

## *Виготовлення шаруватого метал-інтерметалідного армованого композиційного матеріалу*

І. М. Гурія, кандидат технічних наук, доцент

Я. О. Смірнова, [yana.luschay@gmail.com](mailto:yana.luschay@gmail.com)

П. І. Лобода, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України

Є. В. Солодкий, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

*Серед композитів системи Ti-Al метал-інтерметалідні шаруваті композиційні матеріали (MIL – metallic-intermetallic laminate) є одними з найбільш поширених, завдяки поєднанню крихкої інтерметалідної фази з пластичною металевою матрицею, яка залишається неушкодженою і стримує тріщини після початку їх росту. Переважна більшість методів виготовлення MIL є досить складними, тому актуальними є розвиток рідкофазних технологій, які забезпечили б зниження трудомісткості процесу. Представлено розроблену технологію виготовлення метал-інтерметалідного композиційного матеріалу системи (Ti-TiB)-Al, яка полягає у зануренні та витримуванні пакету (Ti-TiB)-алюмінієва фольга-(Ti-TiB) у розплаві алюмінію. Встановлено, що використання фольги у технологічному процесі забезпечує довільне просочення розплаву алюмінію без надлишкового тиску. У результаті взаємодії рідкого алюмінію та твердого композиту Ti-TiB утворюється рівномірний перехідний шар з алюмінідів титану. З усіх відомих інтерметалідів системи Ti-Al рентгеноструктурний аналіз підтверджує наявність у композиті фази Al<sub>3</sub>Ti. Визначена мікротвердість перехідного інтерметалідного шару та Ti-TiB дозволяє прогнозувати підвищення механічних властивостей виготовленого композиту, що робить застосування описаного технологічного процесу перспективним для виробництва шаруватих композиційних матеріалів системи (Ti-TiB)-Al.*

**Ключові слова:** композиційні матеріали, інтерметалідна фаза, матриця, алюмінієва фольга, перехідний шар.

Серед матеріалів матриць для металевих композитів лідируючі позиції належать алюмінію, нікелю та тугоплавким металам, в тому числі титану [1]. Існує значна кількість методів виготовлення композиційних матеріалів систем Ni-Al, Nb-Al, Ti-Cu, Ti-Al [2, 3], у яких присутні інтерметаліди з високими твердістю, тепловою та корозійною стійкістю. Серед усіх інтерметалідів, що можуть утворюватися у згаданих системах, Al<sub>3</sub>Ti є одним з найпривабливіших при створенні композиційних матеріалів завдяки своїм високим механічним властивостям [3], однак, він є відносно крихким. Одним з найефективніших методів виправлення цього недоліку є

поєднання крихкої армуючої фази з пластичною матрицею, яка залишається неушкодженою і стримує розвиток тріщини після початку їх росту [3, 4]. Саме це поєднання зумовлює перевагу метал-інтерметалідних композиційних матеріалів (MIL – metallic-intermetallic laminate) – одного з найбільш поширених класів серед композитів системи титан-алюміній. Можливість регулювати фізичні та механічні властивості за рахунок товщини шару кожної структурної складової робить цей клас матеріалів привабливим як для серійного виробництва композитів, так і для одиничних виробів [5].

Незважаючи на переваги та поширеність MIL системи титан-алюміній, їх виготовлення залишається досить складним. Відомі методи виготовлення матеріалів зварюванням вибухом [3, 6] та прокатуванням [7] пакетів пластин з подальшим термічним обробленням. Головними їх недоліками даних методів є велика трудомісткість, використання складного обладнання, наявність спеціальних полігонів та неможливість отримувати вироби складної геометричної форми без додаткового оброблення.

Крім вищезазначених існують рідкофазні методи отримання шаруватих композиційних матеріалів [8], де простір між титановими пластинами заповнюється рідким алюмінієм, що значно спрощує технологічний процес та не обмежує вироби за формою. Окрім того, у попередніх роботах колективом авторів [9] було встановлено, що виготовлення шаруватих композиційних матеріалів шляхом витримування пластин Ti-TiB у алюмінієвому розплаві є перспективним. Тому, метою роботи є розроблення рідкофазної технології виготовлення шаруватого метал-інтерметалідного композиційного матеріалу системи (Ti-TiB)-Al.

У роботі використовували алюміній (чистота 99 %), пластини композиту Ti-TiB (розміри 18x14x3 мм), виготовлені електронно-променевим переплавленням з наступним прокатуванням та алюмінієву фольгу (чистота 99,8 %). Для проведення дослідів складали пакет (Ti-TiB)

– алюмінієва фольга – (Ti-TiB). Нагрів пакетів проводили у печі опору за температури 730...750 °C протягом 15 хвилин з наступним охолодженням на повітрі. Схематичне зображення процесу виготовлення композиційного матеріалу наведено на рис. 1.

Мікроструктуру одержаних зразків вивчали на скануючому електронному мікроскопі «РЕМ-106И» з енергодисперсійним аналізатором хімічного складу. Фазовий склад досліджували шляхом використання дифрактометра Rigaku Ultima-IV з Cu-випромінення. Мікротвердість зразків визначали за методом Віккерса на приладі ПМТ-3 з навантаженням  $F=0,5$  Н та часом витримування зразка під навантаженням 10.

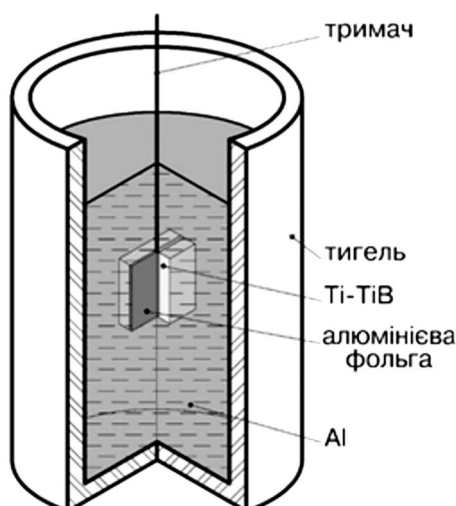


Рис. 1. Схематичне зображення процесу виготовлення композиційного матеріалу.

## Нові технологічні процеси і матеріали

Металографічними дослідженнями (рис. 2) встановлено, що фольга повністю розплавляється при витримуванні і забезпечує довільне, без надлишкового тиску, просочення розплаву між пластинами, про що свідчить утворений алюмінієвий шар середньою товщиною 380...390 мкм. У результаті взаємодії рідкого алюмінію та твердого композиту Ti-TiB на межі їх взаємодії утворюється рівномірний перехідний шар товщиною 50...70 мкм.

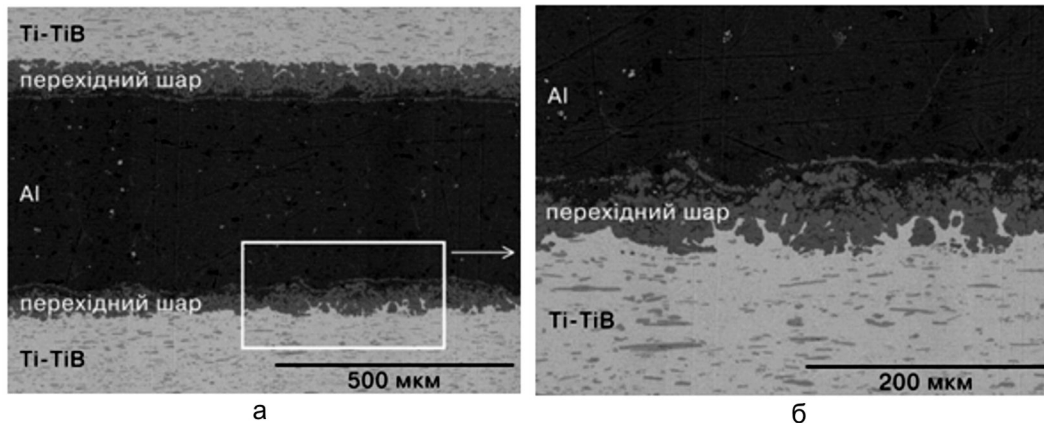
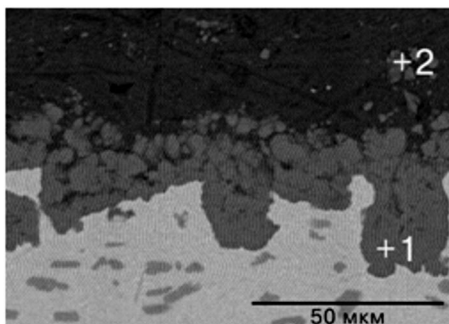


Рис. 2. Структура межі взаємодії зразка при різному збільшенні.



%(мас.)	1	2
Al	64,66	55,35
Ti	35,34	44,65

Рис. 3. Мікрорентгеноспектральний аналіз у точках на межі взаємодії (Ti-TiB)-Al.

складає 4.1, 4.7 та 0.3 ГПа відповідно (рис. 4). Отримані значення мікротвердості для перехідного інтерметалідного шару та алюмінію корелюються з роботою [3]. Отримані значення для пластин Ti-TiB вдвічі більші

Мікрорентгеноспектральним аналізом у точках (рис. 3) встановлено, що перехідний шар сформований з алюмінідів титану. З усіх відомих інтерметалідів системи Ti-Al рентгеноструктурний аналіз підтверджує наявність у композиті лише фази  $Al_3Ti$ .

У ході проведеного дослідження було визначено мікротвердість для Ti-TiB, перехідного інтерметалідного шару та алюмінію, яка в середньому

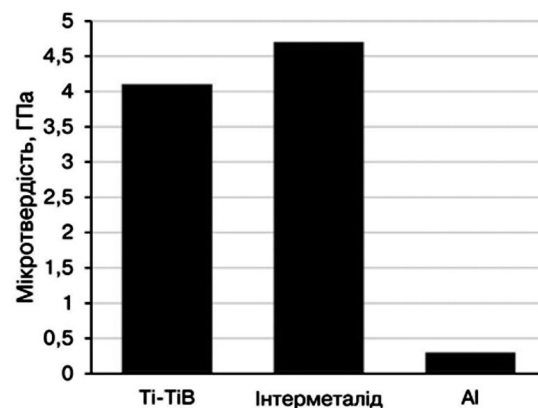


Рис. 4. Мікротвердість за Віккерсом HV шарів Ti-TiB, інтерметаліду та алюмінію.

порівняно з чистим титаном (2 ГПа [3]). Виходячи з отриманих значень мікромеханічних властивостей можна прогнозувати, що використання пластин Ti-TiB замість чистого титану позитивно впливатиме на механічні властивості отриманого композиту.

Таким чином, представлена технологія з використанням фольги дозволяє отримати шаруватий композит системи (Ti-TiB)-Al шляхом вільного просочення розплаву алюмінію без надлишкового тиску. Наявність у композиційному матеріалі шарів з високою мікротвердістю дозволяє прогнозувати підвищення його механічних властивостей, що робить застосування описаного технологічного процесу перспективним для виготовлення шаруватих композиційних матеріалів системи (Ti-TiB)-Al.

### Література

1. Metal Matrix Composite (MMC) Market Analysis By Product (Aluminum, Nickel, Refractory) By End-use (Ground Transportation, Electronics/Thermal Management, Aerospace) And Segment Forecasts To 2022. – [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metal-matrix-composites-mmc-market>.
2. Han Y., Jiang F., Lin C., Yuan D., Huang H., Wang E. et al. Microstructure and mechanical properties of continuous ceramic SiC and shape memory alloy NiTi hybrid fibers reinforced Ti-Al metal-intermetallic laminated composite // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 729, № 30. – P. 1145-1155. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.267>.
3. Bataev I.A., Bataev A.A., Mali V.I., Pavliukova D.V. Structural and mechanical properties of metallic-intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing // *Materials and Design*. – 2012. – № 35. – P. 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.030>.
4. Peng L.M., Wang J.H., Li H., Zhao J.H., He L.H. Synthesis and microstructural characterization of Ti-Al<sub>3</sub>Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites // *Scripta Materialia*. – 2005. – Vol. 52, № 3. – P. 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.09.010>.
5. Vecchio K.S. Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites // *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. – 2005. – Vol. 57, № 3. – P. 25-31. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0229-4>.
6. Boronski D., Kotyk M., Mackowiak P. Fracture Toughness of Explosively Welded Al/Ti Layered Material in Cryogenic Conditions // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 2. – P. 3764-3771. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.468>.
7. Sun Y., Zhao Y., Zhang D., Liu C., Diao H., Ma C. Multilayered Ti-Al intermetallic sheets fabricated by cold rolling and annealing of titanium and aluminum foils // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2011. – Vol. 21, № 8. – P. 1722-1727. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60921-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60921-7).
8. Ковтунов А.И., Мямин С.В. Исследование технологических и механических свойств слоистых титаноалюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом // *Авиационные материалы и технологии*. – 2013. – № 1(26). – С. 9-12.
9. Смірнова Я.О., Солодкий Є.В., Гурія І.М., Лобода П.І. Кінетика формування перехідного шару при взаємодії Ti-TiB з рідким алюмінієм // *Наукові вісті КНУ*. – 2019. – № 2. – С. 71-77. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.2.167784>.

References

1. Metal Matrix Composite (MMC) Market Analysis By Product (Aluminum, Nickel, Refractory) By End-use (Ground Transportation, Electronics/Thermal Management, Aerospace) And Segment Forecasts To 2022. (2015) [in English]. Retrieved from <https://www.businesswire.com/news/home/20160217006010/en/Metal-Matrix-Composite-MMC-Market-Analysis-Product>.
2. Han, Y., Jiang, F., Lin, C., Yuan, D., Huang, H., Wang, E., et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, Vol. 729, No. 30, pp. 1145-1155 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.267>.
3. Bataev, I.A., Bataev, A.A., Mali, V.I., Pavliukova, D.V., *Materials and Design*, 2012, No. 35, pp. 225-234 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.030>.
4. Peng, L.M., Wang, J.H., Li, H., Zhao, J.H., He, L.H., *Scripta Materialia*, 2005, Vol. 52, No. 3, 243-248 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.09.010>.
5. Vecchio, K.S., *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2005, Vol. 57, No. 3, pp. 25-31 [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0229-4>.
6. Boronski, D., Kotyk, M., Mackowiak, P., *Procedia Structural Integrity*, 2016, Vol. 2, pp. 3764-3771 [in English]. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.468>.
7. Sun, Y., Zhao, Y., Zhang, D., Liu, C., Diao, H., Ma, C., *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, Vol. 21, No 8, pp. 1722-1727 [in English]. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60921-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60921-7).
8. Kovtunov, A.I., Myamin, S.V., *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2013, No. 1 (26), pp. 9-12, [in Russian].
9. Smirnova, Y.O., Solodkyi, I.V., Guriya, I.M., Loboda, P.I. *Naukovi visti KPI*, 2019, No 2, pp. 71-77 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.2.167784>.

Одержано 02.12.19

И. М. Гурия, Я. А. Смирнова, П. И. Лобода, Е. В. Солодкий

**Изготовление слоистого метал-интерметаллидного армированного композиционного материала**

**Резюме**

Среди известных композитов системы Ti-Al металл-интерметаллидные слоистые композиционные материалы (MIL – metallic-intermetallic laminate) являются одними из наиболее распространенных, благодаря сочетанию хрупкой интерметаллидной фазы с пластичной металлической матрицей, которая остается невредимой и сдерживает трещины после начала их роста. Подавляющее большинство методов изготовления MIL являются достаточно сложными, по этому развитие жидкофазных технологий, которые обеспечили бы снижение трудоемкости процесса является актуальным. В работе представлена разработанная технология изготовления метал-интерметаллидного композиционного материала системы (Ti-TiB)-Al, которая заключается в погружении и выдержке пакета (Ti-TiB)-алюминиевая фольга-(Ti-TiB) в расплаве алюминия. Установлено, что использование фольги в технологическом процессе обеспечивает произвольное просачивание расплава алюминия без избыточного давления, о чем свидетельствует наличие образующегося алюминиевого слоя. В результате взаимодействия жидкого алюминия и твердого композита Ti-TiB образовался равномерный переходный слой,

сформированный из алюминидов титана. Из всех известных интерметаллидов системы Ti-Al рентгеноструктурный анализ подтверждает наличие в композите фазы  $Al_3Ti$ . [in English]. Микротвердость переходного интерметаллидного слоя и Ti-TiB позволяет прогнозировать повышение механических свойств изготовленного композита, что делает применение описанного технологического процесса перспективным для производства слоистых композиционных материалов системы (Ti-TiB)-Al.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, интерметаллидная фаза, матрица, алюминиевая фольга, переходный слой.

I. M. Huriia, Y. O. Smirnova, P. I. Loboda, I. V. Solodkyi

**Fabrication of laminated metal-intermetallic reinforced composite material**

**Summary**

Metallic-intermetallic laminate (MIL) are the one of the most common among the composites of Ti-Al system due the combination of brittle intermetallic phase and plastic metal matrix, which remains intact and holds back the cracks after they start. The great majority of MIL manufacturing methods are complicated, so development of rare-phase technologies that would reduce the labour intensity of the process is relevant. This paper presents developed technology of manufacturing metallic-intermetallic composite material of (Ti-TiB)-Al system, which consists in immersion and holding of package (Ti-TiB)-aluminum foil-(Ti-TiB) in aluminum melt. It was found that the use of foil in the technological process provides infiltration of aluminum melt without added pressure as evidenced by the presence of aluminum layer. As a result of the interaction of liquid aluminum and the solid Ti-TiB composite, a titanium aluminides uniform transition layer was formed. Of all known intermetallics of the Ti-Al system, X-ray analysis confirms the presence of  $Al_3Ti$  phase in the composite. Determined microhardness of the transition intermetallic layer and Ti-TiB allows to predict the increase of mechanical properties of producing composite. It makes the application of the described technological process perspective for the production of layered composite materials of (Ti-TiB)-Al system.

**Keywords:** composite materials, intermetallic phase, matrix, aluminum foil, transition layer.