

DOI 10.32820/2079-1747-2019-23-49-57

УДК 620.18

**ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНО-АЛЮМІНІЄВИХ КОМПОЗИТИВ**

©Сичов Ю. І., Дереза К.О.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про автора:**

**Сичов Юрій Іванович:** ORCID: 0000-0002-6576-8083; [shanhaj\\_2007@ukr.net](mailto:shanhaj_2007@ukr.net); кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування та транспорту; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Дереза Кирило Олексійович:** ORCID: 0000-0001-7965-8371; [scirill@gmail.com](mailto:scirill@gmail.com); студент факультету Комп'ютерних і інтегрованих технологій в виробництві та освіті; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті показано аналіз композитних матеріалів та технологія їх одержання, металографічні особливості формування композиційних сполук з алюмінієвих сплавів. Наведені результати дослідження впливу деформаційних і термічних впливів на властивості композита ОТ4–АД1–АмГ6, вплив температурно-тимчасових факторів на кінетику дифузійної взаємодії титану з розплавом алюмінію в шаруватих матеріалах ВТ1-0–АД1 і ВТ1-0–АД1–ВТ1-0, конструктивні схеми й комплексна технологія одержання титано-алюмінієвих шаруватих інтерметалідних композитів.

**Ключові слова:** алюміній, титан, композити, інтерметаліди, структура.

**Сычев Ю. И., Дереза К. А.** «Формирование структуры и механических свойств сварных соединений титано-алюминиевых композитов».

В статье показано анализ композитных материалов и технология их получения, металлографические особенности формирования композиционных соединений из алюминиевых сплавов. Приведены результаты исследования влияния деформационных и термических воздействий на свойства композита ОТ4–АД1–АмГ6, влияние температурно-временных факторов на кинетику диффузионной взаимодействия титана с расплавом алюминия в слоистых материалах ВТ1-0–АД1 и ВТ1-0–АД1–ВТ1-0, конструктивные схемы и комплексная технология получения титано-алюминиевых слоистых интерметаллидных композитов.

**Ключевые слова:** алюминий, титан, композиты, интерметаллиды, структура.

**Sychev Yu., Dereza K.** «Formation of structure and mechanical properties of welded joints of titanium-aluminum composites».

The article shows that the structure that formed as a result of the liquid-phase diffusion of the layer is dispersed intermetallic inclusions of TiAl<sub>3</sub> in the matrix of aluminum-based solid solution. It is shown that the process of diffusion interaction of titanium with liquid aluminum consists of three stages: "initial stage" - low active growth of intermetallic interlayers at the Ti-Al interface; "Growth stage" - intensive formation of dispersed intermetallic TiAl<sub>3</sub> particles as a result of reaction at the border with titanium and the growth of an intermetallic layer with a constant for a given temperature TiAl<sub>3</sub> content; "Saturation stage" - an increase in the volume content of the TiAl<sub>3</sub> phase in the intermetallic layer.

The article presents the analysis of composite materials and the technology of their production, metallographic features of the formation of composite compounds from aluminum alloys. The results of the study of the influence of deformation and thermal effects on the properties of the composite OT4 – AD1-AMg6, the influence of temperature-time factors on the kinetics of the diffusion interaction of titanium with aluminum melt in layered materials VT1-0 –AD1 and VT1-0 - AD1-0, design schemes and complex technology for producing titanium-aluminum layered intermetallic composites.

It was found that the structure formed as a result of liquid phase diffusion of the layer is the disperse intermetallic inclusion of TiAl<sub>3</sub> in the matrix from a solid solution based on aluminum. It is shown that the process of diffusion interaction of titanium with liquid aluminum consists of three stages: the initial stage - the low-active growth of the intermetallic layer at the boundary of Ti-Al; stage growth - intense formation of disperse intermetallic particles TiAl<sub>3</sub> as a result of reaction on the boundary with titanium and growth of intermetallic layer with constant, for this temperature, content of TiAl<sub>3</sub>; the saturation stage is an increase in the volume content of the TiAl<sub>3</sub> phase in the intermetallic layer.

**Keywords:** titanium, composites, intermetallic compounds, structure.

**Актуальність.** Актуальним напрямом у сучасному матеріалознавстві є створення жароміцних матеріалів з підвищеними службовими властивостями – шаруватих інтерметалідних композитів (ШК), у яких інтерметаліди відіграють роль зміцнюючого компонента.

**Ціль роботи.** Розробка методів одержання титано-алюмінієвих шаруватих металевих і інтерметалідних композитів (ШМК і ШК) на базі визначення закономірностей формування структурно-механічної неоднорідності з обліком температурно-тимчасових і деформаційних факторів.

**Виклад основного матеріалу.**

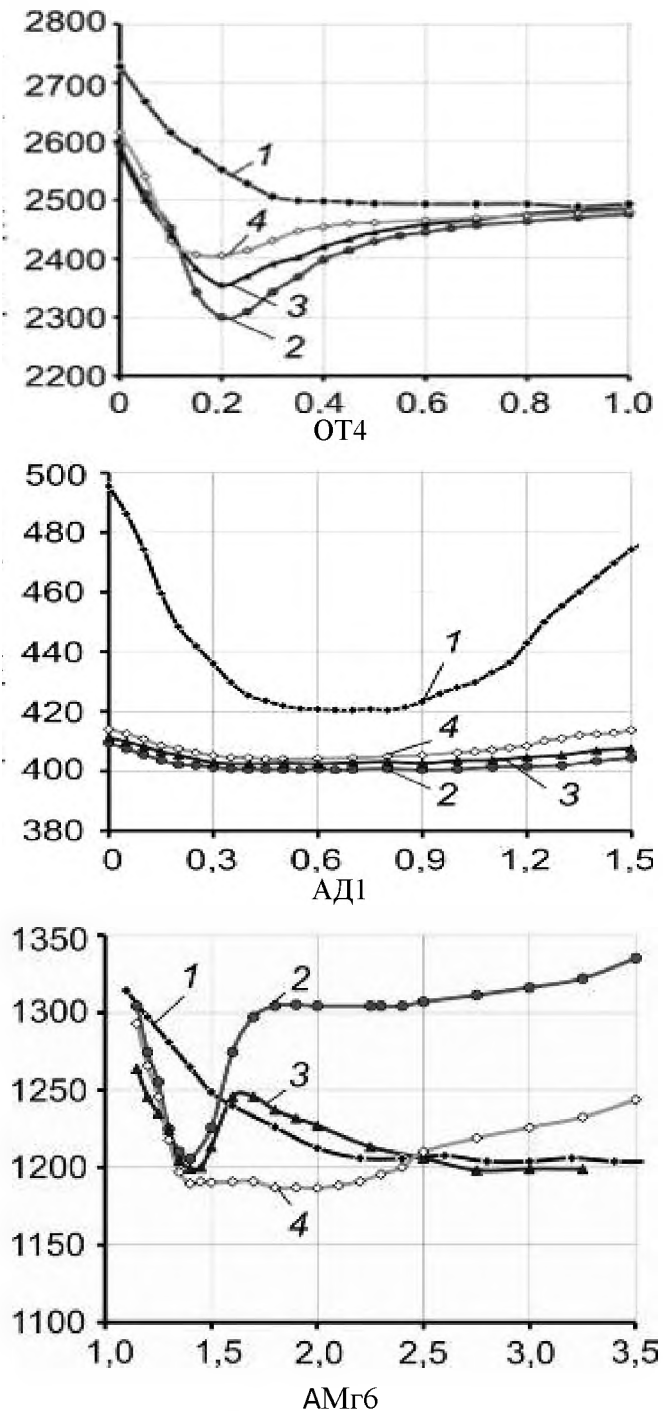
Деформування зразків КМ ОТ4-АД1-Амг6 здійснювали на універсальній гідравлічній машині УММ-10 за трьохточковою або консольною схемою з реалізацією на границі з'єднання ОТ4-АД1 поздовжніх деформацій розтягання або стиску. Розподіл залишкової поздовжньої деформації  $\delta$  розраховували за результатами виміру параметрів прямокутної координатної сітки, що була попередньо нанесена на поліровану бічну грань зразків.

Металографічні дослідження композиційних титано-алюмінієвих зразків виконували на модульному моторизованому оптичному мікроскопі Olympus VX-61 із цифровою фіксацією мікроструктур компонентів композитних матеріалів (КМ) при збільшеннях 50-1000 разів. Вимірювання параметрів структури досліджуваних КМ здійснювали шляхом обробки цифрових фотографій на з використанням програми «AnalySIS» фірми Soft Imaging System GmbH.

Мікромеханічні властивості досліджуваних композитів після термосилових впливів оцінювали за результатами вимірювання мікротвердості за ДСТ 9450-76 на мікротвердомірі ПМТ-3.

Рентгеноструктурні дослідження проводили на універсальному дифрактометрі ДРОН-3 у характеристичному випромінюванні з використанням Ni-Фільтра для виключення випромінювання. Параметри тонкої структури компонентів титано-алюмінієвого композита ОТ4-

АД1-АмГ6 вивчали після зварювання вибухом, вигину з різною величиною деформації, а також після термообробки деформованих зразків. Дифузійні процеси досліджували в умовах твердофазної взаємодії титану та алюмінію в КМ ОТ4-АД1-АмГ6 при температурах 560, 590 і 630 °С та рідкофазного (з розплавленням алюмінію) при нагріванні композитів ОТ1-0 – АД1 і ВТ1-0 – АД1 – ВТ1-0 до 675, 700 і 750°С.



**Рис. 1** – Зміна мікротвердості зварного композита ОТ4-АД1-АмГ6

Результати дослідження впливу деформаційних і термічних впливів на властивості композита ОТ4 – АД1-АмГ6. Максимальна величина реалізованих деформацій стиску зони з'єднання ОТ4-АД1 становила 1,7 %, деформацій розтягання – 17,5 %. У ході експериментів на прикладі титано-алюмінієвого композита ОТ4-АД1-АмГ6 показано, що при деформуванні шаруватих КМ із компонентами, що різко різняться за властивостями, формування зон, що розтягуються і стискаються пластичними деформаціями у матеріалі, значно відрізняється від аналогічного при деформуванні монометалів і залежить від співвідношення механічних характеристик і товщин шарів КМ.

Розподіл мікротвердості за товщиною шарів композита після зварювання вибухом мало традиційний характер з її підвищенням у міру наближення до зони біля шва (ЗБШ), де зміцнення становило в сплаві ОТ4 – 12%, алюмінії АД1 – 20%, сплаві АмГ6 – 7% у порівнянні із середньою твердістю за товщиною відповідних шарів (рис. 1 крива 1).

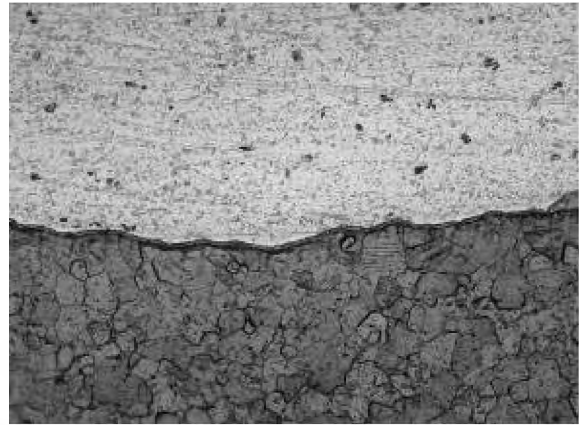
Деформація вигину композиційних зразків призвела, в основному, до підвищення й перерозподілу рівня мікротвердості компонентів КМ, вносячи додаткову механічну неоднорідність до уже існуючої у композиті після зварювання вибухом у вигляді зміцнених колошовних зон.

Однак вигин з реалізацією деформації стиску колошовної зони до 2 % з наступним розгинанням до вихідного стану призводив до локального знеміцнення ЗБШ, що максимально проявляється на відстані близько 0,2 мм від границь з'єднання (рис.1). Величина знеміцнення становила в сплаві ОТ4 – 5-8 %, в алюмінії – 10-15 % і в сплаві АМг6 – 5-6 % у порівнянні з вихідною твердістю після зварювання вибухом. Явище локального знеміцнення ЗБШ у досліджуваній композиції, виявлене раніше при вигині і розтяганні титано-сталевих і прокатці титано-алюмінієвих шаруватих металевих композитів, необхідно враховувати при розрахунку міцності композиційних вузлів і конструкцій. Нагрівання титано-алюмінієвого композита ОТ4-АД1-АМг6 до 560 °С у продовж 2 і 3 годин вплинув на його мікроемеханічні властивості: так мікротвердість алюмінію АД1 і сплаву АМг6 знизилася на 30-50 % – до рівня твердості цих сплавів у відпаленому стані, у той час як у титановому сплаві ВІД4 зниження твердості відбулося на 8-10 %. Результати рентгеноструктурних досліджень звареного вибухом і деформованого титано-алюмінієвого композита показали, що найбільші зміни параметрів тонкої структури після зварювання вибухом і деформування вигином у зоні мінімальної ( $\delta$  до 0,5 %) і максимальної деформації ( $\delta$  від 15 до 29 %), спостерігалися в колошовних зонах титанового сплаву АД4 і алюмінії АД1 на відстані до 0,5 мм від границі з'єднання ОТ4-АД1. Фізичне розширення дифракційних ліній кристалічних ґраток ОТ4 і алюмінії АД1 обумовлені мікронапруженнями II роду. Нагрівання деформованих зразків при 560 °С призвело до значного зниження мікродеформацій осередків кристалічних ґраток сплаву ОТ4 (в 3-5 разів) і алюмінію АД1 (практично до нуля).

Вплив температурно-тимчасових факторів на утворення та зростання інтерметалідного прошарку на границі Ti-Al в умовах твердофазної дифузії досліджували при нагріві композита ОТ4-АД1-АМг6 до температур 560, 590 і 630 °С. Ріст суцільного інтерметалідного шару на границі Ti-Al (рис.2) відбувався відносно повільно, а максимальна його товщина становила в середньому 2,5, 3,5 і 14 мкм після нагрівання протягом 16 годин при 560, 590 і 630 °С, відповідно (рис. 3). Встановлено, що реалізована при вигині композита пластична деформація  $\delta$  зони з'єднання ОТ4-АД1 величиною від -1,7 до +17,5 %, практично не впливає на кінетику зародження й росту інтерметалідного прошарку в процесі високотемпературних нагрівів. Побудовано температурно-тимчасову залежність утворення інтерметалідів у титано-алюмінієвих з'єднаннях (рис. 4) з урахуванням їх впливу на показники міцності зварного композитного матеріалу (ЗКМ). На графіку виділені три області: безпечні нагрів, при яких інтерметаліди не утворюються, припустимі нагрів з товщиною інтерметалідного прошарку до 2 мкм, що не призводить до зниження міцності з'єднаних шарів, і небезпечні нагрів, при яких товщина інтерметалідів перевищує припустиму величину 2 мкм, що значно знижує показники міцності титано-алюмінієвих з'єднань. Узагальнення результатів досліджень твердофазної дифузії показало, що низька швидкість росту інтерметалідів у титано-алюмінієвих композитах не дозволяє ефективно застосовувати існуючі комплексні технології для одержання титано-алюмінієвих зварних інтерметалідних композитів (ЗІК), з об'ємним вмістом інтерметалідів до 20 - 60 %. Для рішення цього завдання була розроблена нова комплексна технологія одержання титано-алюмінієвих ЗІК з необхідним об'ємним вмістом інтерметалідів, яка передбачає здійснення термообробки титано-алюмінієвих ЗКМ, що формує інтерметалідні шари в умовах рідкофазної дифузійної взаємодії титану і алюмінію.



1 година



2 години

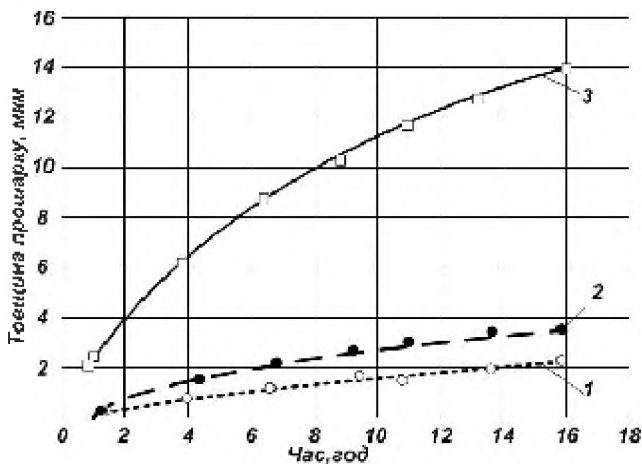


4 години

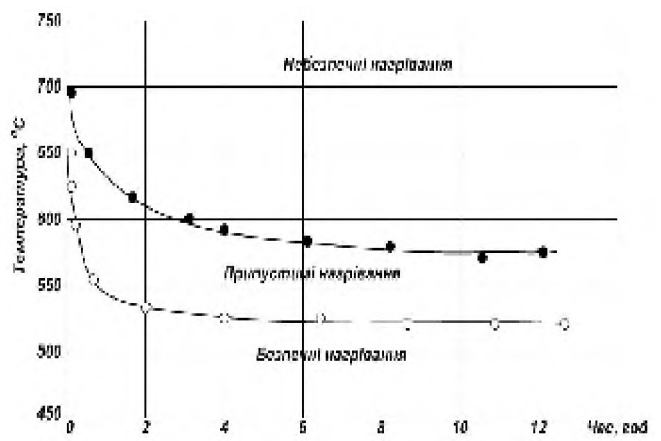


8 годин

**Рис. 2** – Суцільний інтерметалідний прошарок  $TiAl_3$  на границі з'єднання ОТ4 – АД1 після відпалу при 630 °С ( $\times 500$ )



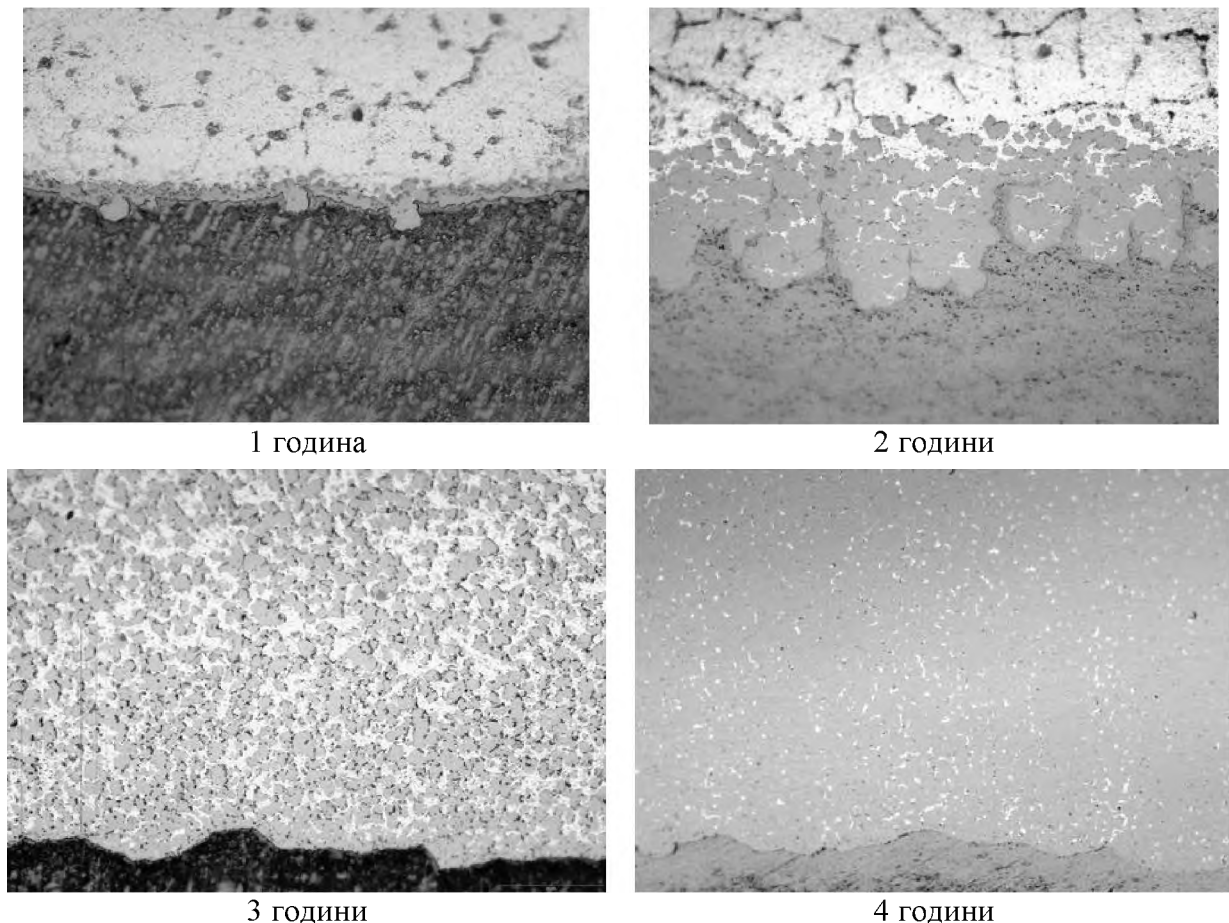
**Рис. 3** – Залежність зміни періоду утворення інтерметалідного прошарку від часу відпалу



**Рис. 4** – Температурно-годинна залежність утворення інтерметалідів в титано-алюмінієвих ЗКМ

Встановлені закономірності процесу формування структури дифузійного шару (рис. 5), що полягає в зародженні в зоні контакту металів тонкого інтерметалідного прошарку, що після певного періоду починає активно проникати вглиб титану, розчиняючи його поверхневий шар з виділенням дисперсних інтерметалідних часток  $TiAl_3$  у розплав. Частки  $TiAl_3$ , що

виділяються, формують дифузійний шар, який за рахунок поступового збільшення своєї товщини заповнює весь обсяг розплавленого алюмінію. Після його заповнення одночасно триває ріст товщини дифузійного шару (за рахунок розчинення титану) і відбувається збільшення вмісту в ньому інтерметаліда  $V_{об}$  до повного зникнення алюмінієвої фази.



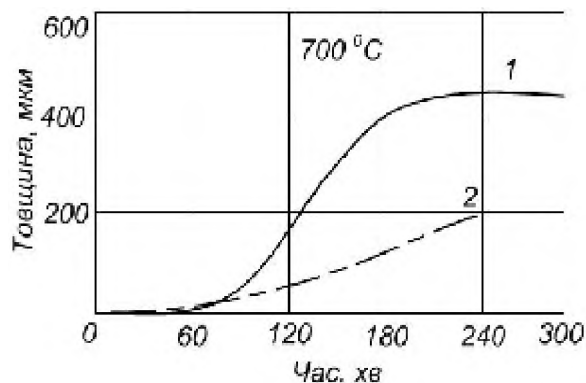
**Рис. 5** – Структура композита ВТ1-0-АД1 після відпалу при 700 °С ( $\times 500$ )

У процесі формування дифузійного шару при рідкофазній взаємодії титану і алюмінію можна виділити три етапи (рис. 6): «початкова стадія» - малоактивний ріст інтерметалідного прошарку на границі Ti-Al; «стадія росту» - інтенсивне збільшення товщини дифузійного шару з постійним для даної температури вмістом дисперсних часток інтерметаліда  $TiAl_3$ ; «стадія насичення» - збільшення об'ємного вмісту фази  $TiAl_3$  у дифузійному шарі.

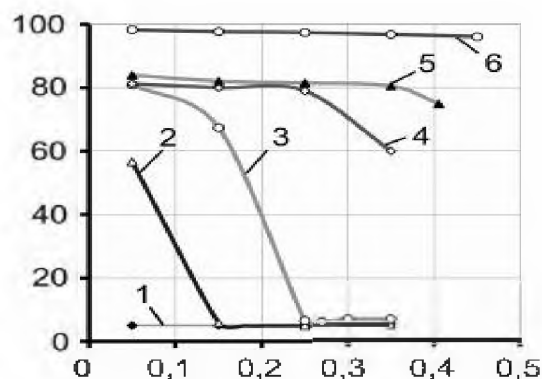
Встановлено, що в результаті взаємодії титану з розплавом алюмінію формуються дифузійні шари, товщини яких на один-два порядки перевищують товщини інтерметалідних прошарків при твердофазній дифузії. Структура дифузійного шару матрична на базі твердого розчину на основі алюмінію з дисперсними інтерметалідними включеннями. Рентгенофазовий аналіз показав, що дисперсна фаза, яка виникає на всіх стадіях рідкофазної дифузійної взаємодії титану та алюмінію при температурах 675, 700 і 750 °С, є інтерметалідом  $TiAl_3$ .

Зміна об'ємного вмісту інтерметалідної фази в дифузійному шарі в процесі відпалу при різних температурах показана на рис. 7. В «початковій стадії» помітних змін вмісту інте-

рметалідів у розплаві не відбувалося; в «стадії росту» спостерігалось поступове збільшення вмісту фази  $TiAl_3$  в алюмінії до постійної для кожної температури нагрівання величини: 80, 60 і 50 % при 675, 700 і 750 °С, відповідно; в «стадії насичення» вміст інтерметалідів збільшувався одночасно в повному обсязі дифузійного шару.



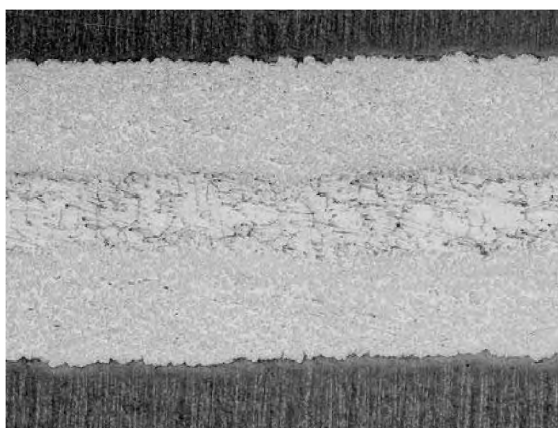
**Рис. 6** – Кінетика росту інтерметалідного шару та розчинення титану при різних температурах



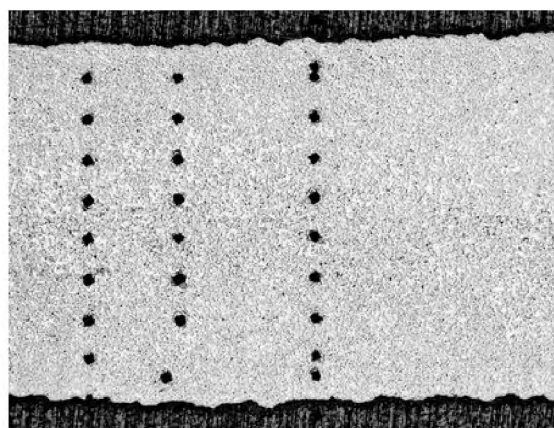
**Рис. 7** – Зміна об'ємного вмісту інтерметалідних включень  $V_{об}$  за товщиною дифузійного шару

На прикладі тришарового композита ОТ1-0-АД1-ВТ1-0 показано (рис. 8), що процес формування і параметри дифузійних шарів на кожній із границь з'єднання багат шарових титано-алюмінієвих КМ практично однакові й не залежать від кількості вихідних шарів і їхньої просторової орієнтації.

Вимірювання мікротвердості показали (рис. 9), що істотні зміни мікромеханічних характеристик інтерметалідного шару відбуваються при об'ємному вмісті  $V_{об}$  дисперсних часток  $TiAl_3$  в алюмінієвій матриці понад 40-50 %.



а



б

**Рис. 8** – Структура композита ВТ1-0-АД1-ВТ1-0 після відпалу при 700 °С ( $\times 500$ ) протягом: а – 2 год, б – 3 год

Результати дослідження кінетики процесів рідкофазної дифузійної взаємодії в титано-алюмінієвих ЗКМ і властивостей одержуваних інтерметалідних композитів показали доцільність застосування комплексних технологій з термічною обробкою при температурах вище

температури плавлення алюмінію для одержання шаруватих інтерметалідних композитів з об'ємним вмістом інтерметалідної фази до 20 – 60 %.

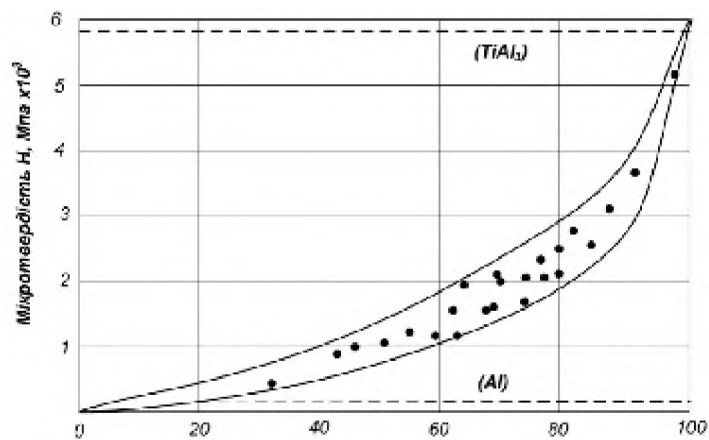


Рис. 9 – Зміна мікротвердості дифузійного шару залежно від вмісту  $TiAl_3$

На базі проведених досліджень розроблені композити із шарів титану, що забезпечують міцність і пластичність при нормальних температурах, та інтерметаліда  $TiAl_3$ – зміцнюючого компонента, що підвищує жароміцність (рис. 10).



Рис. 10 – Схема комплексного технологічного процесу виготовлення титано-алюмінієвих шаруватих інтерметалідних композитів

Розроблена комплексна технологія включає зварювання шаруватих композитів, обробку тиском і високотемпературну обробку. Операція зварювання шарів може виконуватися шляхом спільної прокатки або за допомогою енергії вибуху.



**Висновки.**

Виявлено, структура що сформувалась в результаті рідкофазної дифузії шару являє собою дисперсні інтерметалідні включення TiAl<sub>3</sub> у матриці із твердого розчину на основі алюмінію. Показано, що процес дифузійної взаємодії титану з рідким алюмінієм складається із трьох етапів: «початкова стадія» - малоактивний ріст інтерметалідного прошарку на границі Ti-Al; «стадія росту» - інтенсивне утворення дисперсних інтерметалідних часток TiAl<sub>3</sub> у результаті реакції на границі з титаном і ріст інтерметалідного шару з постійним, для даної температури, змістом TiAl<sub>3</sub>; «стадія насичення» - збільшення об'ємного змісту фази TiAl<sub>3</sub> в інтерметалідному шарі.

**Список использованных источников:**

1. Влияние деформации изгиба на кинетику диффузии в сваренном взрывом композите OT4–AD1–AMг6 / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, А. Н. Жоров [и др.] // *Перспективные материалы*. – 2003. – № 6. – С. 76-80.
2. Особенности деформирования и кинетика диффузии в сваренном взрывом титано-алюминиевом композите / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, А. Н. Жоров [и др.] // *Физика и химия обработки материалов*. – 2004. – № 3. – С. 50-54.
3. Трыков Ю. П. Диффузионные процессы в сваренных взрывом титано-алюминиевых соединениях / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, А. Н. Жоров // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2005. – № 2. – С. 19-23.
4. Elmarakbi A. *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness* / A. Elmarakbi. – Delhi : John Wiley & Sons, 2014. – 470 p.
5. *Advanced Composite Materials* / Ed. by Ashutosh Tiwari, Moha mmad Rabia Alenezi, Seong Chan Jun. – New Delhi : Scrivener Publishing LLC, 2016. – 480 p.

**References**

1. Trykov, JuP, Gurevich, LM, Zhorov, AN et al. 2003, 'Vlijanie deformacii izgiba na kinetiku diffuzii v svarennom vzryvom kompozite OT4–AD1–AMg6', *Perspektivnye materialy*, no. 6, pp. 76-80.
2. Trykov, JuP, Gurevich, LM, Zhorov, AN et al. 2004, 'Osobennosti deformirovaniya i kinetika diffuzii v svarennom vzryvom titano-aljuminievom kompozite', *Fizika i himija obrabotki materialov*, no. 3, pp. 50-54.
3. Trykov, JuP, Gurevich, LM & Zhorov, AN 2005, 'Diffuzionnye processy v svarennyh vzryvom titano-aljuminievyh soedinenijah', *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*, no. 2, pp. 19-23.
4. Elmarakbi, A 2014, *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*, John Wiley & Sons, Delhi.
5. Ashutosh Tiwari, Moha mmad Rabia Alenezi, Seong Chan Jun *Advanced* (eds.) 2016, *Composite Materials*, Scrivener Publishing LLC, New Delhi.

Стаття надійшла до редакції 15 квітня 2019 р.