низькотемпературної надпластичності (ННП), виявили, що при згаданій температурі конденсації в системі Ti6Al4V-ZrB₂ з двофазною ($\alpha + \beta$)-матрицею виникає мікрокристалічна структура з розміром зерна $\sim 0,5$ мкм та об'ємною часткою нерівноважної α -фази $\geq 80\%$ незалежно від вмісту бориду. Ступінь стовпчатості (відношення висоти до діаметру кристалітів) значно (у 3-4 рази) менше, ніж у конденсатах з однофазною α -матрицею. Зіставлення структур зони надпластичної деформації та первинної до початку деформації дозволило дійти висновку, що процесами, які визначають надпластичність конденсованого Ti6Al4V при знижених температурах є безперервне зростання зерна та розпад метастабільної α -фази, що супроводжує його, в процесі деформації, з виділенням у трійних точках і частково на межах зерен надлишкової β -фази, яка полегшує зернограничне просковзування та забезпечує безперервність деформації.

Встановлено, що борид цирконію в процесі випаровування та конденсації одночасно із сплавом Ti6Al4V дісоціює, і бор під час охолодження конденсату виділяється у формі голчастих часток монобориду титану. Борид не відіграє принципової ролі ані у формуванні нерівноважної мікрокристалічної структури, ані у процесі ННП, і в подальших дослідженнях використовувалися надпластичні конденсати, одержані без додавання бориду цирконію.

Механічні властивості мікрокристалічного нерівноважного конденсованого сплаву Ti6Al4V в залежності від температури випробування (швидкість розтягування $\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) в первинному та термообробленому стані наведено на мал.3. Після термообробки рівноважна структура втрачає надпластичні властивості і матеріал може використовуватися як конструкційний в широкому діапазоні температур.



Мал.3. Механічні властивості мікрокристалічного Ti6Al4V:

■, ▲, ● - відповідно σ_{II} , $\sigma_{0,2}$, δ у вихідному стані;

□, △, ○ - відповідно σ_{II} , $\sigma_{0,2}$, δ після відпалування при температурі 1000°C, 2 год

Вивчення поведінки мікрокристалічного Ti6Al4V в екстремальних умовах надпластичності дали змогу виявити, що надпластична деформація може бути отримана при мінімальній температурі 500°C та швидкості навантаження $1.3 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$, або при максимальній швидкості навантаження $\sim 8 \times 10^{-2} \text{с}^{-1}$ і температурі 800°C.

Зафіксований ефект ННП було використано в експериментах з дифузійного зварювання при зниженій температурі. Надпластичний Ti6Al4V розміщували як прошарок між зварюваними зразками або у вигляді покриття (товщина 10-50 мкм), або у вигляді фольги (товщина 100-300 мкм), сконденсованої завчасно. Експериментально доведено, що в обох випадках при режимі дифузійного зварювання: температура 700°C, тиск 20 МПа, 1 год, - надпластична течія конденсованого прошарку дозволяє заповнювати мікронерівності поверхні зварюваних деталей і забезпечувати формування вільного від пор дифузійного з'єднання. Типова температура формування дифузійного з'єднання сплаву Ti6Al4V за традиційною технологією перевищує 900°C при таких самих значеннях тиску та тривалості зварювання. Механічні випробування дифузійних з'єднань на відрив виявили, що у стані безпосередньо після зварювання, коли існує великий розбіг у розмірах зерна зварюваних деталей (типово більше 10 мкм) та прошарку (менш за 1 мкм), міцність з'єднання близька до рівня міцності зварюваних деталей з Ti6Al4V, але відносно подсаження незадовільне. Відпалування у $(\alpha+\beta)$ -зоні при 940°C, 1 год вирівнює розміри зерен прошарку та деталей і наближає значення міцності та пластичності з'єднання до рівня цих показників промислового сплаву Ti6Al4V ($\approx 1000 \text{МПа}$, $\approx 8\%$).

Було також запропоновано універсальніший варіант дифузійного зварювання з використанням мікрошарових матеріалів з відокремленими

легкоплавкими шарами для з'єднання значно ширшого кола матеріалів, в тому числі інтерметалідів та різнорідних матеріалів. Суть методу полягає в тому, що для зварювання деталей з будь-якого сплаву спершу конденсується мікрошаровий матеріал (у вигляді покриття або фольги), в якому найбільш легкоплавкий компонент сплаву конденсується як окремі шари, а решта елементів - як шари вихідного сплаву за винятком відокремленого найбільш легкоплавкого компоненту. При зварюванні до деталей спершу прикладається тиск, а потім провадиться їх розігрівання. Дифузійні потоки, що виникають під час плавлення та розчинення легкоплавкого компоненту, сприяють формуванню дифузійного з'єднання при температурах, близьких до температур плавлення легкоплавкого компоненту зварюваного сплаву. Для дифузійного зварювання сплаву Ti6Al4V використовували мікрошарову фольгу Ti4V/Al загальною товщиною ≈ 150 мкм з товщинами шарів ≈ 3.0 та 0.3 мкм відповідно. Дифузійне з'єднання зразків із задовільними властивостями одержано за режимом: температура 750°C , тиск 20 МПа, тривалість 15 хв з термообробкою при 800°C , 2 год.

Було проведено дослідження можливості виробництва крупногабаритних (діаметр 800 мм) дискових фольг з покращеним розподілом товщі фольги вздовж радіусу для використання при дифузійному зварюванні великих деталей. Експериментально доведено, що комбінуючи геометрією розташування випаровувачів у вакуумній камері та використанням екранів для перерозподілу парових потоків, можна отримати мікрокристалічні фольги зазначеного діаметру, в яких відхилення від середньої товщини не перевищує $\pm 7\%$, що є достатнім для практичного застосування таких фольг.

Проведено дослідження впливу одношарових (Ti) та двошарових (Ti+Ti6Al4V) покриттів різної товщини та структури на зразках із сплаву Ti6Al4V на декремент δ загасання коливань (ДЗК) та опір втомленості σ_{-1} (ОВ) таких зразків. Встановлено, що одношарові титанові покриття можуть підвищувати ДЗК до 60 відсотків від первинного рівня, але одночасно призводять до зменшення рівня ОВ. За комплексним критерієм $R = \delta \cdot \sigma_{-1}$ зразки з одношаровим покриттям не мають істотних переваг перед вихідними зразками з Ti6Al4V.

У випадку двошарових покриттів, комбінація стиснених умов деформації у прошарку чистого титану з підвищенням ОВ за рахунок зовнішнього шару Ti6Al4V, особливо у варіантах з обробкою покриттів мікрокульками із сплаву P6M5, забезпечує значне (до 2 разів) підвищення надійності роботи зразків з двошаровим покриттям в умовах вібрації, оцінене за критерієм R . Встановлено також, що значення критерію R зростає із збільшенням рівня циклічної деформації, тобто демпфуючі властивості двошарового покриття зростають у разі збільшення вібраційних навантажень у будь-яких випадках нештатного режиму роботи титанових деталей (лопатеї компресора, винтилятора тощо).

Виконано дослідження структури та властивостей мікрошарових матеріалів з тонкими (≈ 0.5 мкм) частково розкладеними шарами Ti/Ti3Al.

Термообробка такої структури при 900°C, 4 год дозволяє одержати матеріал, в якому інтерметалід Ti₃Al має форму сферичних часток діаметром 1.0-2.5 мкм, рівномірно розподілених у титановій матриці з розміром зерна понад 15 мкм. Як вихідна, так і термооброблена структури забезпечують рівень пластичності ≥8% в системі твердий розчин - інтерметаллід титану. При цьому модуль пружності цих структур становить 132 та 126 ГПа відповідно, а завдяки зменшеній щільності матеріалу (відсутні "важкі" легуючі елементи) питомий модуль пружності таких матеріалів приблизно на 25% більший, ніж у традиційних матеріалів на основі титану. Матеріал може використовуватися в оболонкових конструкціях, де проблема забезпечення жорсткості конструкції інколи актуальніша за проблему її міцності.

В заключному розділі дисертації також наведено приклади використання розроблених технологій для таких процесів:

- ремонт та відновлення спрацьованих шийок високоточних титанових валів кріогенної техніки компанії "Rocketdyne";

- одержання мікрокристалічних та мікрошарових покриттів та фольги, які використовуються при виготовленні дослідних прототипів лопатей ГТД серії PW-4000 способом низькотемпературного (700°C) дифузійного зварювання.

- одержання великогабаритних мікрокристалічних фольг із сплаву Ti6Al4V, які використовуються для низькотемпературної (≤700°C) консолідації композитів Ti6Al4V/SiC компанією "Textron".

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.

1. Розроблено метод та техніку високошвидкісного випаровування титану та його сплавів. Підвищення швидкості випаровування досягається завдяки використанню ванни-посередника, що вміщує, окрім титану, метал з більш низькими пружністю пари та теплопровідністю (наприклад ніобій, вольфрам, тантал) і не утворює тугоплавких хімічних сполук з титаном.

2. Введення ванни-посередника, яка містить ніобій, вольфрам або тантал, змінює тепловий баланс процесу випаровування титану та призводить до підвищення температури ванни. Підвищення щільності та кінематичної в'язкості ванни гальмує процес виникнення бульбашок і таким чином зменшує розбризування матеріалу ванни. Швидкість випаровування та енергетична ефективність підвищується за рахунок експоненційного збільшення пружності пари титану при підвищенні температури ванни.

Оптимальною на данному етапі досліджень є питома енергія процесу випаровування 15-20 кВт·год/кг і швидкість конденсації титану 70 мкм/хв.

3. Встановлено, що підвищення швидкості процесу випаровування і конденсації матеріалу на основі титану, що дає очевидні економічні переваги, сприяє підвищенню чистоти конденсату, а це в свою чергу підвищує його пластичність. Так, підвищення швидкості конденсації чистого титану на підложку, що обертається, з 7 до 28 мкм/хв зменшує вміст кисню більше як у 2 рази і в 2.5-3.0 рази збільшує пластичність конденсату при постійній межі міцності.

4. Встановлено, що конденсовані α -сплави титану (Ti, Ti2.5Al), які вміщують 0.8...1.5 ваг.%, зміцнюючої фази Y_2O_3 , за жароміцністю не поступаються дисперснозміцненим титановим сплавам Ti-Y, одержаним способом швидкої кристалізації.

5. Встановлено, що введення при конденсації часток ZrB_2 у кількості до 2.5% у низьколеговану матрицю Ti2.5Al підвищує міцність матеріалу при кімнатній температурі до 1100 МПа. Подальше збільшення вмісту боридів приводить до загублення пластичності. Оптимальний вміст бориду - 0,7-1,2 ваг.%.

6. Встановлено, що конденсати сплаву Ti6Al4V та системи Ti6Al4V- ZrB_2 , які мають мікрокристалічну структуру з розміром зерна $\sim 0,5$ мкм та об'ємною часткою нерівноважної α -фази $\geq 80\%$, демонструють аномально високу пластичність (до 500%) при температурі випробування 600°C (швидкість розтягування $\dot{\epsilon}=1,7 \times 10^{-3} c^{-1}$) Таку низьку температуру переходу до надпластичної деформації у конструкційного матеріалу на основі титану зафіксовано вперше.

7. Результати досліджень мікрокристалічного Ti6Al4V у крайніх умовах надпластичності показали, що надпластичну деформацію можна одержати при мінімальній температурі 500°C та швидкості навантаження $1.3 \times 10^{-4} c^{-1}$ або при максимальній швидкості навантаження $\sim 8 \times 10^{-2} c^{-1}$ і температурі 800°C.

8. Завдяки металографічним дослідженням доведено, що процесами, які визначають надпластичність конденсованого Ti6Al4V при знижених температурах, є безперервне зростання зерна та розпад метастабільної α -фази, що супроводжує його, в процесі деформації, з виділенням у трійних точках і частково на межах зерен надлишкової β -фази, яка полегшує зернограничне просковзування та забезпечує безперервність деформації.

9. На основі встановленого явища низькотемпературної надпластичності запропоновано новий підхід до дифузійного зварювання титанових сплавів при знижених температурах шляхом використання фольги або покриття з мікрокристалічних конденсованих матеріалів.

Термообробка і/або гаряче ізостатичне пресування отриманих з'єднань гомогенізує структуру в області з'єднання і наближає рівень властивостей з'єднання до основного металу.

10. Запропоновано більш універсальний варіант дифузійного зварювання шляхом використання мікрошарових матеріалів з відокремленими легкоплавкими шарами для з'єднання значно ширшого кола матеріалів, в тому числі інтерметалідів та різнорідних матеріалів. Для дифузійного зварювання сплаву Ti6Al4V рекомендовано використовувати мікрошарову фольгу Ti4V/Al загальною товщиною ≈ 150 мкм та з товщинами шарів відповідно ≈ 3.0 та 0.3 мкм.

11. Встановлено, що одношарові (Ti) та двошарові (Ti+Ti6Al4V) покриття на зразках із сплаву Ti6Al4V значно підвищують декремент загасання коливань конструкції. Запропоновано використовувати дво-

шарове покриття оптимальної структури, яке дозволяє набагато підвищити надійність титанових виробів в умовах циклічного навантаження (яке оцінюється за критерієм $R = \delta \times \sigma_{-1}$), - до 2 разів.

12. Виконано дослідження структури та деяких властивостей мікрошарових матеріалів з тонкими (≈ 0.5 мкм), частково розкладеними шарами Ti/Ti_3Al . Показано, що питомий модуль пружності таких матеріалів більш як на 25% перевищує модуль пружності традиційних матеріалів на основі титану, зберігаючи встановлений рівень пластичності ($\geq 8\%$). Термомеханічна обробка дозволяє цілеспрямовано змінювати структуру, статичні та динамічні характеристики квазімікрошарових матеріалів системи Ti/Ti_3Al .

13. Розроблено електронно-променеві технології для таких процесів:

- ремонт та відновлення спрацьованих шийок високоточних титанових валів кріогенної техніки компанії "Rocketdyne";

- одержання мікрокристалічних та мікрошарових покриттів та фольги, які використовуються при виготовленні дослідних прототипів лопатей ГТД серії PW-4000 способом низькотемпературного ($700^\circ C$) дифузійного зварювання;

- одержання великогабаритних мікрокристалічних фольг із сплаву Ti_6Al_4V , які використовуються для низькотемпературної ($\leq 700^\circ C$) консолідації композитів Ti_6Al_4V/SiC компанією "Textron".

14. Одержано патент Російської Федерації на низькотемпературний надпластичний матеріал на основі титану. Подано заявки на одержання аналогічних патентів на Україні, США та країнах Патентного договору (РСТ).

Одержані позитивні рішення про видачу патента України на метод високошвидкісного випаровування з використанням ванни-посередника та на способи низькотемпературного дифузійного зварювання з використанням мікрокристалічних та мікрошарових матеріалів.

Основні результати дисертації висвітлені в роботах:

1. Конструкционные покрытия на лопатках авиационных ГТД / Б.А.Мовчан, В.И.Топал, Н.И.Гречанюк, А.В.Корж // Электроинно-лучевые и газотермические покрытия: Сб. науч. тр.-Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1988.-С.77-82.

2. Некоторые особенности структуры и усталостной прочности лопаток с конструкционными покрытиями / А.В.Корж, В.И.Топал, А.Н.Данилков // Электроинно-лучевые и газотермические покрытия: Сб. науч. тр.-Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1988.-С.82-87.

3. Лопатки ГТД с конструкционными покрытиями / В.И.Топал, А.В.Корж, В.И.Филатов, А.А.Трофименко // Труды НПО "Сатурн", Вып.1.- М.: НПО "Сатурн", 1988.-С.368-373.

4. Корж А.В., Нероденко Л.М., Молодкина Т.А. Структура и механические свойства дисперсноупрочненных конденсатов $Ti-Y_2O_3$ // Пробл. спец. электрометаллургии.-1991.-№4.-С.32-35.

5. Korzh A.V., Nerodenko L.M., Molodkina T.A. Structure and Mechanical Properties of Dispersion-Hardened Condensed Ti-Y₂O₃ Materials // *Advances in Special Electrometallurgy*.-1991-7(4).-P.275-277.
6. Корж А.В., Мовчан Б.А. Сверхпластичность в конденсированных из паровой фазы конструкционных материалах системы Ti6Al4V-ZrB₂ // *Пробл. спец. электрометаллургии*.-1992.-№3.-С.44-48.
7. Korzh A.V., Movchan B.A. Superplasticity in Vapor Phase Deposited Structural Materials of Ti6Al4V-ZrB₂ System // *Advances in Special Electrometallurgy*.-1992-8(3).-P.201-203.
8. Корж А.В., Луговской Ю.Ф., Вдовиченко А.В. Статические и динамические свойства квазимикрослойных конденсированных материалов системы Ti-Ti₃Al // *Актуальные вопросы материаловедения. Сборник научных трудов*.-Киев: ИПМ,-1991.-с.75-80.
9. Korzh A., Alyoshin G. Superplastic Properties of Massive Vacuum Deposited Ti-6Al-4V Alloy // *Book of Abstracts of 3rd European East-West Conference & Exhibition on Materials and Processes: (EMRS-MatTech-f.e.m.s. Joint Conference)*.-Strasbourg (France), Nov.3-6, 1992.
10. Мовчан Б.А., Осокин В.А., Гречанюк Н.И., Корж А.В., Васильев В.Г. Термический коэффициент линейного расширения конденсированных микрослойных материалов Cu-Y/Mo. Сообщение 2. // *Пробл. спец. электрометаллургии*.-1994.-№1.-С.45-48.
11. Movchan B.A., Osokin V.A., Grechanyk N.I., Korzh A.V., Vasil'ev V.G. Thermal Coefficient of Linear Expansion of Condensed Microlaminated Materials Cu-Y/Mo. Report 2. // *Advances in Special Electrometallurgy*.-1994-12(1).-P.215-218.
12. Korzh A., Snow D., Movchan B. Low-Temperature Superplasticity in EB PVD Titanium Alloys // *Abstracts of International Symposia on Advanced Materials and Technology for the 21st Century / The 117th Meeting of Japan Institute of Metals*.- Honolulu, USA.-December 13-15.-1995.-P.148.
13. Патент №2034083 Российской Федерации. Материал на основе титана/ Мовчан Б.А., Корж А.В.-Опубл. 30.04.95, Бюл.№12.
14. Korzh A., Belyavin A., Snow D. Low-Temperature Superplasticity in EB PVD Titanium Alloys // *Superplasticity in Advanced Materials ICSAM-97. Proceedings of the International Conference. Bangalore, India.- Materials Science Forum*.- Vols.243-245 (1997). - P.603-608.

Особистий вклад автора.

В [1,2,3] виконано експериментальну частину і винайдено механізм, відповідальний за зниження межі міцності. В [4,5] одержанно конденсати та проведено аналіз впливу часток Y₂O₃ на їх короточасні механічні властивості. В [6,7,9] досліджено умови виникнення та параметричні межі існування явища низькотемпературної надпластичності в системі Ti6Al4V-ZrB₂. В [12,14] запропоновано пояснення механізму низькотемпературної надпластичності в системі Ti6Al4V-ZrB₂ та експериментально обрентовано можливі шляхи використання цього явища для дифузійного зварювання та виготовлення волоконних композитів. В [13] запропоновано межі хімічного складу для низькотемпературних надпластичних конденсованих

титанових матеріалів. В [8] досліджено вплив термообробок на структуру та статичні властивості квазімікрошарових конденсатів. В [10,11] проведено статистичну комп'ютерну обробку експериментальних даних.

АННОТАЦИЯ

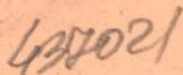
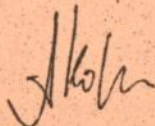
Корж А.В. "Исследование и разработка электронно-лучевой технологии осаждения из паровой фазы микрокристаллических материалов на основе титана", рукопись диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности "Металлургия металлов высокой чистоты и специальных сплавов", Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, Киев, 1997 г. Защищается метод и техника высокоскоростного испарения титана и его сплавов с использованием горячего источника, закономерности изменения структуры и свойств в двухфазных конденсатах титана с дисперсными частицами оксида иттрия и борида циркония, структура и свойства микрокристаллических конденсатов Ti6Al4V, сверхпластичных при 600°C, новый подход к решению проблемы диффузионной сварки материалов с использованием сверхпластичных и микрослойных конденсатов, а также структура и некоторые свойства квазимикрослойных материалов типа Ti/Ti3Al, структура и свойства демпфирующего электронно-лучевого покрытия на изделиях из титановых сплавов.

Ключевые слова: высокоскоростное испарение, микрокристаллические материалы, микрослойные материалы, сверхпластичность, диффузионная сварка, демпфирующие покрытия, сплавы титана, электронно-лучевая технология.

ABSTRACT

Korz A.V. "Research and development of EB PVD technology for titanium-based microcrystalline materials", manuscript of the thesis for the candidate of technical sciences degree in speciality "Metallurgy of high purity materials and special alloys". Defended are the method and technique for high rate evaporation of titanium alloys from the "hot pool", structures and properties of two-phase titanium-based condensed materials with Yttria and zirconium boride disperse particles, structures and properties of microcrystalline condensates of Ti6Al4V superplastic at 600°C, a new approach to diffusion bonding of materials using micrograin superplastic or microlaminate condensed materials, structures and properties of Ti/Ti3Al quasi-microlaminate materials, as well as structures and properties of vibration damping EB PVD coatings for titanium articles.

Key words: EB PVD, high-rate evaporation, micrograin materials, microlaminate materials, superplasticity, diffusion bonding, vibration damping coatings, titanium alloys.



AB 37.900