

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СТАСЮК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.762.5+621.762.8

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ТУГОПЛАВКИХ ВИСОКОМОДУЛЬНИХ
СПОЛУК НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ СПЕЧЕНИХ ТИТАНОВИХ
СПЛАВІВ**

Спеціальність 05.16.06 – Порошкова металургія та композиційні матеріали

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: Доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Баглюк Геннадій Анатолійович

Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, заступник директора з наукової роботи

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор

Рудь Віктор Дмитрович

Луцький національний технічний університет МОН України, професор кафедри прикладної механіки

Доктор технічних наук, доцент

Скачков Віктор Олексійович

Запорізька державна інженерна академія МОН України, професор кафедри металургії

Захист відбудеться “04” червня 2019 року о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. №9, ауд. 203.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці імені Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, НТБ НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Автореферат розісланий “03” травня 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

кандидат технічних наук, доцент



О.В. Степанов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Титан та його сплави мають унікальним комплексом властивостей (висока міцність в широкому інтервалі температур, низька густина, висока стійкість до корозії), що дозволяє використовувати ці матеріали у найвідповідальніших галузях промисловості, таких, як: авіабудування, космічна галузь, автомобілебудування, хімічна і нафтова промисловість, медицина, а також військова галузь. Проте, по мірі розвитку технологій, вимоги до матеріалів підвищуються і титанові сплави не завжди можуть їм відповідати. Насамперед, титанові сплави потребують покращення триботехнічних характеристик, підвищення робочих температур, також, на даний час, особливої уваги потребує створення титанових матеріалів, які б комбінували високі показники міцності та твердості при достатній в'язкості, необхідних, зокрема, в оборонній промисловості, для створення елементів балістичного захисту. Забезпечення такої комбінації властивостей може бути реалізовано шляхом створення металоматричних композитів на основі титану та його сплавів.

На сьогоднішній день однією з головних проблем матеріалознавства титану є, також, розробка нових технологій, які б дозволили забезпечити суттєве зниження вартості титанових виробів до рівня конкурентоспроможності титану у порівнянні з іншими, більш дешевими конструкційними матеріалами. Одним із найефективних технологічних напрямів для отримання матеріалів на основі титану з високими фізико-механічними та функціональними властивостями, що успішно розвивається останнім часом, є застосування методів порошкової металургії з використанням в як вихідної сировини порошків гідриду титану TiH_2 замість титанового порошку. Завдяки водневому впливу на матеріал досягаються унікальні структурні стани спечених титанових сплавів з високим рівнем фізико-механічних характеристик, а використання TiH_2 як вихідної сировини має помітний економічний ефект, оскільки гідрид титану є дешевшим ніж серійні порошки титану, отримані методом гідрування/дегідрування.

Тому науково-технічна задача з удосконалення, за результатами дослідження загальних закономірностей формування структури та властивостей, технології отримання титаноматричних композитів різних компонентних груп з заданим комплексом механічних та експлуатаційних характеристик які використовують вихідні порошкові суміші гідриду титану та високомодульних армуючих присадок, є достатньо актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до відомчої та конкурсної тематики НАН України, а саме: бюджетної теми НАН України «Формування градієнтних та шаруватих структурно-фазових станів та їх вплив на властивості високоміцних конструкційних матеріалів в умовах статичного і динамічного навантаження» (№ державної реєстрації 0118U001036), роботи «Розроблення технології виробництва елементів броньового захисту з градієнтною структурою на основі титанових сплавів» (програма Державного замовлення з проблем підвищення безпеки та обороноздатності держави, 2015-2016 рр., № державної реєстрації 0117U005078), «Оптимізація структурних станів титанових сплавів, отриманих з наводнених

порошків, для підвищення їх корозійної і корозійно-абразивної стійкості» (конкурсна програма НАН України «Ресурс-2», 2016-2018 рр., № державної реєстрації 0116U006684), «Титанові матеріали з градієнтною структурою для броньового захисту: інноваційна технологія виготовлення» (грант G5030 програми НАТО «Наука заради миру та безпеки» (2016-2018 рр.).

Метою роботи є встановлення загальних закономірностей формування структури та властивостей титаноматричних композитів різних компонентних груп, на основі гідриду титану з високомодульною армуючою складовою та удосконалення технології отримання матеріалів даного класу з високим комплексом механічних та експлуатаційних характеристик.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені і вирішені такі основні **задачі**:

- Проаналізувати сучасний стан питання в області технологій створення та дослідження структури і властивостей титаноматричних композитів різних компонентних груп.

- Провести порівняльне дослідження впливу типу вихідних титанових порошків на особливості структуроутворення та властивості спечених титаноматричних композитів.

- Дослідити вплив типу армуючих компонентів на структуру та властивості спечених титаноматричних матеріалів.

- Дослідити вплив гарячого штампування на структуру та властивості титаноматричних композитів з високомодульними присадками різних компонентних груп.

- Провести дослідження впливу компонентного складу та технологічних режимів виготовлення на структуру та властивості спечених шаруватих металоматричних композитів.

- Провести дослідження основних функціональних властивостей та розробити рекомендації щодо технологічних параметрів отримання титаноматричних композитів різних компонентних та функціональних груп.

Об'єкт дослідження – металоматричні композиційні матеріали на основі титану та його сплавів, армовані високомодульними сполуками.

Предмет дослідження – закономірності формування структури, фазового складу, фізико-механічних властивостей титаноматричних композиційних матеріалів при спіканні порошкових сумішей на основі гідриду титану та при гарячому штампуванні спечених заготовок.

Методи дослідження: В роботі використовувалися сучасні методи комплексного дослідження: лазерна гранулометрія, оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, рентгенофазовий та рентгеноспектральний аналіз, високотемпературна дилатометрія та мас-спектрометрія, стандартні методи випробувань мікротвердості та міцності (на розтяг, стиск та трьохточковий згин), акустичні методи вимірювання пружних характеристик матеріалів. Для обробки отриманих результатів використовувалось відповідне програмне забезпечення. Таким чином, дані методики дослідження є взаємодоповнюючими та дають можливість комплексного та всебічного дослідження матеріалів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше показано принципову відмінність залежностей значень міцності на розтяг та стиск від вмісту боридної складової для спечених композитів, отриманих з порошкової суміші гідриду та дибориду титану. Встановлено, що незважаючи на деякий ріст поруватості спеченого композиту порівняно з матеріалом без боридних домішок, характеристики міцності зростають для композитів з 5% TiB, тоді як підвищення вмісту високомодульної складової до 10 % призводить до зменшення рівня вказаних характеристик. В разі випробувань на стиск механічні характеристики матеріалу монотонно зростають зі збільшенням вмісту TiB, незважаючи на збільшення поруватості, що обумовлено меншим впливом пор при випробуваннях на стиск порівняно з розтягом.

2. Вперше досліджено вплив гарячого штампування на структуру та властивості титаноматричних композитів з високомодульними присадками. Показано можливість суттєвого (від 20 % для композитів з 5 % TiB, до двох раз – для матеріалів з 10% TiB) підвищення характеристик міцності титаноматричних композитів шляхом гарячого штампування шляхом диспергування структури та забезпечення практично безпористого стану матеріалу. Встановлено, що як твердість, так і міцність матеріалу монотонно зростають зі збільшенням вмісту боридної фази в складі композиту до 10%.

3. Встановлено наявність ефекту формування помітної анізотропії структури та властивостей гарячештампованих титаноматричних композитів з боридними фазами, який проявляється внаслідок переважаючого розташування голкоподібних зерен монобориду титану в напрямку перпендикулярному до напрямку штампування.

4. Вперше показана можливість створення спечених титаноматричних шаруватих композитів із градієнтною структурою, що складаються з шарів різного хімічного складу, які характеризуються рівномірною усадкою в кожному із шарів та відсутністю розшарування шляхом оптимізації фракційного складу порошків кожного шару та тиску пресування. Показано, що відповідне розташування та відповідні товщини більш пластичного шару без армуючої присадки, та більш твердого шару з високомодульною складовою забезпечує отримання композитів, які характеризуються оптимальним балансом як високої міцності (до 2000÷2200 МПа), так і пластичності (10÷20 %) при випробуванні на згин.

5. За результатами триботехнічних випробувань титаноматричних композитів показано, що введення в склад матеріалу високомодульних присадок зменшує коефіцієнт тертя порівняно з аналогічними титановими сплавами без армуючої фази, а зі збільшенням вмісту армуючих присадок в шихті з 5 до 10 % зносостійкість матеріалу підвищується до 20 %. Найбільше підвищення зносостійкості композитів однакового хімічного складу (до 5-ти разів), при незначній відмінності значень коефіцієнту тертя, забезпечується шляхом гарячого штампування спечених заготовок.

6. За оптимізованими технологічними параметрами створено багатошарові пласкі титанові вироби з високою балістичною стійкістю. За результатами балістичних випробувань показана перевага даного класу виробів і перспектива використання багатошарових виробів на основі титанового сплаву Ti-6Al-4V,

поверхневі шари яких складаються з металоматричних композиційних матеріалів на основі даного сплаву.

Практичне значення отриманих результатів:

1) Показана та обґрунтована технічна та економічна доцільність використання як основи вихідної шихти для отримання металоматричних композитів порошку гідриду титану, що обумовлено не тільки економічними чинниками внаслідок суттєво меншої вартості гідриду, але і дозволяє за інших однакових умов отримати спечені композити з меншою поруватістю у порівнянні з композитами, отриманими з використанням шихти на основі серійного порошку титану.

2) На основі результатів проведених експериментальних досліджень розроблено метод отримання практично безпористих титаноматричних композитів з використанням технології гарячого штампування. Застосування гарячого штампування забезпечує значне підвищення як параметрів міцності, так і твердості у порівнянні зі спеченими (недеформованими) композитами такого ж компонентного складу.

3) За результатами триботехнічних випробувань показано ефективність використання армованих високомодульними сполуками титаноматричних композитів як зносостійкого матеріалу для використання у вузлах тертя. Зносостійкість таких композитів підвищується зі збільшенням вмісту армуючої фази, а найсуттєве підвищення зносостійкості композитів однакового хімічного складу (до 5-ти раз) забезпечується шляхом гарячого штампування спечених заготовок.

4) За рахунок оптимізації фракційного складу порошків кожного шару та тиску пресування удосконалена технологія отримання титаноматричних шаруватих композитів функціонального призначення із градієнтною структурою, яка забезпечує рівномірну усадку кожного з шарів та відсутність розшарування. Доведено ефективність використання такого класу шаруватих композитів як елементів балістичного захисту. За результатами стендових випробувань показано, що спечені пластини із шаруватою структурою, що складаються зі сплаву Ti-6Al-4V та металоматричних композитів на його основі товщиною 16-20 мм витримують дію кулі калібру 7,62 мм навіть при швидкості до 900 м/с, забезпечуючи 100%-ве непробиття, що відповідає 5 класу захисту.

Особистий внесок здобувача. Основні результати експериментальної роботи були отримані здобувачем особисто та з його безпосередньої участі. Власне автором проаналізовано літературні джерела, розроблено методики проведення експерименту, а також було виготовлено всі досліджувані зразки, проведено дилатометричні дослідження, механічні випробування, металографічні дослідження, оптичну мікроскопію. Постановка задачі дослідження, обговорення та інтерпретація отриманих результатів проведені з науковим керівником.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Викладені в дисертаційній роботі наукові результати були представлені на 9 конференціях: 5-міжнародна конференція «HighMatTech», Київ, 5 – 8 жовтня 2015; конференції «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів», Київ, 16-17 квітня 2014 та 19-20 квітня 2018; Конференція присвячена 70-річчю від дня заснування Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова Національної академії наук України, Київ, Україна. 2016; Міжнародна

конференція «Титан 2018. Виробництво і застосування в Україні», Київ, 11-13 червня 2018; «Materials science and technology», Columbus, USA, 14-18 October 2018.; 10-th International Conference «Advanced materials and technologies: from idea to market», Ningbo, China, 24-26 October 2018.; «Titanium USA 2017», Miami, Florida, USA, 8-11 October 2017; International Conference «Processing & Manufacturing of Advanced Materials. Processing, Fabrication, Properties, Applications», Paris, France, July 9-13. 2018.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 22 друкованих праці, зокрема 11 статей у наукових фахових виданнях, з них – 5 статей у виданнях іноземних держав, 3 у виданнях України, які включені до наукометричної бази даних Scopus, 11 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації – 197 сторінок. Дисертація містить 13 таблиць, 97 рисунків, список використаних джерел із 153 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано коротку характеристику дисертаційної роботи: обґрунтовано актуальність напрямку досліджень, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано основні задачі, які розв'язувалися для досягнення мети дослідження, подана наукова новизна отриманих результатів, наведені дані щодо апробації роботи.

У першому розділі проаналізовано літературні джерела щодо сучасного стану наукової проблеми виготовлення титаноматричних композитів із заданим комплексом характеристик. Відмічено, що отримання титанових виробів методом їх синтезу з гетерогенних систем титанових і легувальних частинок є найбільш перспективним з точки зору технологічної простоти та малих втрат матеріалів.

Розглянуто сучасні методи отримання титаноматричних композитів та проаналізовано їх склад. Представлені властивості різноманітних груп титаноматричних композитів отриманих різними методами виготовлення.

За результатами аналізу літературних джерел було окреслено проблеми і питання, пов'язані з темою дисертації, які потребують вирішення, та сформульовані мета та задачі дослідження.

У другому розділі представлено дані про використані матеріали та методики дослідження.

В якості основи вихідних сумішей було використано порошок гідриду титану, порошки дибориду титану (ТУ 6-09-03-7-75) та карбіду титану (ТУ 1595-001-75420116-2005). Синтез титанового сплаву Ti-6Al-4V, в тому числі як матричної фази при виробництві композитів, відбувався з використанням лігатури 60Al-40V (мас.%). Гідрид титану і лігатуру переводили в порошковий стан із заданою дисперсністю частинок шляхом розмелювання на планетарному млині Retsch PM 100. Гранулометричні характеристики вихідних порошків визначались за допомогою лазерного аналізатора Malvern MasterSizer 2000 Hydro.

Порошкові суміші компактувалися при тиску 640 МПа на гідравлічному пресі в розбірних прес-формах. Спінання пресовок проводилося у вакуумній печі при 1250 °С і витримці 4 години з подальшим пічним охолодженням. Процес гарячого штампування відбувався у напівзакритому штампі на дугостаторному пресі зусиллям 1600 кН. Нагрів заготовок під гаряче штампування проводили в середовищі аргону до температури 1100 °С в печі опору шахтного типу.

Методами оптичної (Olympus IX-70) та скануючої електронної (TESCAN VEGA 3) мікроскопії досліджували морфологію частинок та мікроструктуру пресованих та спечених зразків на різних стадіях процесу. Рентгенівські дослідження фазового складу порошків та композиційних матеріалів проводились на дифрактометрі RIGAKU ULTIMA-3M. Дослідження фізичних процесів, що відбуваються при нагріванні пресованих порошкових сумішей проводилися на автоматизованому дилатометричному комплексі (АДК) із мас-спектрометричною приставкою.

Дослідження механічних властивостей композиційних матеріалів проводилися: на машинах INSTRON 3376 (випробування на розтяг), INSTRON 8802 (випробування на трьохточковий згин), на приладі Wolpert Wilson Instruments 452 SVD (твердість за Віккерсом). Триботехнічні випробування проводилися на машині торцевого тертя М-22 за ГОСТ 16167–80. Балістичні випробування проводилися в науково-випробувальній лабораторії зброї та спеціальних захисних матеріалів Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського. Кулестійкість броньових елементів визначалась при використанні положень ДСТУ В4103-2002 та ДСТУ 3975-2000.

Третій розділ присвячений результатам дослідження впливу виду вихідного порошку матричної основи (Ti та TiH₂) та типу армуючих присадок (TiC, TiB₂, B та B₄C) на особливості структуроутворення та деякі властивості спечених з їх використанням металоматричних композитів. Показано, що використання як основи шихти порошку гідриду титану з присадками TiC та TiB₂ дозволяє отримати спечені композити з матрицею технічно чистого титану із меншою поруватістю порівняно з композитами, отриманими з використанням шихти на основі порошку титану.

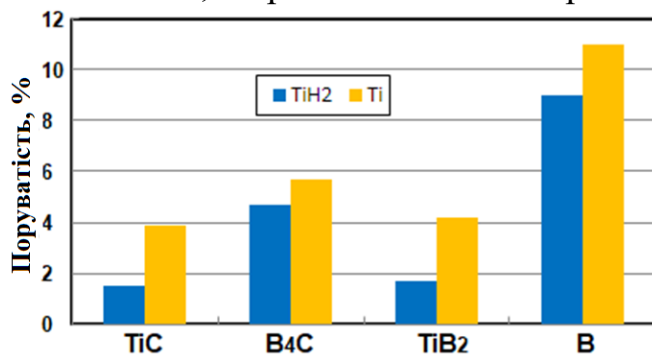


Рис. 1. Залежність поруватості зразків після спікання для порошкових сумішей на основі TiH₂ та порошку титану від виду армуючих присадок (TiC, B₄C, TiB₂ та B)

Абсолютні значення поруватості в пресовках спечених із шихти на основі TiH₂ з присадками TiC та TiB₂ не перевищують 2 %, а в разі використання як присадки порошків B₄C та B, поруватість спечених зразків складає близько 5 та 9 % відповідно (рис. 1).

Характер структури спечених сплавів суттєво залежить від типу зміцнюючих присадок. В процесі спікання частинки TiC практично не взаємодіють з матричною фазою і мають після спікання відносно рівновісну форму (рис. 2,а). Однорідність розподілу фази TiC в спечених композитах

визначається умовами перемішування порошків. З іншого боку, вихідні порошки армуючої присадки, які містять бор, реагують в процесі високотемпературної витримки з титановою матрицею, формуючи голкоподібні включення монобориду титану із розміром в перерізі 1-5 мкм та довжиною 10-25 мкм (рис. 2,б). Мікроструктура композитів, спечених із суміші порошків гідриду титану та карбиду бору, відзначається наявністю конгломератів розміром 20-50 мкм, які складаються із високодисперсних частинок боридних фаз титану голкоподібної форми та незначної кількості рівновісних частинок TiC.

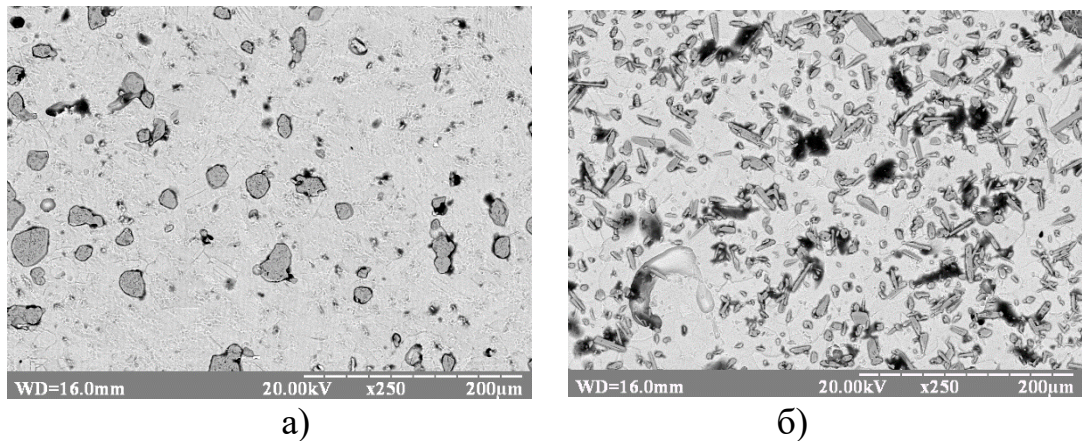


Рис. 2. Типові мікроструктури спечених сплавів, отриманих із порошкових сумішей $TiH_2 + 5\% TiC$ (а) та $TiH_2 + 5\% TiB_2$ (б)

Рентгеноструктурний аналіз спечених композитів на основі матриці з технічно чистого титану, зміцнених карбідом титану, дозволив ідентифікувати в їхньому складі лише наявність ліній, які відносяться до фаз Ti та TiC (рис. 3,а). Відсутність ліній фази TiH_2 свідчить про практично повне видалення водню в процесі нагріву та високотемпературної витримки.

Дифракційна картина зразків спечених із суміші $TiH_2 + TiB_2$ (рис. 3, б) вказує на наявність у композитах, крім основної матричної фази титану, ліній фази TiB з орторомбічною ґраткою та присутність незначних слідів сполук титану з бором іншої концентрації (Ti_3B_4). Вихідні фази TiH_2 та TiB_2 на рентгенограмах спечених композитів не ідентифікуються.

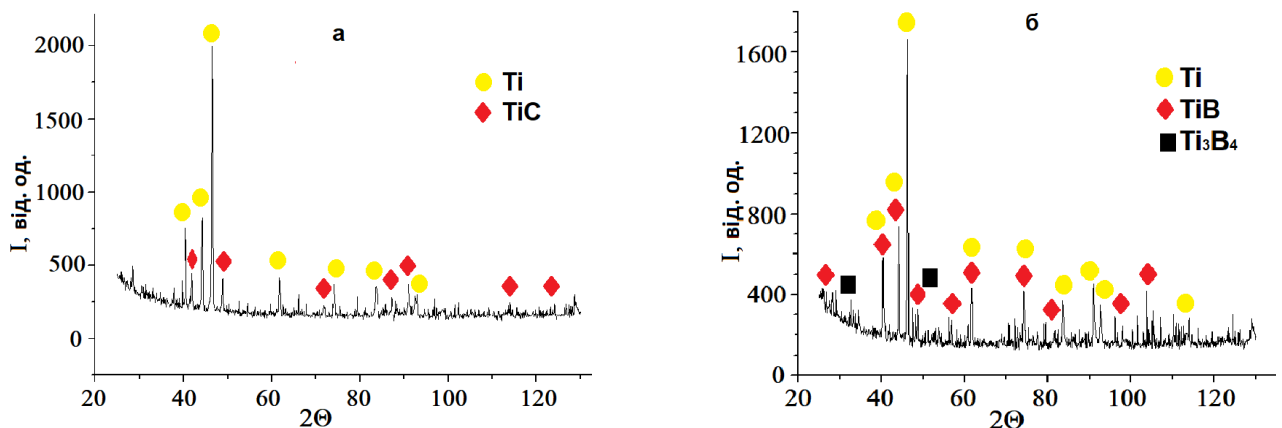


Рис. 3. Рентгенограми спечених композитів отриманих із порошкових сумішей: $TiH_2 + 5\% TiC$ (а); $TiH_2 + 5\% TiB_2$ (б)

Аналіз результатів оцінки значень твердості спечених зразків з різними видами порошків матричної основи та зміцнюючих присадок показав (рис. 4), що найвищий рівень твердості (HV 466) досягнуто при використанні порошку гідриду титану і TiB_2 як армуючої присадки, що обумовлено вищою власною мікротвердістю боридних фаз титану у порівнянні із TiC . В той самий час, при використанні суміші TiB_2 з порошком титану, твердість композиту суттєво нижча (HV 381). Аналогічна закономірність проявляється і для композитів з присадкою із порошку TiC .

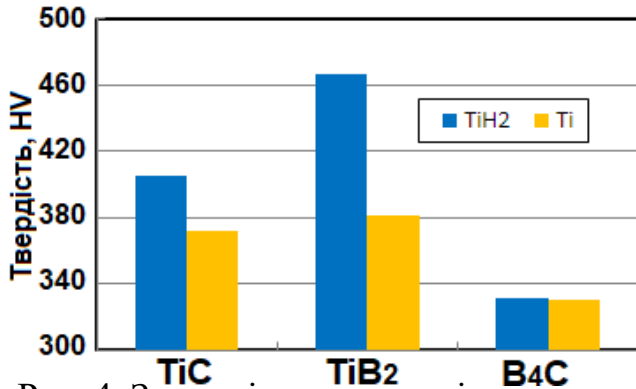


Рис. 4. Залежність твердості спечених композитів від типу порошків титанової основи та

Це пояснюється вищими значеннями поруватості зразків, спресованих із сумішей на основі порошку титану, у порівнянні з аналогічними матеріалами, отриманими із шихти на основі гідриду титану (рис. 1).

З урахуванням наведених результатів, для подальших досліджень в ролі основних складових при отриманні композитів використовувалися порошкові суміші TiH_2 та дибориду титану або карбіду титану, як армуючих присадок.

Результати дилатометричних досліджень нагріву пресовок із сумішей порошків гідриду та карбіду або дибориду титану показали (рис. 5), що ріст густини пресовок відбувається вже на стадії їх нагріву в інтервалі температур 400-800 °C внаслідок об'ємних ефектів і дегідрування порошку основи. При цьому лінійна усадка матеріалу з армуючими присадками при досягненні температур спікання є помітно меншою, ніж для порошку гідриду титану без присадок. Частинки TiC слабо впливають на зниження усадки, найсуттєвіше, в процесі спікання, усадка зменшується зі збільшенням вмісту боридної фази в титановій матриці (рис. 5).

На відміну від пресовок з гідриду титану без добавок та з добавками TiC , за наявності у вихідній шихті порошку TiB_2 в температурному діапазоні 800÷1000 °C усадка

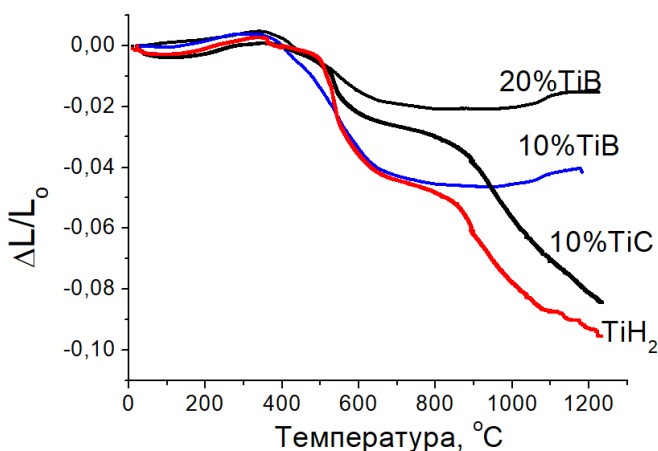


Рис. 5. Дилатометричні криві нагрівання порошкових сумішей різного компонентного складу

матеріалу при підвищенні температури помітно гальмується, а при подальшому нагріванні з 900-1000 °C до 1200 °C лінійні розміри пресовки навіть дещо збільшуються (рис. 5). Це пояснюється реалізацією ефекту вторинного пороутворення (ефект Френкеля) за рахунок того, що внаслідок суттєвої різниці коефіцієнтів дифузії титану в бор у порівнянні з коефіцієнтом дифузії бору в титан, в процесі спікання відбувається практично одностороння дифузія атомів бору в титанову матрицю з утворенням голкоподібних частинок TiB , в той час як потік вакансій дифундує в протилежному

напрямку, формуючи вторинну поруватість.

Наявність залишкової поруватості позначається також на рівні основних механічних характеристик спечених композитів (табл. 1). Незважаючи на загалом зміцнюючий характер армуючої фази в металоматричному композиті, при збільшенні вмісту останньої у вихідній шихті проявляється конкуренція між ефектами армування матричної фази, що призводить до підвищення твердості та міцності спеченого сплаву, і ефекту зменшення значень цих характеристик внаслідок деякого збільшення залишкової поруватості. Так з таблиці 1 видно, що спечені зразки, отримані з гідриду титану без використання армуючої фази, мають міцність на розтяг близько 640 МПа при видовженні $\approx 10\%$. Введення до складу шихти 5 % порошку зміцнюючої фази (TiB, TiC), незважаючи на деякий ріст поруватості спеченого сплаву у порівнянні з чистим титаном, призводить до помітного підвищення міцності композиційних матеріалів, та супроводжується зниженням пластичності.

При подальшому збільшенні вмісту високомодульної складової в шихті до 10% негативний вплив підвищення поруватості превалює над зміцнюючим ефектом армуючих включень, і міцність на розтяг зменшується також катастрофічно знижується його пластичності, що не перевищує 0,3-0,5% (табл.1).

Таб. 1. Основні механічні характеристики спеченого технічно чистого титану та композиційних матеріалів на його основі, отриманих з використанням гідриду титану.

Матеріал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
Ti	548	640	9,6	12,6
Ti-5%TiC	654	665	1,7	1,9
Ti-10%TiC	480	551	0,1	0,2
Ti-5%TiB	703	770	2,5	2,6
Ti-10%TiB	544	621	0,2	0,2

На відміну від випробувань на розтяг, при стиску величини як границі пропорційності, так і границі пластичності монотонно ростуть зі збільшенням вмісту

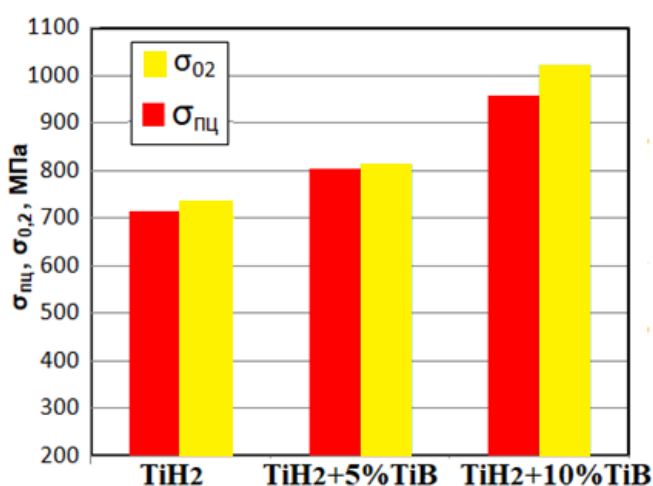


Рис. 6. Вплив вмісту армуючих присадок на механічні характеристики спечених титаноматричних композитів при випробуванні на стиск

армуючої складової в шихті, незважаючи на збільшення поруватості останніх (рис. 6). Така закономірність обумовлена суттєво меншим впливом поруватості матеріалу на величину опору деформуванню при стиску у порівнянні з розтягом внаслідок зменшення величини поруватості при осаджуванні заготовок.

Фрактографічний аналіз поверхонь зламів, отриманих після випробувань матеріалів різного компонентного складу на стиск показав, що для зразків, отриманих з порошоків гідриду титану без боридних присадок, поверхня зламу має характерну для пластичного деформування ямкову та частково

згладжену, внаслідок ковзання, структуру руйнування (рис. 7,а), тоді як для композиту з максимальним вмістом армуючої складової (10 % TiB) спостерігається структура зламу, характерна для крихкого руйнування (рис. 7,в).

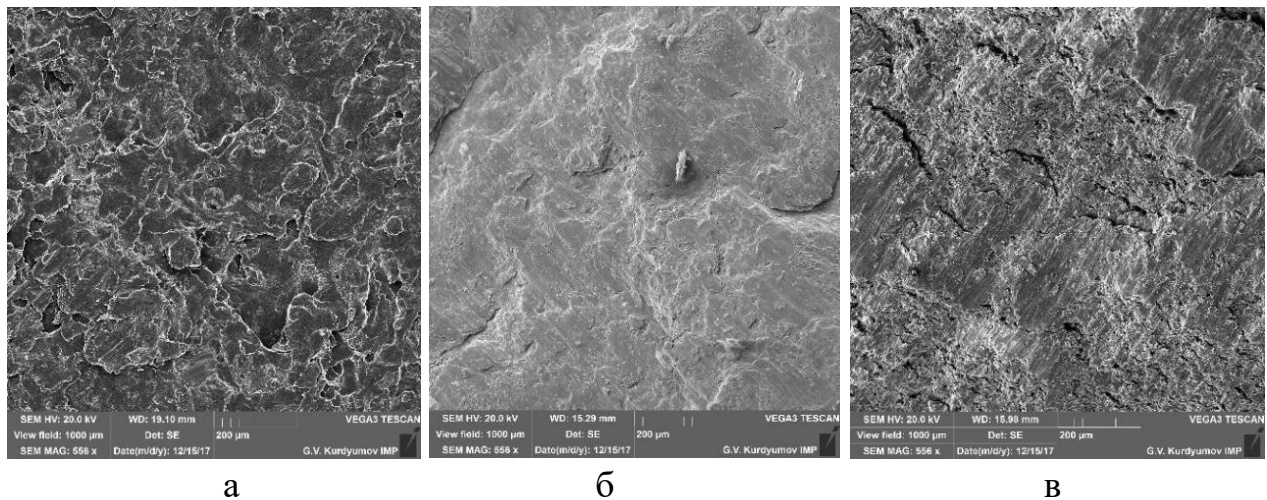


Рис. 7. Поверхня зламів після випробуванні на стиск для матеріалів Ti (а), Ti+5%TiB (б) та Ti+10%TiB (в), спечених із порошку TiH₂ (а), шихти TiH₂+5 % TiB₂ (б) та TiH₂+10 % TiB₂ (в)

В четвертому розділі наведені результати дослідження впливу гарячого штампування спечених заготовок на структуру та основні властивості титаноматричних композитів на основі нелегованого титану (технічно чистого) та сплаву типу ВТ6 (Ti-6Al-4V).

Після операції гарячого штампування мікроструктура композиційних матеріалів різних компонентних складів являє собою безпористу матрицю з титану або сплаву Ti-6Al-4V, в якій рівномірно розподілені високомодульні включення TiC та TiB (рис. 8). Матрична фаза Ti-6Al-4V має двофазну $\alpha+\beta$ структуру, в якій чітко вирізняються α пластини (рис. 8, в, г).

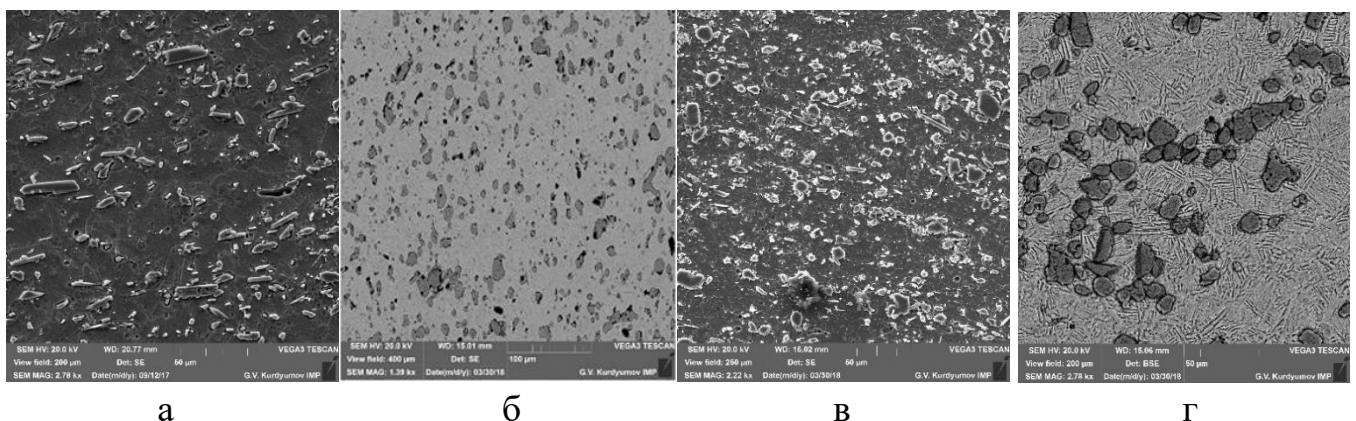


Рис. 8. Мікроструктура гарячештампованих композитів на основі титану (а, б) та сплаву Ti-6Al-4V (в, г) зміцнених частинками TiB (а, в) та TiC (б, г)

Оцінка механічних характеристик композитів показала (рис. 9), що гаряче штампування призводить до помітного підвищення як параметрів міцності на стиск (σ_B , $\sigma_{шц}$ та $\sigma_{0,2}$), так і твердості у порівнянні зі спеченими (недеформованими) композитами такого ж компонентного складу (рис. 6). При цьому, різниця значень

характеристик гарячештапованих та спечених матеріалів збільшується зі збільшенням вмісту високомодульних складових в композиті. Так значення $\sigma_{0,2}$ для композиту Ti-5%TiB підвищується в результаті гарячого штампування на 5% порівняно зі спеченим, тоді як при збільшенні вмісту TiB до 10% ця різниця складає вже понад 20%.

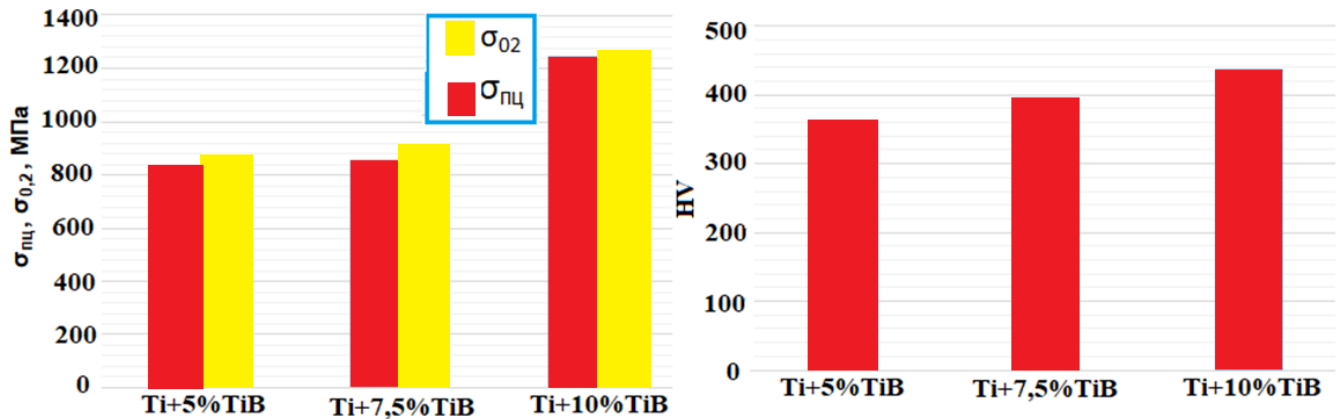


Рис. 9. Залежність механічних характеристик гарячештапованих композитів, отриманих із порошкової шихти $TiH_2 + TiB_2$, від вмісту бориду титану

Легування матричної фази 6% Al та 4% V призводить до підвищення параметрів міцності та твердості гарячештапованих композитів, які досягають значень $\sigma_{0,2}$ до 1400 МПа для композитів з 5% TiC й TiB та більше 1500 МПа для 10% високомодульної складової (рис. 10).

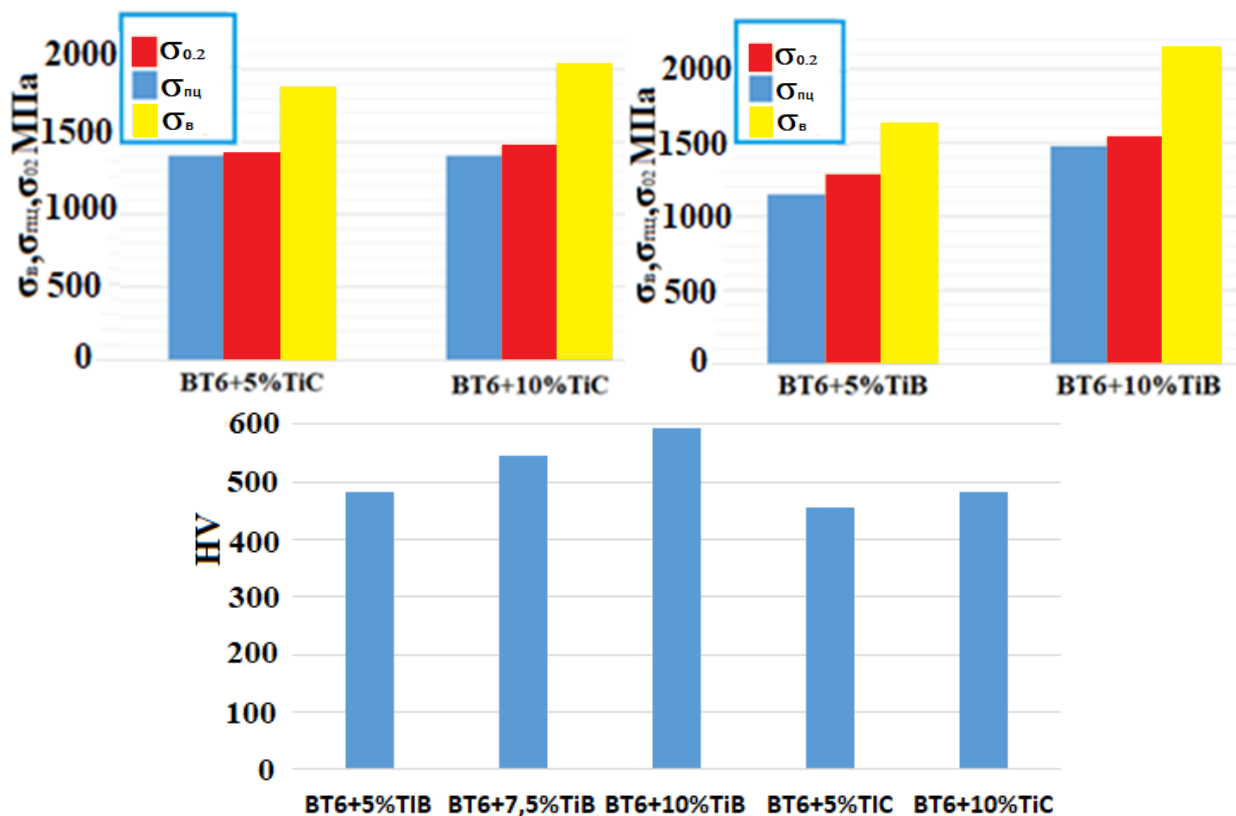


Рис. 10. Залежність механічних характеристик гарячештапованих композитів на основі матричного сплаву Ti-6Al-4V від вмісту високомодульної складової

Результати порівняльних досліджень пружних характеристик спечених та гарячештампованих титаноматричних композитів, армованих карбідом та боридом титану з використанням акустичних методів, які базуються на вимірі швидкості поширення пружної хвилі, показали відмінність характеру залежності модуля пружності від вмісту високомодульної складової для спечених та для гарячештампованих композитів. Значення модуля для спечених матеріалів визначаються як вмістом армуючих добавок, так і величиною поруватості сплаву, а для гарячештампованих матеріалів модуль пружності монотонно збільшується зі збільшенням вмісту високомодульних складових.

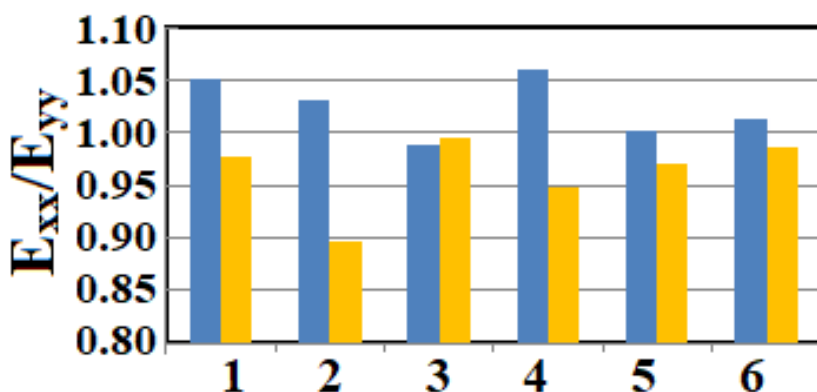


Рис.11. Ступінь анізотропії спечених (■) та гарячештампованих (■) композитів різного компонентного складу: Ti + 5% TiB(1); Ti + 10% TiB(2); VT-6 + 5% TiB(3); VT-6 + 10% TiB(4); VT-6 + 5% TiC(5); VT-6 + 10% TiC(6)

Для спечених зразків всіх складів та гарячештампованих композитів, армованих карбідом титану, співвідношення E_{xx}/E_{yy} значень модулів пружності, визначених в напрямку пресування (E_{xx}) та в напрямку, ортогональному до нього (E_{yy}), знаходиться на рівні одиниці, що характеризує, практично, відсутність анізотропності таких матеріалів (рис. 11). Після гарячого штампування композитів, армованих боридом титану, значення співвідношення E_{xx}/E_{yy} дещо зменшується, що обумовлено переорієнтуванням голкоподібних часток монобориду титану в напрямку перпендикулярному до напрямку прикладання активного зусилля при гарячому штампуванні (рис. 8,а,в).

У п'ятому розділі розглянуто результати досліджень, спрямованих на створення градієнтних матеріалів функціонального призначення з титаноматричних композитів. Особливістю створення таких композитів є необхідність врахування того факту, що при спіканні багат шарових зразків кожний шар характеризується різним значенням усадки в залежності від його хімічного складу (див. рис. 5). В разі спільного спікання шаруватої конструкції із шарами з різним вмістом боридної складової відмінність величин усадки, при цьому, призводить до появи тріщини між відповідними шарами та вигинання зразків в процесі спікання (рис. 12).



Рис. 12. Вигинання шаруватих зразків з титаноматричних композитів після спікання

Результати дослідження впливу на усадку типу вихідних порошків, використаних для формування кожного шару, та тиску пресування дозволили встановити, що змінюючи ці параметри можливо суттєво міняти усадку окремих шарів в багат шарових структурах, забезпечивши приблизно

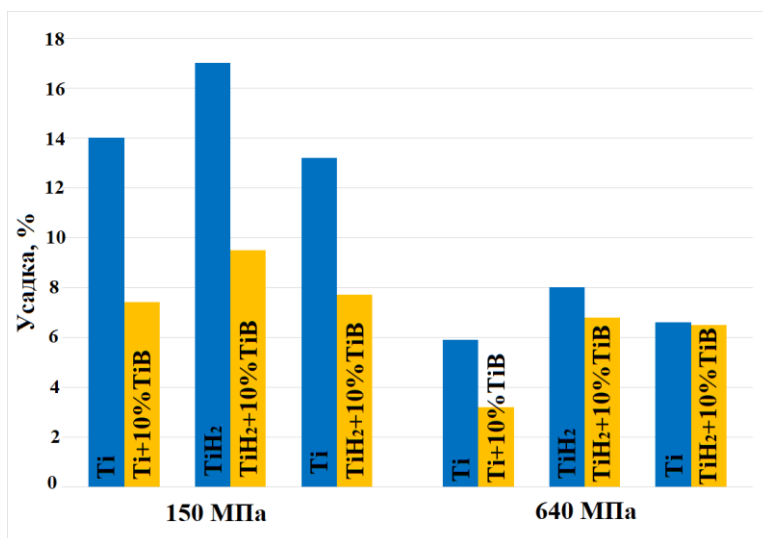


Рис.13. Значення лінійної усадки для двошарових композитів, сформованих з вихідної шихти різних компонентних складів при різному тиску пресування

однакову величину лінійної усадки для сусідніх шарів. Показано, що використовуючи для формування відповідних шарів порошки з різною концентрацією в них водню та різні тиски пресування, можна досягти практично однакової усадки сусідніх шарів різного складу, уникнувши спотворення форми та розтріскування багатошарових структур (рис. 13). Додатковим параметром, шляхом якого можна контролювати усадку порошкових сумішей, є розмір вихідних порошків. Встановлено, що для виготовлення багатошарових матеріалів, які складаються із шарів сплаву Ti-

6Al-4V та композитів на його основі, потрібно зменшувати усадку шарів, склад яких відповідає сплаву, а усадку шарів, склад яких відповідає композитам, навпаки збільшувати, щоб забезпечити близьку величину лінійних змін при спіканні. В результаті оптимізації фракційного складу шихти на основі гідриду титану для виготовлення кожного з шарів у 2-3 шарових структурах, а також умов їх пресування, було успішно отримано структури, що складаються з шару сплаву Ti-6Al-4V та шарів композитів на його основі із 5% та 10% (за об'ємом) армуючих частинок TiB або TiC. Наприклад, мінімізація різниці усадки шару, що відповідає сплаву (~11 %) та шару композиційного матеріалу (~10,6 %) забезпечує достатню адгезію між сусідніми шарами та відсутність спотворення геометрії виробу після спікання (рис. 14).

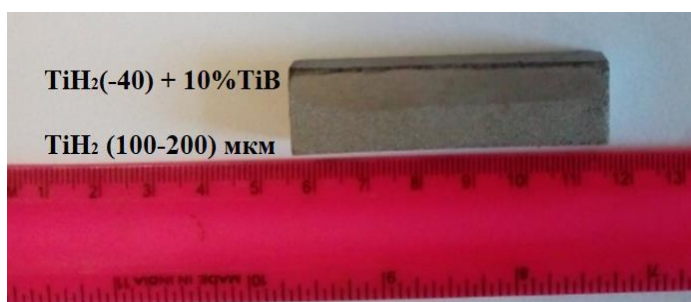


Рис.14. Спечений двошаровий композит, отриманий з порошкової шихти оптимального фракційного складу

На мікроструктурі спечених шаруватих матеріалів чітко простежується границя розподілу між шарами з різним вмістом армуючих частинок (рис. 15).

Механічні характеристики двошарових композитів, визначалися при випробуванні на трьохточковий згин із прикладанням деформуючого зусилля як з боку армованого високомодульними добавками (композитного) шару, так і з боку неармованого сплаву Ti-6Al-4V.

Швидкість деформації складала 10^{-1} та 10^{-3} s^{-1} . Основною особливістю такого виду випробувань є те, що зразок деформується в умовах складного напружено-деформованого стану, при якому на верхній шар матеріалу діють стискаючі напруження, а на нижній – напруження розтягу.

Як показали результати випробувань на згин двошарових структур (рис. 16), їх міцність і пластичність при випробуванні з прикладанням деформуючого зусилля з боку армованого шару (криві, позначені TiB, TiC) суттєво перевищують відповідні

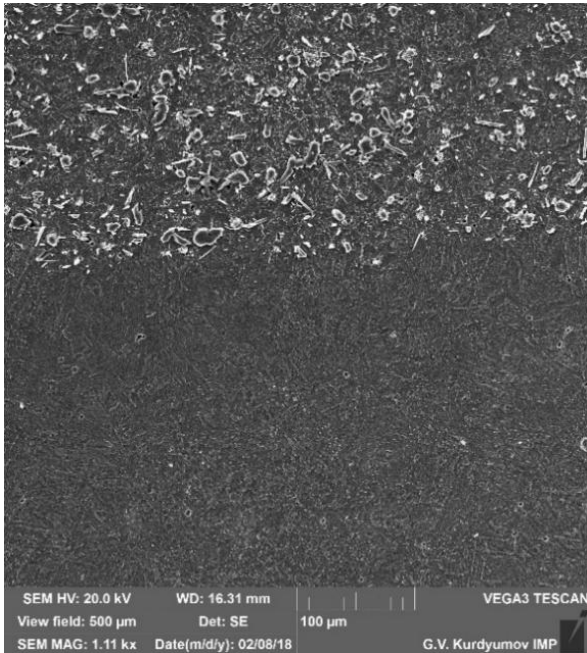


Рис.15. Мікроструктура приграничних зон сусідніх шарів спечених шаруватих структурах

характеристики аналогічного двошарового матеріалу при навантаженні зі сторони неармованого сплаву Ti-6Al-4V (криві Ti64). Відмічений ефект обумовлений тим, що (як показано в розд. 3 дисертаційної роботи) армування спеченого сплаву Ti-6Al-4V високомодульними сполуками та збільшення їх вмісту в композиті призводить до зниження рівня характеристик міцності та пластичності матеріалу при випробуванні на розтяг, тоді як при випробуванні на стиск спостерігається зворотна закономірність.

Оцінка впливу типу високомодульної складової на механічні характеристики шаруватих структур при вигині показала, що дещо вищими характеристиками міцності та пластичності відзначаються структури, які містять композитні шари, армовані карбідом титану (рис. 16 б), у порівнянні із матеріалами,

відповідний композитний шар яких армований TiB (рис. 16 а). Зміна швидкості деформації від 10^{-3} до 10^{-1} с $^{-1}$ несуттєво впливає на поведінку всіх досліджуваних матеріалів при випробуванні на згин.

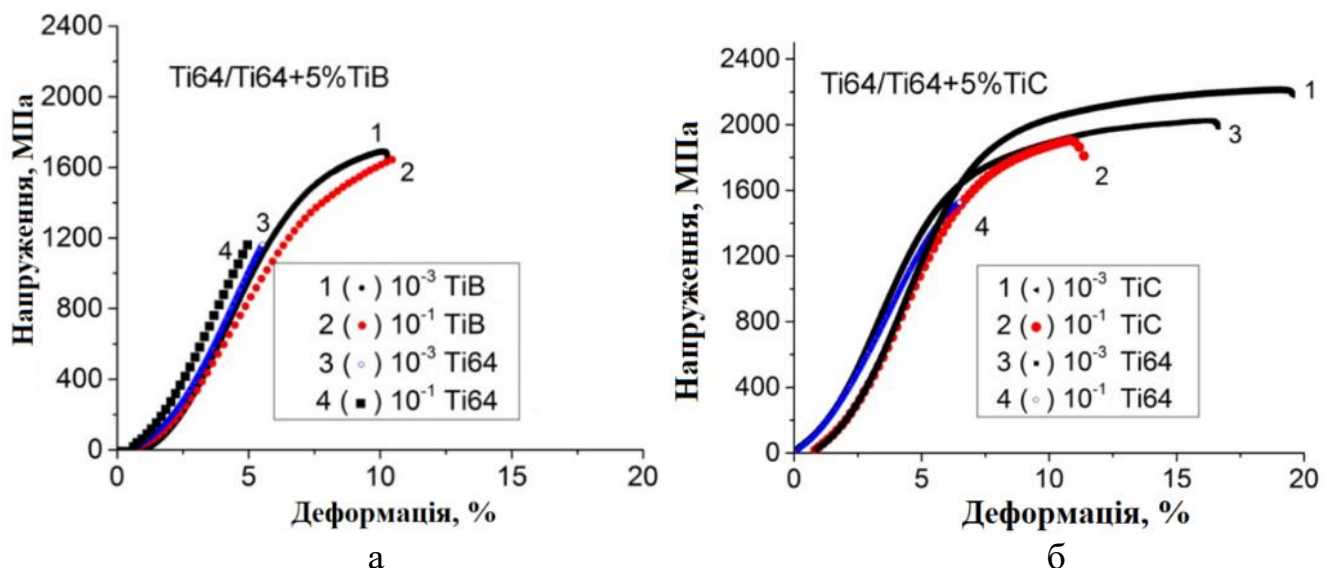


Рис. 16. Типові криві навантаження при випробуванні на згин двошарових матеріалів:

- а - Ti-6Al-4V BT6 – (Ti-6Al-4V BT6 + 5% TiB);
б - Ti-6Al-4V BT6 – (Ti-6Al-4V BT6 + 5% TiC);

Шостий розділ присвячений дослідженню функціональних властивостей титаноматричних композиційних матеріалів.

Результати дослідження триботехнічних властивостей композитів, які проводились в умовах сухого тертя в парі із загартованою сталлю 65Г, показали, що значення коефіцієнтів тертя монотонно знижуються зі збільшенням швидкості ковзання для всіх складів досліджуваних матеріалів.

Звертає на себе той факт, що коли для всіх композитів, армованих карбідом титану, залежність коефіцієнту тертя ($k_{тр}$) від швидкості практично лінійна, а вміст карбідної складової та метод отримання композиту несуттєво впливають на величину $k_{тр}$ (рис. 17,а), то в разі армування боридними фазами значення коефіцієнта тертя суттєво зменшується при підвищенні швидкості ковзання з 4 до 6 м/с, а з подальшим збільшенням швидкості до 8 м/с $k_{тр}$ змінюється вже незначною мірою (рис. 17,б). При цьому, на відміну від композитів, армованих TiC, вміст армуючих боридних фаз та технологічна схема отримання матеріалу найпомітніше позначаються на значеннях $k_{тр}$ при швидкостях ковзання 6 та 8 м/с, використання гарячого штампування та підвищення вмісту TiB призводять до помітного зменшення коефіцієнту тертя з 0,47-0,49 (для спеченого матеріалу з 10% TiB) до 0,36-0,40 – для гарячештампованого композиту такого ж складу.

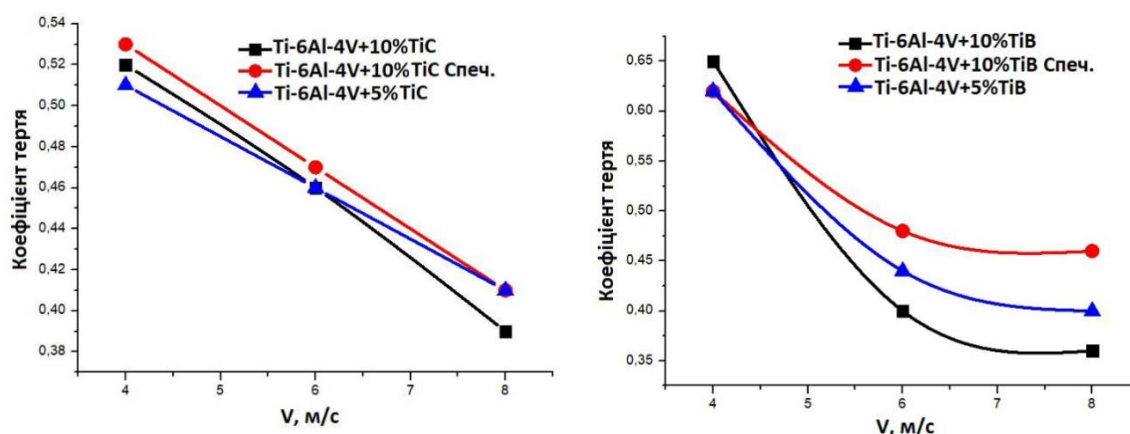


Рис. 17. Залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання для спеченого та гарячештампованих композитів з різним вмістом армуючої складової

На відміну від коефіцієнту тертя, технологічна схема виготовлення значно помітніше впливає на зносостійкість композитів, яка суттєво збільшується при використанні гарячого штампування, та меншою мірою залежить від швидкості ковзання. Величина зношування спечених композитів з 10% армуючих добавок складає близько 45-60 мг (для сплавів, армованих TiC) та 40-47 мг (при армуванні TiB), зменшуючись для гарячештампованих композитів такого ж складу до 5-11 мг при армуванні TiC (рис. 18,а), та 12-15 мг – для TiB (рис. 18,б). Відмічений ефект пояснюється суттєвим впливом на зносостійкість залишкової поруватості, характерної для спечених сплавів, тоді як гарячештамповані композити практично безпористі.

Деяко вища зносостійкість гарячештампованих композитів, армованих карбідом титану, у порівнянні з композитами, армованими боридом титану, обумовлена, вочевидь, суттєво різною морфологією карбідних та боридних включень. Тоді як частинки TiC мають форму близьку до сферичної, то голкоподібні включення

монобориду титану, маючи досить велике співвідношення довжини до товщини, руйнуються при навантаженні, утворюючи тонкі та гострі абразивні включення.

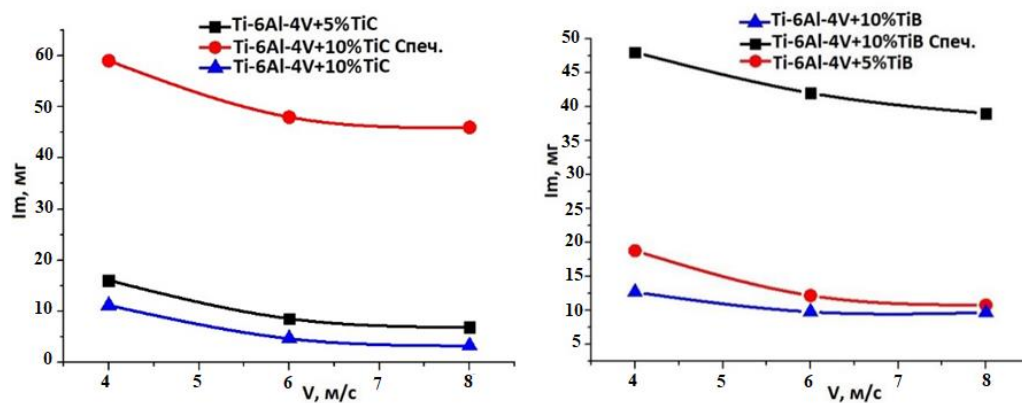


Рис.18. Залежність величини зношування зразків від швидкості ковзання для спеченого та гарячештамованих композитів з різним вмістом армуючої складової

Наведена теза підтверджується результатами профілометричних та мікроструктурних досліджень поверхонь тертя, з яких можна зробити висновок, що в той час, коли зношування композитів, армованих карбідом титану, відбувається головним чином шляхом деламінації поверхневих шарів (рис. 19,а,в), то в разі армування моноборидом титану переважним є механізм абразивного зношування (рис. 19,б,г).

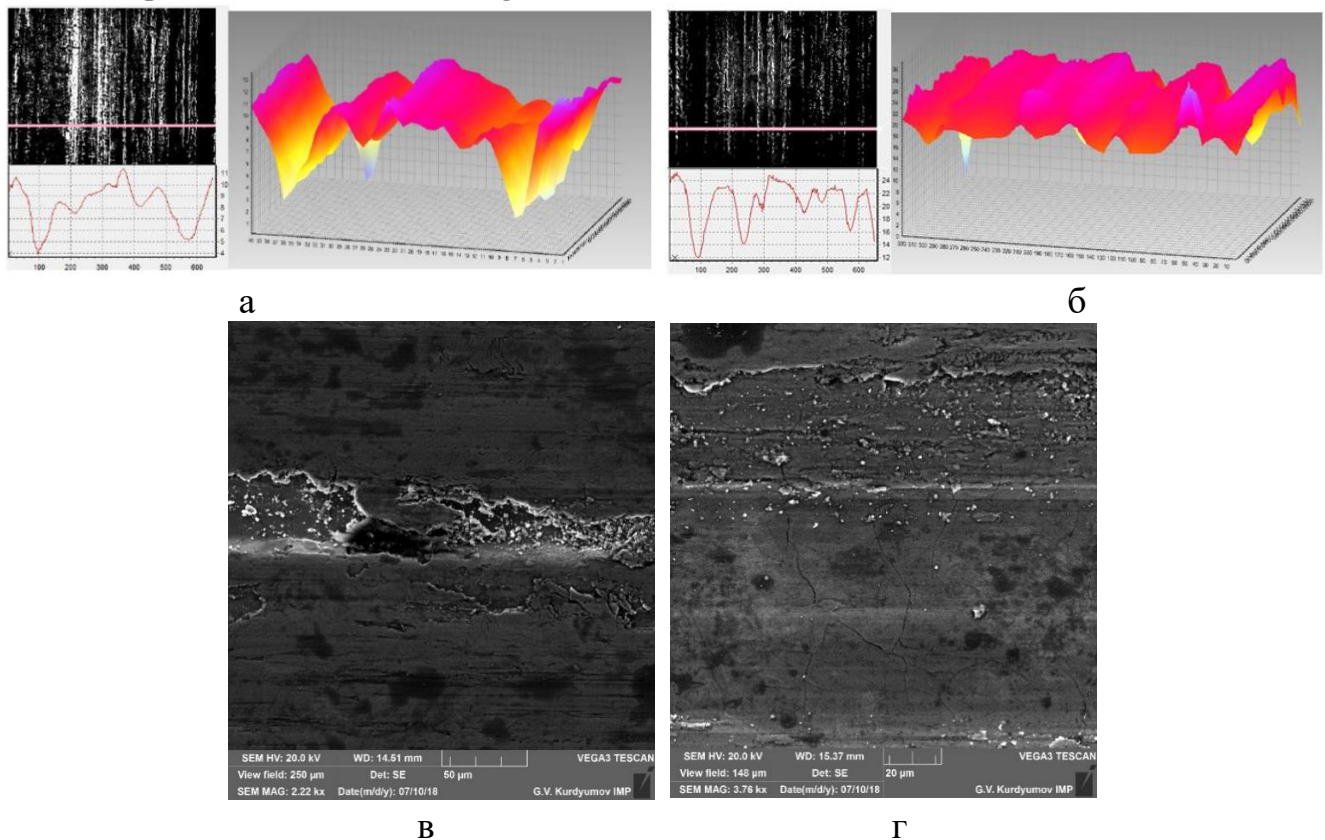


Рис. 19. Профілограми (а, б) та мікроструктура (в, г) поверхонь зношування титаноматричних композитів, армованих TiC (а, в) та TiB (б, г)

З метою оцінки можливостей використання шаруватих (градієнтних) структур як елементів балістичного захисту були виготовлені дво- та тришарові пластини, що склалися зі сплаву Ti-6Al-4V та композитів на його основі. Верхній шар двошарових спечених пластин складався із міцнішого і твердого композиту, армованого карбідом або боридом титану, нижній шар – з пластичного неармованого сплаву. В трьохшарових пластинах використано два композитні шари із різним вмістом армуючих частинок для більш плавної зміни характеристик по товщині матеріалу.

Балістичні випробування спечених, а також спечених і гарячедеформованих шаруватих пластин проводилися пострілами із балістичного ствола СВД С-08 кулею 7,62 мм зі сталевим термозміцненим осердям гвинтівкового набою 7,62×54 мм.

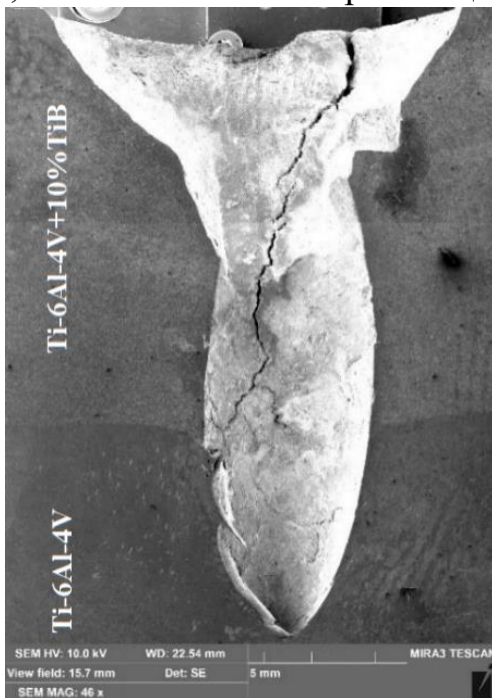


Рис.20. Зона ураження броньового елемента з двошарової композитної плити

На рис. 20 представлена макроструктура зони ураження броньового елемента з двошарової плити розміром 79×126×31 мм. Як можна бачити з ілюстрації, після попадання бронебійного осердя в перший армований боридом титану шар, відбувається гасіння більшої частини енергії кулі, а другий пластичний шар сплаву в такій структурі поглинає залишкову енергію кулі.

Оцінка балістичної стійкості пластин із шаруватих титаноматричних градієнтних композитів проводилася шляхом порівняння отриманих при їх випробуваннях даних із відомими даними J.C. Fanning для різних типів титанових сплавів за значеннями швидкості V50, яка відповідає 50 % вірогідності пробиття захисної пластини відповідної товщини. Як можна бачити з рис. 21, для всіх наведених даних щодо відомих типів броньових пластин з різних типів титанових сплавів пластини товщиною до 18 мм при пострілі кулею 7,62 мм мають 50 % вірогідність непробиття при швидкостях, що не перевищують 800 м/с.

В той самий час, спечені пластини із шаруватою структурою, які складаються зі сплаву Ti-6Al-4V та металоматричних композитів на його основі, виготовлені на базі результатів даної роботи, забезпечили стійкість проти пробиття за швидкості кулі 800 м/с при товщині лише 14 мм (точки 1 і 2, рис.21), а пластини товщиною 16-20 мм (точки 3 і 4, рис.21) витримують дію кулі 7,62 мм навіть при швидкості 900 м/с (забезпечуючи 100% непробиття), що відповідає 5 класу захисту. Цей результат дозволяє зменшити товщину, і, відповідно, масу захисних пластин при їх виготовленні за розробленим підходом, зберігаючи відповідний клас захисту броні.

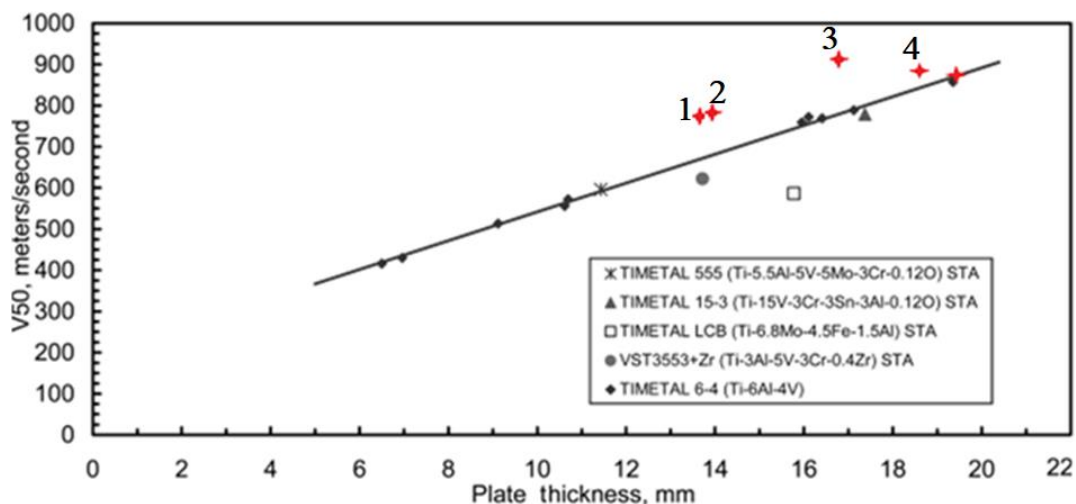


Рис. 21. Залежність швидкості V50 від товщини титанових елементів броньового захисту за даними J.C. Fanning (таблиця) та розроблених в роботі шаруватих структур(★), що складаються з титаноматричних композитів

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача удосконалення технології отримання титаноматричних композитів з високомодульною армуючою складовою на основі встановлення загальних закономірностей формування структури та властивостей композитів різного складу та розробка фізико-технологічних засад створення матеріалів даного класу з високим комплексом механічних та експлуатаційних характеристик. Основні результати:

1. За результатами порівняльного аналізу показана ефективність використання вихідного порошку гідриду титану замість титанового порошку як матеріалу основи шихти для отримання спечених металоматричних композитів на основі титану з присадками TiC, TiV₂ та V₄C. Встановлено, що середня поруватість спечених пресовок із сумішей на основі порошку TiH₂ для всіх видів присадок є меншою від пористості відповідних зразків, отриманих із застосуванням порошку технічно чистого титану, завдяки прискоренню дифузійних процесів при спіканні внаслідок активованого стану титанової матриці, яка утворюється при дегідуванні гідриду титану в процесі нагрівання. Це забезпечує вищі значення механічних характеристик у порівнянні із композитами, отриманими з використанням серійного порошку титану.

2. Результати дилатометричних досліджень показали, що усадка пресовок, отриманих із суміші порошку TiH₂ з добавками TiV₂ при досягненні температур спікання є значно меншою, ніж для порошку гідриду титану без армуючої присадки, і не перевищує 1,5-2 % на відміну від ~10 % для гідриду титану без дибориду. Поруватість спечених пресовок зростає зі збільшенням вмісту дибориду титану у вихідній шихті з 1,5 %, для зразків без боридних включень, до 7,5 %, для пресовок, спечених із шихти з 10 % TiV₂, що обумовлено проходженням реакції утворення монобориду титану TiV₂+Ti→2TiV та проявом при спіканні ефекту Френкеля.

3. Встановлено, що при термічному синтезі металоматричних композитів на основі сплаву Ti-6Al-4V із порошкових сумішей гідриду титану і алюмінієво-

ванадієвої лігатури з армуючими добавками, ванадій і алюміній повністю розчиняються в матричній фазі із формуванням однорідного сплаву. Дифузії вуглецю в матрицю з частинок TiC під час спікання не виявлено, розподіл частинок TiC у сформованій матриці визначається умовами перемішування шихти. В той же час дифузія бору в матрицю з боридних армуючих включень під час спікання формує в матриці рівномірний розподіл частинок фази TiB.

4. Показано можливість суттєвого (від 20 % для композитів з 5 % TiB₂, до двох раз – з 10 % TiB₂) підвищення характеристик міцності титаноматричних композитів шляхом гарячого штампування спечених заготовок за рахунок диспергування структури та забезпечення практично безпористого стану матеріалу. Встановлено, що як твердість, так і міцність гарячештампованого матеріалу монотонно зростають зі збільшенням вмісту боридної фази в складі композиту до 10 %, що обумовлено відсутністю впливу на механічні характеристики залишкової пористості, характерної для спечених композитів.

5. За результатами комплексного дослідження особливостей кінетики спікання пресовок різного хімічного складу показана можливість отримання шаруватих (градієнтних) структур, які складаються з шарів металоматричних композитів і сплавів, такі структури характеризуються рівномірною усадкою в кожному із шарів та відсутністю розшарування, завдяки оптимізації фракційного складу порошків кожного шару та тиску пресування. Показано, що відповідне розташування пластичного шару сплаву без армуючої присадки та більш твердого композитного шару з високомодульною складовою забезпечує можливість створення спечених структур, які характеризуються оптимальним балансом як високої міцності (до 2000÷2200 МПа), так і пластичності (10÷20 %) при випробуванні на згин.

6. Результати триботехнічних випробувань спечених та гарячештампованих титаноматричних композитів показали, що для всіх складів досліджуваних матеріалів зі збільшенням швидкості ковзання з 4 до 8 м/с зменшується як коефіцієнт тертя, так і інтенсивність зношування. Зі збільшенням вмісту армуючої фази з 5 до 10 % зносостійкість матеріалу підвищується до 20 %. Суттєве підвищення зносостійкості композитів однакового хімічного складу (до 5-ти раз) забезпечується за рахунок гарячого штампування спечених заготовок.

7. Проведено дослідження балістичних характеристик спечених та гарячепресованих шаруватих композитів на основі титаноматричних сплавів. Показано, що застосування гарячого пресування при відповідному співвідношенні складу та товщини пластин дозволяє забезпечити отримання елементів броньованого захисту, які відповідають вимогам 5 класу захисту.

ПЕРЕЛІК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Баглюк Г.А., Івасишин О.М., Стасюк О.О., Саввакін Д.Г. Вплив компонентного складу шихти на структуру та властивості спечених титаноматричних композитів з високомодульними сполуками. Порошкова металургія. 2017. №1/2. С. 59-69. *Особистий внесок здобувача:* проведено підготовку вихідних порошкових сумішей для синтезу титаноматричних композиційних матеріалів, досліджено

залежності пористості та твердості від виду армуючих включень, обробка результатів. *(включено до Scopus, Web of Science)*

2. Ивасишин О. М., Марковский П. Е., Саввакин Д. Г., Бондарчук В. И, Стасюк А. А., Приходько С. В. Микроструктура и свойства многослойных материалов на основе сплава Ti-6Al-4V, полученных по порошковой технологии. Современная электрометаллургия. №3(131). 2018. С.52-57. *Особистий внесок здобувача:* синтезовано багатошарові матеріали на основі титану досліджено мікроструктуру, підготовлено зразки та проведено механічні випробування, обробка результатів.

3. Bagliuk G.A., Stasiuk O.O. Microstructure and mechanical properties of P/M titanium matrix composites reinforced with TiB. Materials Science. Non-Equilibrium Phase Transformations. Vol.4. 2018. С.133-138. *Особистий внесок здобувача:* виготовлення титаноматричних композитів, дослідження мікроструктури і механічних властивостей, обробка результатів *(іноземне фахове видання)*.

4. Prikhodko S., Markovsky P., Savvakin D., Stasiuk O., Ivasishin O. Thermo-Mechanical Treatment of Titanium Based Layered Structures Fabricated by Blended Elemental Powder Metallurgy. Materials Science Forum. Vol. 941. 2018. P. 1384-1390. *Особистий внесок здобувача:* Дослідження вихідних порошкових матеріалів, виготовлення багатошарових композиційних матеріалів. Участь в дослідженні механічних властивостей, обговорені та обробці отриманих результатів *(іноземне фахове видання)*.

5. Ивасишин О.М., Баглюк Г.А., Стасюк О.О., Саввакин Д.Г. Особенности структуро утворення приспиканні порошковых сумішей системы TiH₂+TiB₂. Фізика і хімія твердого тіла. 2017. №1. С. 15-20. *Особистий внесок здобувача:* створено вихідні зразки з порошковых сумішей, досліджено мікроструктуру, проведено дилатометричні дослідження, обробку результатів.

6. Ivasishin O.M., Akhonin S.V., Savvakin D.G., Berezos V.A., Bondarchuk V.I., Stasyuk O.O., Markovsky P.E. Effect of Microstructure, Deformation Mode and Rate on Mechanical Behaviour of Electron-Beam Melted Ti-6Al-4V and Ti-1.5Al-6.8Mo-4.5Fe Alloys. Progress in Physics of Metals. №19. 2018. С.316-347. *Особистий внесок здобувача:* підготовка вихідних зразків та зразків для дослідження мікроструктури, обробку результатів. *(включено до Scopus)*.

7. Prikhodko S.V., Markovsky P.E., Savvakin D.G., Stasiuk O.O., Norouzi R.M., Choi C., Ivasishin O.M. Characterization of Layered Structures of Ti-6Al-4V Alloy and Metal Matrix Composites on Its Base. Proceedings of Microscopy & Microanalysis. 23 (Suppl 1), 2018, pp. 2218-2219. *Особистий внесок здобувача:* Підготовка вихідних сумішей та синтез титаноматричних композитів на основі титанового сплаву Ti-6Al-4V, обговорення та обробка отриманих результатів *(іноземне фахове видання)*.

8. Ивасишин О.М., Саввакин Д.Г., Дехтяренко В.А.,Стасюк О.О. Взаємодія з воднем порошковых лігатур Ti-Al-V-Fe, Al-V-Fe та Ti-Al-Mo-Fe. Фізико-хімічна механіка матеріалів. №2. 2018. С. 121-127. *Особистий внесок здобувача:* проведення шихтування і створення сумішей для виплавки лігатур відповідного складу, виконано мас-спектрометричні дослідження, обробку результатів *(включено до Scopus)*.

9. Markovsky P.E., Ikeda M., Savvakin D.G., Stasyuk O.O. Microstructure and properties of new Ti-Al-Fe-Cr transition class alloy produced by blended elemental powder metallurgy using TiH₂ and master alloy. Metallography, Microstructure and Analysis

№7(2). 2018. РР. 184-193. *Особистий внесок здобувача:* проведено шихтовка порошкових сумішей, та отримання лігатури для відповідного титанового сплаву, обробку результатів (*іноземне фахове видання*).

10. Ахонин С.В., Марковский П.Є., Березос В.А., Стасюк А.А. та ін. Получение высокопрочного титанового сплава Ti-1.5Al-6.8Mo-4.5Fe способом ЭЛП. Современная Электротехнология. №1. 2018. С. 9-16. *Особистий внесок здобувача:* підготовка та дослідження вихідних матеріалів для створення даних матеріалів.

11. Баглюк Г.А., Стасюк А.А., Саввакін Д.Г. Структура и фазовый состав спеченных сплавов, полученных из порошковых смесей системы TiH₂+TiV₂. Порошковая металлургия: Инженерия поверхности, Новые порошковые материалы. Сварка. Минск «Беларуская наука». 2017. С. 347-359. *Особистий внесок здобувача:* синтез металоматричних композитів з різним вмістом армуючої фази у вигляді дибориду титану, досліджено мікроструктуру та механічних властивостей композитів, проведено обробку результатів (*іноземне фахове видання*).

12. Івасишин О.М., Марковський П.Є., Саввакін Д.Г., Стасюк О.О., Мельник Я.І. «Спосіб одержання виробів на основі титану з багатошаровою структурою» Патент 114876, Серпень, 2017. *Особистий внесок здобувача:* створення багатошарових титанових виробів методами порошкової металургії, дослідження мікроструктури в кожному з окремих шарів, проведено обробку результатів.

13. Savvakin D., Prihodko S., Matviychuk M., Ivasishin O., Stasiuk O., Fabrication of Layered Ti-6Al-4V Plated by Cold Isostatic Pressing Powder Metallurgy for Anti-Ballistic Protection Application. Збірка тез Titanium USA 2017. 8 – 11 October 2017. Miami, Florida, USA. *Особистий внесок здобувача:* створення градієнтних багатошарових титанових плит для балістичних випробувань, дослідження мікроструктури та механічних властивостей матеріалу.

14. Prihodko S., Markovsky P., Savvakin D., Stasiuk O., Ivasishin O. Thermo-mechanical treatment of titanium based layered structures fabricated by blended elemental powder metallurgy. Збірка тез International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, Processing, Fabrication, Properties, Applications; July 9-13. 2018, Paris, France. *Особистий внесок здобувача:* Дослідження вихідних порошків та їх шихтування, пресування, спікання, проведення механічних досліджень.

15. Markovsky P., Ivasishin O., Savvakin D., Bondarchuk V., Stasiuk O., Prihodko S. Structure and Mechanical Properties of Layered Materials on Base of Ti-6Al4V Alloy Fabricated Using Powder Metallurgy Approach. Збірник тез доповідей конференції Materials science and technology. 14 – 18 жовтня 2018. Columbus USA. *Особистий внесок здобувача:* створення багатошарових матеріалів на основі титану, вивчення мікроструктури та обробка результатів механічних випробувань.

16. Ivasishin O., Savvakin D., Stasiuk O., Oryshych D. Titanium Hydride Powder Metallurgy and its Application for Medical Type Alloys. Збірка тез 10-th international conference “advanced materials and technologies: from idea to market”. 24-26 October, 2018, Ningbo, China. *Особистий внесок здобувача:* дослідження вихідних порошкових сумішей, проведення дилатометричних та мас-спектрометричних досліджень.

17. Bagliuk G., Stasiuk O., Savvakin D. Effect of sintering and hot forging on structure and mechanical properties of Ti-based metal matrix composites manufactured with

use of TiH_2 powder. Збірка тез 10-th international conference “advanced materials and technologies: from idea to market”. 24-26 October, 2018, Ningbo, China. *Особистий внесок здобувача*: створення сумішей для титаноматричних композитів, проведення пресування та гарячого штампування композиційних матеріалів, вивчення мікроструктури і механічних властивостей.

18. Баглюк Г.А., Івасишин О.М., Стасюк О.О., Саввакін Д.Г. Структура та властивості спечених металоматричних композитів на основі титану з високомодульними сполуками. Сучасні проблеми фізики металів і металічних систем. Конференція присвячена 70-річчю від дня заснування Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова Національної академії наук України. – Київ, Україна. 2016. С.145. *Особистий внесок здобувача*: синтез металоматричних композитів та вивчення мікроструктури і механічних властивостей.

19. Івасишин О.М., Марковский П.Е., Саввакін Д.Г., Стасюк А.А., Приходько С.В. Микроструктура и свойства многослойных материалов на основе сплава $Ti-6Al-4V$, полученных по порошковой технологии. Збірка тез доповідей міжнародної конференції «Титан 2018. Виробництво і застосування в Україні». 11-13 червня 2018 року. Київ. *Особистий внесок здобувача*: підготовка вихідних порошкових сумішей, пресування багатошарових матеріалів, дослідження мікроструктури, обробка результатів механічних випробувань.

20. Івасишин О.М., Марковский П.Е., Баглюк Г.А. Саввакін Д.Г., Стасюк А.А. Металломатричные композиты на основе титана с высокомодульными наполнителями, полученные с использованием наводороженных порошков. Сборник тезисов докладов 5-международной конференции HighMatTech. 5 – 8 октября 2015 г. Киев. С 64-65. *Особистий внесок здобувача*: підготовка зразків для синтезу металоматричних композитів, дослідження впливу армуючої складової на пористість.

21. Стасюк А.А., Саввакін Д.Г. Використання порошків гідриду титану, одержаних різними методами, для виготовлення титанових виробів. Збірка тез доповідей перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів 16-17.05.2014 року, Київ. *Особистий внесок здобувача*: Встановлення впливу гідриду титану (отриманого різними методами) на синтез і кінцеві властивості матеріалу.

22. Стасюк А.А., Баглюк Г.А., Саввакін Д.Г. Формування металоматричних композитів $Ti-TiV$ шляхом спікання порошкових сумішей TiH_2+TiV_2 . Збірка тез доповідей 11 міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів", 19-20. 05.2018 р. Київ. С. 91-94. *Особистий внесок здобувача*: синтез металоматричних композитів $Ti-TiV$, проведення дилатометричних досліджень, механічних випробувань і вивчення мікроструктури.

23. Стасюк О.О., Баглюк Г.А., Саввакін Д.Г. Вплив вмісту боридної складової на мікроструктуру і механічні властивості метало матричних композитів на основі титану. Збірка тез доповідей міжнародної конференції «Титан 2018. Виробництво і застосування в Україні». 11-13 червня 2018 року. Київ. *Особистий внесок здобувача*: синтез метало матричних композитів, проведення механічних досліджень та обробка результатів.

АНОТАЦІЯ

Стасюк О.О. Закономірності впливу тугоплавких високомодульних сполук на структуру і властивості спечених титанових сплавів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – Порошкова металургія і композиційні матеріали. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, 2019 р.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі удосконалення на основі встановлених загальних закономірностей формування структури та властивостей, технології отримання титаноматричних композитів різних компонентних груп з високим комплексом механічних та експлуатаційних характеристик із порошкових сумішей гідриду титану з високомодульними армуючими складовими.

Порівняльний аналіз показав ефективність використання вихідного порошку гідриду титану замість титанового порошку в ролі матеріалу основи для синтезу спечених металоматричних композитів на основі титану з присадками TiC, TiB₂.

За результатами дилатометричних досліджень встановлено, що усадка при спікання пресовок, отриманих із суміші порошку TiH₂ з добавками TiB₂ є значно меншою, ніж для порошку гідриду титану без армуючої присадки.

За допомогою комплексного дослідження особливостей кінетики спікання пресовок різного хімічного складу показана можливість отримання титаноматричних шаруватих композитів із градієнтною структурою.

Результати триботехнічних випробувань показали, суттєве підвищення зносостійкості композитів отриманих гарячим штампуванням спечених заготовок.

Оцінка балістичних характеристик дозволила встановити, що застосування гарячого пресування при відповідному співвідношенні складу та товщини пластин дозволяє забезпечити отримання елементів броньованого захисту, що відповідають вимогам 5 класу захисту.

Ключові слова: металоматричні композити, титаноматричні композити, гідрид титану, карбід титану, диборид титану, моноборид титану, порошкова металургія, синтез, гаряче штампування, градієнтні матеріали, механічні властивості.

АННОТАЦИЯ

Стасюк А.А. Закономерности влияния тугоплавких высокомодульных соединений на структуру и свойства спеченных титановых сплавов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 - Порошковая металлургия и композиционные материалы. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорського», Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи совершенствования на основе установленных общих закономерностей формирования структуры и свойств, технологии получения титаноматричных композитов различных

компонентных групп с высоким комплексом механических и эксплуатационных характеристик из порошковых смесей гидрида титана из высокомодульного армирующими составляющими.

Сравнительный анализ показал эффективность использования исходного порошка гидрида титана вместо титанового порошка в качестве материала основы для синтеза металломатричных композитов на основе титана с присадками TiC, TiB₂.

По результатам dilatометрические исследований установлено, что усадка при спекании прессовок, полученных из смеси порошка TiH₂ с добавками TiB₂ значительно меньше, чем для порошка гидрида титана без армирующей присадки.

С помощью комплексного исследования особенностей кинетики спекания прессовок различного химического состава показана возможность получения титаноматричных слоистых композитов с градиентной структурой.

Результаты триботехнических испытаний показали, существенное повышение износостойкости композитов полученных штамповкой спеченных заготовок.

Оценка баллистических характеристик позволила установить, что применение горячего прессования при соответствующем соотношении состава и толщины пластин позволяет обеспечить получение элементов броневой защиты, соответствующих требованиям 5 класса защиты.

Ключевые слова: металломатричные композиты, титаноматричные композиты, гидрид титана, карбид титана, диборид титана, моноборид титана, порошковая металлургия, синтез, горячая штамповка, градиентные материалы, механические свойства.

SUMMARY

Stasiuk O.O. The general laws of high-modulus refractory compounds influence on structure and properties of sintered titanium alloys. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for Ph.D. degree (technical sciences) on specialty 05.16.06 –Powder metallurgy and composite materials. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute ", Kyiv, 2019.

The dissertation is dedicated to solution of important scientific and technical task for perfection of manufacturing technology of titanium metal matrix composites possessing high mechanical and exploitation characteristics. Development and optimization of technology is performed on the base of establishing of general laws for structure and properties formation upon sintering of powder blends of titanium hydride and high-modulus armoring compounds.

On the base of comparative analysis it was shown great efficiency for using of titanium hydride powder instead of titanium powder for synthesis of titanium metal matrix composites with TiC and TiB₂ additions. It was shown the influence of armoring additions (TiC, TiB₂, B and B₄C) on peculiarities of structure formation of sintered metal matrix composites. Considerable dependence of sintered microstructure of metal matrix composites on type of armoring additions was demonstrated. The most useful is using of TiC and TiB₂ powders as armoring phase in titanium matrix.

Dilatometric investigation results established that shrinkage upon sintering of compacted TiH₂ + TiB₂ powder blends is considerably lower than for titanium hydride

powder alone. Such result is due to high temperature reaction of TiB formation as well as formation of Kirkendall's porosity. It was shown, the increase of titanium diboride content in starting blends leads to reduced shrinkage. Addition of 5 % TiB₂ reduces linear shrinkage down to 4 % (while shrinkage is 10 % for titanium hydride powder without diboride additions); increase in TiB₂ content to 10 % resulted in 2% linear shrinkage. Contrary, this phenomenon was not observed for synthesis of Ti-TiC metal matrix composites, since titanium carbide is thermodynamically stable compound and did not react with titanium matrix.

The influence of hot stamping on microstructure of sintered titanium-based matrix composites was studied. Hot stamping ensured uniform microstructure, uniform redistribution of armoring particles and achievement of poreless structures for composites with different type and content of armoring particles. The possibility for considerable (20 % for composite materials with 5 % TiB₂, up to 2 times for composites with 10 % TiB₂) increase in strength after hot stamping of sintered billets was demonstrated. This result is due to structure grinding and formation of poreless material. Hardness and strength characteristics are monotonically growth with increase in boride phase content up to 10 % owing to absence of porosity which inevitably presented in sintered composites and harmfully affects mechanical properties.

Hot stamping resulted in noticeable growth of velocity of elastic waves propagation in various composites. When influence of porosity factor on elastic modulus is excluded, increase in armoring phase content and matrix alloying leads to increase in Young modulus for all composites. Elastic modulus of sintered Ti-TiB and (Ti-6Al-4V)-TiC composites goes up with increase of armoring powders in the blends from 5 to 10 %. Contrary, elastic modulus for sintered (Ti-6Al-4V)+TiB composites drops while TiB₂ powder content in starting blends increased from 5 to 10 % due to high porosity of sintered materials. All sintered materials and hot stamped composites with TiC are characterized with E_{xx}/E_{yy} ratio close to 1, where E_{xx} is elastic modulus determined for pressing direction and E_{yy} - modulus for orthogonal direction. This value proves isotropy of material characteristics. This ratio is some lower for hot stamped composites with TiB due to reorientation of needle-like TiB particles and their arrangement in direction perpendicular to direction of stamping force.

Complex investigation of sintering kinetics for compacts of different composition proved possibility to obtain titanium-based composites with layered (gradient) structures. Layers of different chemical compositions demonstrated uniform shrinkage within each layer and integrity of adjacent layers owing to optimization of powder size and compaction pressure. The possibility obtaining sintered layered composites without shape distortion was established owing to proper selection of powder sizes for each individual layer. It was established that deformation energy for 2-layered articles is an order of magnitude higher than for single layer materials. The influence of thickness of individual layers on mechanical characteristics of 2-3 layered structures was investigated. Optimization of thickness of ductile Ti-6AL-4V alloy layer and thickness of adjacent composite layer with high content of armoring phases resulted in regulation of strength/ductile characteristics for 2-layered structures.

It was shown that location of ductile layer (without armoring particles) and hard layer (with high-modulus armoring particles) provides production of sintered composites with

optimized combination of high strength (to 2000÷2200 MPa) and ductility (10÷20 %) at flexure tests.

Tribological tests carried out for sintered composites demonstrated that increase in armoring phase content from 5 to 10 % leads to increase in wear resistance up to 20 %. Hot stamping of sintered samples of determined chemical composition resulted in considerable increase (up to 5 times) of wear resistance.

Evaluation of antiballistic characteristics for sintered and sintered and hot stamped composites was performed. Hot stamping at proper selection of chemical composition and thickness of layers resulted in armor materials which met requirements for 6 class protection. Employment of layered titanium-based composites as armor materials for antiballistic protection provides 40-50 % weight saving in comparison to steel armor materials.

Key words: metal matrix composites, titanium matrix composites, titanium hydride, titanium carbide, titanium diboride, titanium monoboride, powder metallurgy, synthesis, hot stamping, gradient materials, mechanical characteristics.