

**Кивгило Б.В.<sup>1</sup>, Ямшинський М.М.<sup>1</sup>, Мініцький А.В.<sup>1</sup>, Биба Є.Г.<sup>1</sup>,  
Мініцька Н.В.<sup>1</sup>, Лук'яненко І.В.<sup>1</sup>, Радчук С.В.<sup>1</sup>, Чистяков О.В.<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського; <sup>2</sup>ФТІМС НАН України, м. Київ)**

**СТВОРЕННЯ БІМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ ЗАЛІЗО-  
АЛЮМІНІЙ ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ІНФІЛЬТРАЦІЇ ПОРИСТИХ  
КАРКАСІВ**

E-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com

Створення матеріалів, що поєднують в собі комплекс різних характеристик є необхідним для багатьох галузей виробництва, через постійно зростаючі вимоги сучасного промислового комплексу. Розробка технології отримання біметалів на основі системи залізо-алюміній представляє як науковий так і практичний інтерес через високі значення міцності та модуля пружності, високі тепло- та електропровідність і меншу питому вагу таких матеріалів [1]. Існують різні способи отримання біметалів системи залізо – алюміній, серед яких введення в розплав дисперсних частинок та їх перемішування у тигельній вакуумній індукційній печі з подальшим заливанням у форму [2], створення біметалевих частинок Fe/Al із розчинів, що проводиться в кислих умовах, за яких залізо легко осаджується на поверхні алюмінію [3], а також просочування (інфільтрація) пористих каркасів розплавом алюмінію під тиском [4]. При цьому роботи по просочуванню металевих каркасів алюмінієм стосуються переважно пористих нікелю, міді та титану, останній ефективно застосовується для створення композиційних матеріалів медичного призначення [5].

Застосування методу інфільтрації залізних каркасів розплавом алюмінію має практичне обмеження через погану змочуваність заліза алюмінієм. Автори роботи [6] проводили інфільтрацію залізного каркасу алюмінієм шляхом занурення у рідкий розплав. Проте, через активну взаємодію між залізом та алюмінієм, відбувалося утворення інтерметалідних фаз (зокрема FeAl<sub>3</sub>), що приводило до зачинення пор і припинення процесу просочування. У випадку примусового просочування залізного каркасу алюмінієм під тиском 10 МПа шляхом подачі стисненого аргону у камеру автоклаву, відбувалося практично повне заповнення пор розплавом алюмінію, однак в структурі матеріалу

спостерігалось значна кількість інтерметалідних фаз, що підвищило твердість та окрихчило матеріал. Також спостерігалась висока залишкова пористість, що знижує механічні властивості матеріалу. Для покращення заповнення розплавом алюмінію, чавунний каркас попередньо покривали цинком методом електроосадження з отриманням покриття близько 8 мкм [7]. Внаслідок розчинення і дифузії дуже тонкого цинкового покриття, під час затвердіння не спостерігалось агрегації цинку на межі з'єднання. Утворюється реакційний шар з нерегулярною морфологією з середньою товщиною приблизно 1 мкм, який в основному складається з інтерметалідних фаз.

Таким чином, розробка технології виробництва біметалевих матеріалів із залученням методів формування композитів шляхом інфільтрації пористих каркасів металевим розплавом алюмінію, є важливою науковою і технічною задачею, що передбачає використання пористого каркасу, отриманого шляхом переробки відходів стружки із чорних металів.

Метою представленої роботи є дослідження процесів отримання біметалевих матеріалів системи залізо-алюміній з використанням методів порошкової металургії та литва з високими фізико-механічними характеристиками.

Просочування пористих каркасів на основі заліза розплавом технічного алюмінію марки А1, проводили на спеціальному стенді з можливістю створення градієнту тиску. Пористий каркас встановлювали у спеціальну сталеву форму, нагрівали алюміній до температури 760 – 780 °С та заливали у форму із пористим каркасом після чого вмикали форвакуумний насос та проводили просочування при тиску 2 – 4 кПа протягом 5 –10 с.

Пресування частинок стружки показало, що середня пористість пресовок становить 35 – 40% і практично не залежить від прикладеного тиску, інший характер формуємості пресовок із стружки обумовлено фактором форми частинок. Частинки стружки мають лускату не ізометричну форму, це обумовлює низьку схильність до структурної деформації на стадії переукладання (при низьких тисках), що визначає низьке координаційне число такого порошку і,

відповідно, зменшення кількості контактів. Подальше збільшення тиску приводить до значної пластичної деформації частинок, при цьому практично не відбувається об'ємної деформації пресовки, що визначає великі значення пористості.

Просочування пористих залізних каркасів розплавом алюмінію забезпечило отримання безпористих біметалевих композитів. Як видно з мікроструктур, алюміній розподіляється по пористому залізному каркасу, повністю заповнюючи відкриті пори (рис. 1).

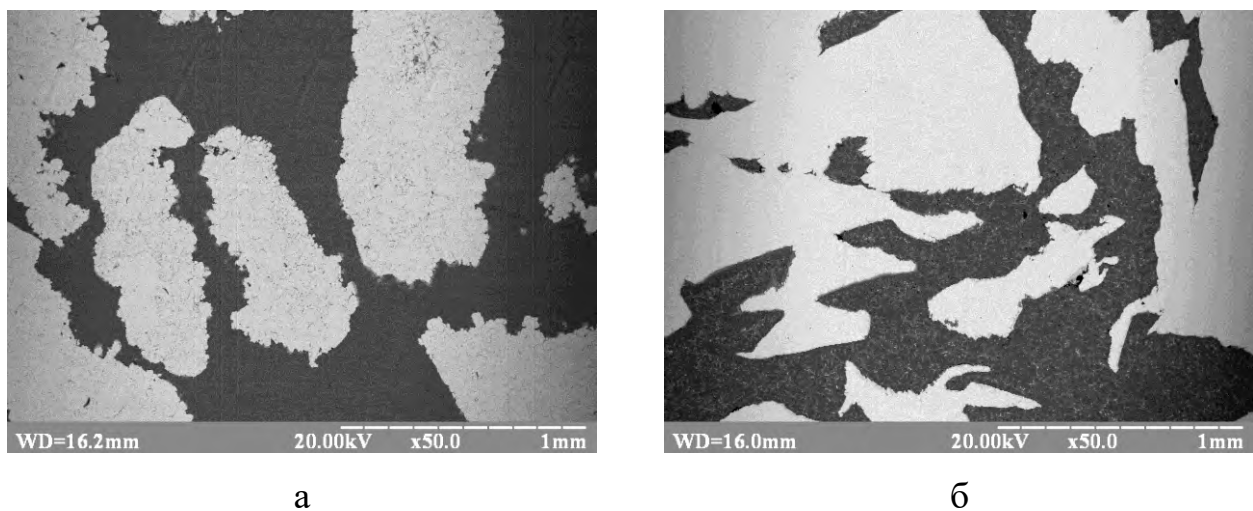


Рис. 1. Мікроструктура зразків після просочення розплавом Al: а – на основі залізного порошку; б – на основі залізної стружки

При цьому, як показали результати рентгенофазового аналізу (рис. 2), фазовий склад отриманих композитів складається із твердих розчинів  $\alpha$ -Fe та Al, тобто в матеріалі відсутні інтерметалідні фази, наявність яких є характерним при отриманні біметалів системи Fe–Al.

Фактична відсутність інтерметалідних фаз в структурі композиту обумовлено тим, що час просочування під вакуумом складає декілька секунд і компоненти не встигають прореагувати між собою. При цьому, металографічний аналіз показує на утворення хімічної сполуки, вміст якої не перевищує 1–2%, що розташовується тонким дискретним прошарком 5–10 мкм на границі взаємодії двох металів. Незначна кількість інтерметалідної фази пояснює її відсутність на

дифрактограмі, проте її наявність на границі металів забезпечує кращу адгезію між розплавом та каркасом.

Дослідження механічних характеристик отриманих композитів проводили визначаючи міцність на стиснення та твердість. Встановлено, що найбільші значення межі міцності спостерігається для зразків з каркасом із стружки (430-450 МПа), що пов'язано із високою площею контактної поверхні частинок стружки, які хаотично переплітаються між собою.

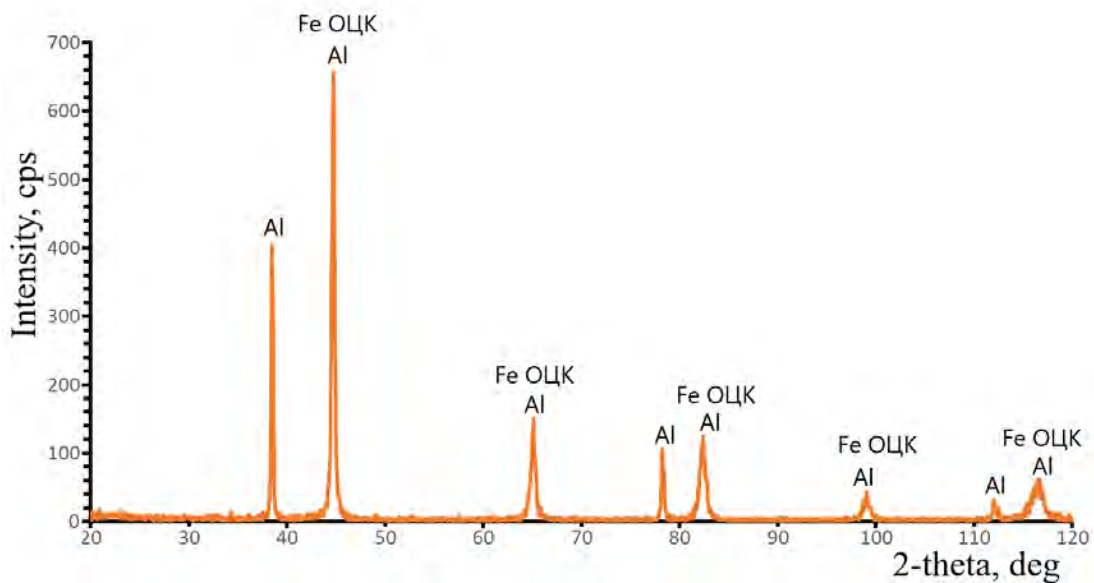


Рис. 2. Спектри рентгенівської дифракції біметалу системи залізо-алюміній

Таким чином, результати досліджень показали перспективність створення біметалів системи Fe-Al з високими значеннями фізико-механічних характеристик.

В результаті роботи розроблено ефективну та економічно рентабельну технологію виробництва біметалів на основі залізо-алюміній з високими фізико-механічними характеристиками із застосуванням утилізації відходів машинобудівних виробництв.

Встановлено можливість створення біметалів процесами інфільтрації із застосуванням відходів металообробки, розплавом алюмінію в умовах градієнту тиску, системи залізо-алюміній без утворення хімічних сполук. Відсутність хімічних сполук в системі Fe-Al в умовах просочування, пояснюється кінетикою

процесу, час просочування не перевищує декілька секунд, через що компоненти не встигають прореагувати між собою.

Література:

1. Loboda P.I., Minitsky A.V., Byba Ye.G., Sysoev M.O., Radchuk S.V. Effect of the Porous Skeletal Iron Structure on the Infiltration of Aluminum Melts // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – Volume 58, Nos.11-12, March 2020, Pages 651–657. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00121-0>

2. Рафальский И.Ф. Получение литейных композиционных материалов из алюминиевых сплавов в гетерофазном состоянии с дисперсными наполнителями // Литье и металлургия, 3(61), 2011. – С. 26–31.

<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2011-3-26-31>

3. Li-Hua Chen, Chang-Chieh Huang, Hsing-Lung Lien. Bimetallic iron-aluminum particles for dechlorination of carbon tetrachloride // Chemosphere. – Volume 73, Issue 5, October 2008, P. 692-697.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.07.005>

4. Li, G.Y.; Jiang, W.M.; Yang, W.C. New insights into the characterization and formation of the interface of A356/AZ91D bimetallic composites fabricated by compound casting // Metall. Mater. Trans. A. 2019, 50. – P. 1076–1090.

5. Tayyiba R., Saleem M. Q., Mufti N. A., Noman A., M. Kashif I. and Maham N. Pressure-Assisted Development and Characterization of Al-Fe Interface for Bimetallic Composite Castings: An Experimental and Statistical Investigation for a Low-Pressure Regime // Metals 2021, 11, 1687. <https://doi.org/10.3390/met11111687>

6. Y.B. Choi, K. Matsugi and G. Sasaki. Development of intermetallic compounds reinforced Al alloy composites using reaction of porous nickel and aluminum // Materials Transactions, Vol. 54, No.4 (2013), pp. 595–598 DOI:[10.2320/matertrans.MBW201214](https://doi.org/10.2320/matertrans.MBW201214)

7. Dobranski L.A., Dobranska-Danikiewicz A.D., Gawel T.G., Achtelec-Franczak A. Selective laser sintering and melting of pristine titanium and titanium Ti6Al4V alloy powders and selection of chemical environment for etching of such materials. Archives of Metallurgy and Materials. 2015; 60: pp. 2039–2045. DOI: [10.1515/amm-2015-0346](https://doi.org/10.1515/amm-2015-0346)