

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СМІРНОВА ЯНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 669.018.9[043.3]

ДИСЕРТАЦІЯ

СТВОРЕННЯ ОСНОВ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ШАРУВАТИХ
МЕТАЛО-КЕРАМІЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З
ПІДВИЩЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

13 – Механічна інженерія

136 – Металургія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Я. О. Смірнова

Науковий керівник: Гурія Ірина Миранівна, к. т. н., доц.

Київ – 2022

АНОТАЦІЯ

Смірнова Я. О. Створення основ технологій виготовлення шаруватих метало-керамічних композиційних матеріалів з підвищеними фізико-механічними характеристиками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 136 Металургія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2022.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної проблеми, а саме розробленню та дослідженню технологічних параметрів виготовлення шаруватих композиційних матеріалів Ti(Ti-TiB)/Al з підвищеними фізико-механічними характеристиками рідкофазним методом.

У роботі представлено аналітичний огляд наукових джерел за тематикою дисертаційного дослідження. Розглянуто поширені твердофазні та існуючі рідкофазні методи виготовлення шаруватих Ti/Al композиційних матеріалів. Показано вплив технологій виготовлення на мікроструктуру зони взаємодії, фазовий склад і механічні властивості отриманих композитів. Встановлено, що рідкофазні методи виготовлення шаруватих Ti/Al композитів, які мають низку переваг у порівнянні з твердофазними, потребують технологічного розвитку та є непоширеними у промисловості. Окрім того, система Ti-TiB/Al, яка є перспективною завдяки підвищеній питомій міцності та покращеним фізичним властивостям, недостатньо досліджена на сьогодні.

У розділі 2 дисертаційної роботи описано вихідні матеріали, методикку виготовлення шаруватих Ti/Al композиційних матеріалів рідкофазним способом, методи дослідження їх мікроструктури, хімічного і фазового складу та фізико-механічних властивостей.

Представлено технологічні основи виготовлення шаруватих Ti/Al композиційних матеріалів рідкофазним формуванням з використанням флюсу евтектичного сплаву KF-AlF₃, що забезпечує рівномірне просочення алюмінієвого розплаву між пластинами на основі титану. Встановлено, що на границі розподілу між твердим титаном марки VT1-0 та рідким алюмінієм утворюється перехідний шар, товщина якого залишається стабільною за температур розплаву від 700 до 800 °С, ширини зазору між титановими пластинами від 0,5 до 1,5 мм та часу витримування 900 с. За фазовим складом перехідний шар відповідає твердим розчинам титану в алюмінії та алюмінію в титані. Визначено, що мінімального часу витримування достатньо для взаємодії титану та алюмінію. Утворення рівномірного перехідного шару забезпечує витримування у розплаві після просочення протягом 300 с. Збільшення ширини зазору між титановими пластинами від 0,5 до 1,5 мм призводить до збільшення швидкості підйому розплаву між ними від $1,6 \pm 0,12$ до $2,9 \pm 0,20$ мм/с.

Товщина утвореного перехідного шару залишається стабільною для всіх досліджених значень ширини зазору між пластинами на основі титану у системах VT1-0/Al, VT6/Al і Ti-TiB/Al та у середньому складає 2,8, 3,8-4,2 і 6,3-6,5 мкм відповідно. Потовщення шару за умови зміни вихідних пластин обумовлене їх хімічним складом та структурою. Для досліджених систем представлено механізми міжфазної взаємодії між твердим титаном або його сплавом та рідким алюмінієм. За представленими у дисертаційній роботі технологічними параметрами отримано не лише тришарові, а й п'яти- та семишарові матеріали систем VT1-0/Al та VT6/Al. Збільшення кількості шарів у матеріалі не призводить до зміни мікроструктури зони взаємодії.

У результаті проведених досліджень на трьохточковий згин встановлено, що тришарові композиційні матеріали системи VT1-0/Al не руйнуються. Під час досягнення кута вигину зразків у діапазоні 130-120° на границі розподілу відбувається утворення тріщин, максимальним розміром до 20 мкм, які не призводять до розшаровування та відокремлення титанових пластин від алюмінієвого шару.

Під час випробувань на розтяг три- та п'ятишарові матеріали системи VT1-0/Al демонструють пластичну поведінку, а максимальні значення міцності досягаються за умови мінімальної ширини зазору 0,5 мм і сягають 305 ± 16 МПа за деформації $32,1 \pm 3,0$ %. Тришарові композити системи VT6/Al демонструють аналогічну поведінку під час випробувань, а максимальна міцність на розтяг складає 602 ± 15 МПа за деформації $15,3 \pm 2,4$ %. На відміну від попередніх, матеріали системи Ti-TiB/Al демонструють крихку поведінку під час руйнування. Міцність на розтяг тришарового матеріалу за умови ширини зазору між пластинами 1,5 мм у середньому становить 479 ± 18 МПа, а деформація – $14,96 \pm 1,7$ %.

Експериментально встановлено, що величина міцності на розтяг шаруватих композиційних матеріалів задовільно узгоджується зі значеннями, розрахованими за правилом сумішей, враховуючи об'ємну частку, кількість та фізико-механічні властивості титанових і алюмінієвих шарів, що дозволяє прогнозувати механічні властивості шаруватих Ti /Al композитів.

Встановлено, що у результаті прокатування у атмосфері повітря без попереднього нагрівання рідкофазно сформовані тришарові матеріали системи VT1-0/Al зберігають цілісність границі розподілу. Ступінь обтискання оброблених тиском матеріалів складав від 0,27 до 0,45. Перехідний шар, утворений у результаті взаємодії вихідних металів, фрагментується та переходить у алюмінієву частину. Міцність прокатаних композитів проти вихідних збільшується до 401-491 МПа залежно від ширини зазору та ступеня обтискання. Анізотропія міцності на розтяг у досліджених матеріалах практично не проявляється і не залежить від напрямку розтягу досліджуваних зразків відносно напрямку прокатування.

У результаті прокатування тришарових композиційних матеріалів системи Ti-TiB/Al у вакуумі з попереднім нагріванням було досягнуто максимального ступеня обтискання 0,36. Збільшення температури прокатування композиту призводить до потовщення утвореного на границі розподілу перехідного шару. Міцність матеріалу зі ступенем обтискання 0,2 у середньому складає

725±20 МПа, а пластична деформація – 0,98±0,12 %, що вказує на збільшення міцності та зменшення пластичності у порівнянні з вихідним непрокатаним матеріалом.

За допомогою графіків Ешбі показано, що за питомими механічними характеристиками шаруваті Ti/Al композити, отримані рідкофазним формуванням перевищують відомі титанові та алюмінієві сплави.

Ключові слова: композиційний матеріал, шаруватий композит, титан, титановий сплав, алюміній, борид титану, просочення, рідкофазне формування, мікроструктура, фазовий склад, механічні характеристики.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Smirnova Y.**, Huriia I., Loboda P. Liquid phase fabrication technology of layered Ti/Al composite. *U.P.B. Scientific bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. 2021. Vol. 83, Iss. 4. P. 273–282. (*Особистий внесок*: виготовила дослідні зразки, брала участь у обробленні й обговоренні результатів, підготувала статтю до друку)
2. **Смірнова Я. О.**, Гурія І. М. Мікроструктура та механічні властивості шаруватого литого композиту ВТ-6/Al. *Метал і лиття України*. 2022. Том 30, №1. С. 84–90. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.084> (*Особистий внесок*: виготовила дослідні зразки, брала участь у обробленні й обговоренні результатів, підготувала статтю до друку)
3. **Смірнова Я. О.**, Солодкий Є. В., Гурія І. М., Лобода П. І. Кінетика формування перехідного шару при взаємодії Ti-TiВ з рідким алюмінієм. *Наукові вісті КІП*. 2019. №2. С. 71–77. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.2.167784> (*Особистий внесок*: брала участь у обробленні й обговоренні результатів, підготувала статтю до друку)
4. Гурія І. М., **Смірнова Я. О.**, Лобода П. І., Солодкий Є. В. Виготовлення шаруватого метал-інтерметалідного армованого композиційного матеріалу. *Металознавство та обробка металів*. 2019. Том 25, №4(92). С. 47–52. <https://doi.org/10.15407/mom2019.04.047> (*Особистий внесок*: брала участь у виготовленні дослідних зразків, обробленні й обговоренні результатів, підготувала статтю до друку)
5. Спосіб виготовлення шаруватого композиційного матеріалу із титану, армованого боридом титану і алюмінію: пат. 144841 Україна, № u202003457; заявл. 09.06.2020; опубл. 26.10.2020, Бюл. № 20. Гурія І. М., **Смірнова Я. О.**, Лобода П. І., Солодкий Є. В. (*Особистий внесок*: брала участь у патентному пошуку, проведені експериментальних досліджень та оформленні патенту)

6. **Смірнова Я. О.**, Гурія І. М., Солодкий Є. В., Лобода П. І. Отримання шаруватого металевого композиційного матеріалу з інтерметалідними прошарками. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8* : зб. тез доп. міжнар. наук. конф., м. Київ, 6-7 грудня 2018 р. Київ, 2018. С. 104–105. (*Особистий внесок*: брала участь у обробленні й обговоренні результатів, підготувала тези до друку)

7. **Смірнова Я. О.**, Гурія І. М. Перспективи виготовлення шаруватих метал-інтерметалічних композиційних матеріалів рідкофазними методами. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні* : зб. тез доп. XI міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 30-31 травня 2019 р. Київ, 2019. С. 171–173. (*Особистий внесок*: брала участь у обробленні й обговоренні результатів, підготувала тези до друку)

8. Гурія І. М., **Смірнова Я. О.**, Лобода П. І., Солодкий Є. В. Технологія виготовлення шаруватого титан-алюмінієвого композиційного матеріалу. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 9* : зб. тез доп. міжнар. наук. конф., м. Київ, 18-19 грудня 2019 р. Київ, 2019. С. 36–37. (*Особистий внесок*: брала участь у обробленні й обговоренні результатів, підготувала тези до друку)