

УДК 669.018.9

## ВПЛИВ ВАЛЬЦЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ Ti–Al, СФОРМОВАНИХ ІНФІЛЬТРАЦІЄЮ РОЗПЛАВОМ АЛЮМІНІЮ

Я. О. СМІРНОВА<sup>1</sup>, П. І. ЛОБОДА<sup>1</sup>, І. М. ГУРІЯ<sup>1</sup>, Б. В. БОРЦ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”;

<sup>2</sup> Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”

Досліджено вплив пластичного деформування на поведінку тришарових композиційних матеріалів систем VT1-0–Al та Ti–TiB–Al, сформованих інфільтрацією розплавом алюмінію. Вивчено мікроструктуру в зонах взаємодії титанових та алюмінієвих шарів. Встановлено, що під час вальцювання перехідний інтерметалідний прошарок фрагментується, а зони розриву в титанових шарах заповнюються пластичним алюмінієм. З підвищенням ступеня обтискання композитів системи VT1-0–Al зростає границя міцності за розтягу та знижуються характеристики пластичності. Анізотропія границі міцності, обумовлена напрямком вальцювання, практично не проявляється. Руйнування композитів систем VT1-0–Al та Ti–TiB–Al у результаті розтягування не призводить до значних відшарувань, що свідчить про високу міцність зчеплення шарів. Тому ці матеріали перспективні для виготовлення конструкційних елементів, здатних зберігати цілісність в умовах пластичного деформування.

**Ключові слова:** композиційний матеріал, шаруватий композит, алюміній, титан, борид титану, інфільтрація, вальцювання, мікроструктура, механічні властивості.

The effect of plastic deformation on the behavior of three-layer VT1-0–Al and Ti–TiB–Al composite materials manufactured by aluminum melt infiltration is investigated. The microstructure of the interaction zone between titanium and aluminum layers is studied. The transition layer is fragmented and fracture zones which are formed in titanium layers are filled with plastic aluminum during rolling. Increase of VT1-0–Al composites compression ratio leads to increase of tensile strength and decrease of plasticity characteristics. Anisotropy of ultimate strength due to the rolling direction practically is not observed. Fracture of VT1-0–Al and Ti–TiB–Al composites as a result of the tensile process does not lead to significant delamination, which indicates a high bond strength of the layers and makes materials promising for structural elements manufacture, which are capable of maintaining integrity under plastic deformation conditions.

**Keywords:** composite material, layered composite, aluminium, titanium, titanium boride, infiltration, rolling, microstructure, mechanical properties.

**Вступ.** Металеві композиційні матеріали щораз частіше використовують у різних галузях промисловості через вдале поєднання фізико-механічних властивостей [1–4]. Серед них важливе місце займають шаруваті композити, що об'єднують два або більше шарів різних матеріалів. Поряд зі шаруватими системами Ti–Al або Ti–інтерметаліди–Al активно досліджують багатокомпонентні системи, де окрім Ti, Al або їх інтерметалідів, присутні Mo [5–7], NiTi [8, 9], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [10, 11]. Додаткове армування волокнами позитивно впливає на їх механічні властивості, зокрема міцність. Особливо привабливе армування системи Ti–Al волокнами бориду титану через хімічну інертність бориду до цих металів [12, 13].

Водночас слід розробити технології виготовлення шаруватих виробів складної геометрії і знайти шляхи їх стоншення [14, 15]. Тут важливою характеристикою є міцність зчеплення металів, яка залежить від товщини та складу перехідного шару, що сформувався на межі поділу титан–алюміній. Зокрема, відомо, що міцність з'єднання сталєво-алюмінієвих матеріалів не знижується за товщини інтерметалідного прошарку 3...5 mm, але зменшується, якщо вона збільшується понад 10 mm, що негативно впливає на перебіг пластичного деформування [16]. Швидкість зсувних деформацій у шаруватих композитах за навантаження вибухом, як правило, висока. Поєднуючи підвищену міцність зчеплення шарів із більш тугоплавкого і менш пластичного матеріалу з високою пластичністю шару із пластичнішого матеріалу, можна зберегти цілісність такого композиту за високих (понад 3500 m/s) швидкостей деформування. Тому актуально сформувати шаруваті композити із легких і водночас міцних матеріалів, до яких відносять сплави титану.

Поширені твердофазні методи виготовлення шаруватих титано-алюмінієвих композитів є багатоетапні і технічно складні та не завжди забезпечують рівномірний перехідний прошарок на межі поділу титан–алюміній, що призводить до зниження міцності їх зчеплення. Рідкофазним методом, зокрема інфільтрацією розплавом, розроблено [17] технологічні параметри їх виготовлення, що забезпечило надійну міцність зчеплення між металами. Мета цього дослідження – вивчити вплив пластичного деформування (вальцювання) на поведінку тришарових композиційних матеріалів систем VT1-0–Al та Ti-TiB–Al, виготовлених інфільтрацією розплавом алюмінію.

**Методика випроб.** Як вихідні матеріали використали технічно чистий алюміній у розплавленому стані, пластини технічно чистого титану (VT1-0) товщиною 1 mm та армованого боридом титану (Ti-TiB) товщиною 2,5 mm. Внутрішню поверхню титанових пластин полірували, очищали спиртом та покривали флюсом евтектичного сплаву KF–AlF<sub>3</sub>. Ширина зазору  $S$  між зібраними у пакети пластинами титану VT1-0 становила 1 та 1,5 mm, а між пластинами титану, армованого боридом титану, дорівнювала 1,5 mm. Зібрані пакети просочували, занурюючи у розплав алюмінію, та витримували у ньому 300 s при 700°C. Отримані тришарові композити охолоджували у повітрі.

Композити системи VT1-0–Al обтискали за кімнатної температури без попереднього нагрівання, виконуючи один або два цикли вальцювання. Діаметр валків 200 mm, швидкість їх обертання  $V = 0,017 \text{ ms}^{-1}$ . Композити системи Ti-TiB–Al обтискали поетапно, виконуючи від одного до чотирьох циклів вальцювання, за температур 20; 400; 400 та 600°C. Валковий стан забезпечував зусилля і швидкість вальцювання 100...500 kg і  $0,03 \text{ ms}^{-1}$ , відповідно. Після кожного циклу зразки охолоджували до кімнатної температури та досліджували їх мікроструктуру.

Ступінь обтискання тришарових композитів після вальцювання визначали за формулою  $R = (r_0 - r_1) / r_0$ , де  $r_0$ ,  $r_1$  – товщина композиту до і після вальцювання.

Мікроструктуру зразків та їх хімічний склад вивчали на сканівному електронному мікроскопі РЕМ-106И. Механічні характеристики (зокрема, границю міцності) визначали з діаграм їх навантаження розтягом на універсальній машині UTM-100 як усереднені значення після не менше трьох випробувань. Використовували плоскі пропорційні зразки з прямокутним поперечним перерізом. Довжина робочої частини зразків з композиту системи VT1-0–Al становила 23,3 mm, ширина 5,2 та 2,8 mm, а товщина відповідала товщині отриманих тришарових композитів та змінювалася у межах 1,9...2,6 mm залежно від параметра  $R$ . Швидкість деформування  $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Довжина робочої частини зразків з композиту

системи Ti-TiB-Al становила 19 mm, ширина 2,9 mm, товщина 4 mm. Швидкість деформування  $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Всі зразки випробовували за кімнатної температури.

**Результати та їх обговорення.** Після одного або двох циклів вальцювання сформованих інфільтрацією розплавом алюмінію тришарових композитів системи VT1-0-Al отримали зразки з різним ступенем обтискання (табл. 1).

**Таблиця 1. Параметри вальцювання тришарових композитів системи VT1-0-Al**

|                              |      |      |     |      |
|------------------------------|------|------|-----|------|
| Ширина зазору $S$ , mm       | 1    | 1    | 1,5 | 1,5  |
| Кількість циклів вальцювання | 1    | 2    | 1   | 2    |
| Ступінь обтискання $R$       | 0,27 | 0,35 | 0,3 | 0,45 |

Після вальцювання мікроструктура в зоні взаємодії титану та алюмінію змінювалася (рис. 1) порівняно з властивою їй без вальцювання [17]. Зокрема, перехідний прошарок, що утворювався під час інфільтрації композиту розплавом, фрагментувався і зерна титану виявлялися на тлі алюмінію. Надриви на поверхні титану заповнювалися пластичним алюмінієм. Очевидного впливу товщини алюмінієвого шару або ступеня обтискання на зону взаємодії не зафіксували. Мікрорентгеноспектральним аналізом у точках уздовж межі поділу композиту системи VT1-0-Al встановили (рис. 1), що вміст елементів у перехідному прошарку може відповідати фазам TiAl (48...69 at.% Al), TiAl<sub>2</sub> (65...74 at.% Al), TiAl<sub>3</sub> (74...75 at.% Al) та твердому розчину титану в алюмінії [18].

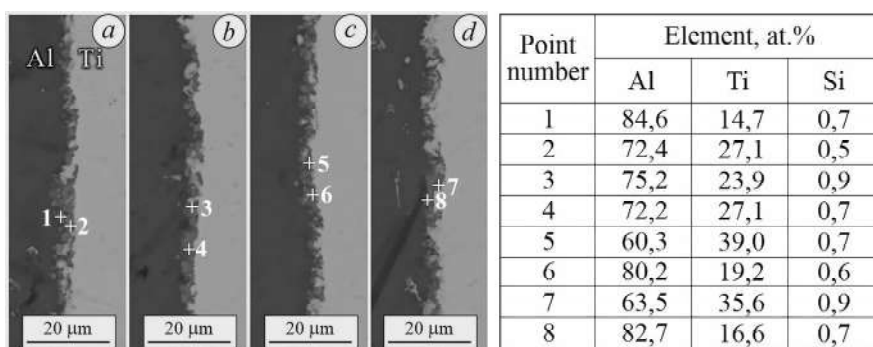


Рис. 1. Мікроструктурні особливості зони взаємодії тришарових матеріалів системи VT1-0-Al за ширини зазору 1 (a, b) і 1,5 mm (c, d) після одного (a, c) та двох (b, d) циклів вальцювання зі ступенем обтискання 0,27 (a); 0,35 (b); 0,3 (c) та 0,45 (d), а також результати мікрорентгеноспектрального аналізу.

Fig. 1. Microstructural features of VT1-0-Al three-layer materials interaction zone with a gap width of 1 mm (a, b) and 1.5 mm (c, d) after one (a, c) and two (b, d) rolling cycles with a reduction ratio of 0.27 (a); 0.35 (b); 0.3 (c) and 0.45 (d) and the EDS analysis results.

Після вальцювання у композитах системи VT1-0-Al, порівняно з вихідними матеріалами [17], практично вдвічі зросла границя міцності  $\sigma_B$ , а максимальна деформація  $\epsilon$  у момент руйнування знизилася у 2–3 рази (табл. 2; рис. 2). Зменшення товщини шару алюмінію в отриманих матеріалах призводить до збільшення границі міцності за розтягу. Незалежно від товщини алюмінієвого шару з ростом ступеня обтискання під час вальцювання границя міцності композитів підвищувалася, а схильність до пластичного деформування зменшувалася. Незважаючи на це, матеріали руйнувалися пластично, на зразках утворювалися шийки, а площини руйнування розташовувалися під кутом 45° до напрямку розтягу (рис. 2). Руйнування зразків не спричинило суттєвих відшарувань титанових шарів від алюмінієвих (рис. 3), що свідчить про їх високу адгезію.

**Таблиця 2. Механічні властивості за розтягу тришарових композитів системи VT1-0–Al після вальцювання**

| $S$ , mm | Вид оброблення | Кількість циклів вальцювання | $R$  | $\sigma_B$ , МПа | $\epsilon$ , %      |
|----------|----------------|------------------------------|------|------------------|---------------------|
| 1        | Вальцювання    | 1                            | 0,27 | $405 \pm 20$     | $16,3 \pm 2$        |
|          |                | 2                            | 0,35 | $491 \pm 17$     | $14,1 \pm 3,7$      |
|          | Без оброблення | –                            | –    | $209 \pm 2$ [17] | $36,3 \pm 0,9$ [17] |
| 1,5      | Вальцювання    | 1                            | 0,3  | $401 \pm 13$     | $13,1 \pm 2,6$      |
|          |                | 2                            | 0,45 | $461 \pm 23$     | $10,1 \pm 2,2$      |
|          | Без оброблення | –                            | –    | $192 \pm 5$ [17] | $34,4 \pm 6$ [17]   |

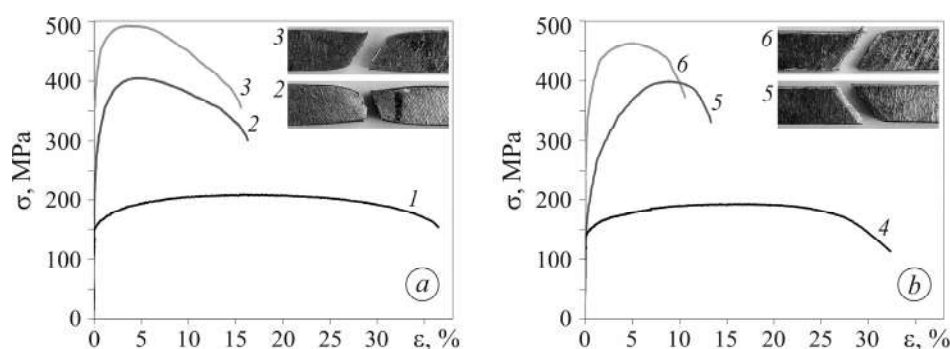


Рис. 2. Типові діаграми навантаження розтягом тришарових композитів системи VT1-0–Al за ширини зазору 1 (а) та 1,5 mm (b) без вальцювання (криві 1, 4) та після одного (криві 2, 5) і двох (криві 3, 6) циклів зі ступенем обтискання 0,27 (крива 2); 0,35 (крива 3); 0,3 (крива 5) та 0,45 (крива 6).

Fig. 2. Typical diagrams of tensile loading of three-layer VT1-0–Al composites with a gap width of 1 (a) and 1.5 mm (b) without rolling (curves 1, 4) and after one (curves 2, 5) and two (curves 3, 6) rolling cycles with a reduction ratio of 0.27 (curve 2); 0.35 (curve 3); 0.3 (curves 5); 0.45 (curve 6).

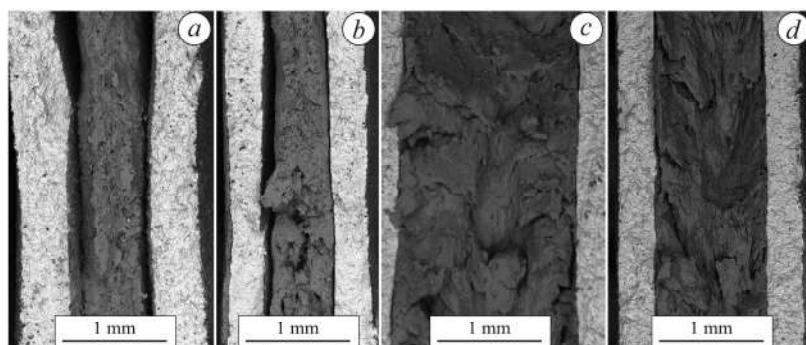


Рис. 3. Поверхня зламу після руйнування тришарових композитів системи VT1-0–Al за ширини зазору 1 (а, b) і 1,5 mm (c, d) після одного (а, c) та двох (b, d) циклів вальцювання зі ступенем обтискання 0,27 (а); 0,35 (b); 0,3 (c) та 0,45 (d).

Fig. 3. Fracture surface after failure of VT1-0–Al three-layer composites with a gap width of 1 (a, b) and 1.5 mm (c, d) after one (a, c) and two (b, d) rolling cycles with a reduction ratio of 0.27 (a); 0.35 (b); 0.3 (c) and 0.45 (d).

Також оцінювали анізотропію механічних властивостей композитів системи VT1-0–Al, обумовлену напрямком вальцювання. Ступінь обтискання матеріалів з

вихідною товщиною алюмінієвого шару 1 та 1,5 mm становив 0,38 (чотири цикли вальцювання) та 0,37 (три цикли), відповідно. Під час розтягу зразки розташовували вздовж ( $0^\circ$ ) та поперек ( $90^\circ$ ) напрямку вальцювання. Встановили, що за границею міцності анізотропія досліджених матеріалів практично не проявилася (табл. 3; рис. 4). Відхилення від середніх значень не перевищувало 7 та 12 МПа за товщини алюмінієвого шару 1 та 1,5 mm, відповідно, що не виходило за межі розкиду даних. Зафіксували збільшення максимальної деформації за поперечної орієнтації зразків (табл. 3; рис. 4) на 14 і 32% за товщини алюмінієвого шару 1 та 1,5 mm, відповідно. Незалежно від орієнтації до напрямку вальцювання всі зразки руйнувалися з утворенням косого зламу.

**Таблиця 3. Механічні властивості за розтягу зразків тришарових композитів системи VT1-0–Al, орієнтованих під різними кутами до напрямку вальцювання**

| S, mm | Вид оброблення | Кількість циклів вальцювання | R    | Орієнтація зразка до напрямку вальцювання | $\sigma_B$ , МПа | $\varepsilon$ , %   |
|-------|----------------|------------------------------|------|-------------------------------------------|------------------|---------------------|
| 1     | Вальцювання    | 4                            | 0,38 | $0^\circ$                                 | $483 \pm 23$     | $7 \pm 1,2$         |
|       | Вальцювання    | 4                            | 0,38 | $90^\circ$                                | $490 \pm 21$     | $8 \pm 1,2$         |
|       | Без оброблення | –                            | –    | –                                         | $209 \pm 2$ [17] | $36,3 \pm 0,9$ [17] |
| 1,5   | Вальцювання    | 3                            | 0,37 | $0^\circ$                                 | $436 \pm 14$     | $6,8 \pm 0,5$       |
|       | Вальцювання    | 3                            | 0,37 | $90^\circ$                                | $428 \pm 11$     | $9 \pm 1,3$         |
|       | Без оброблення | –                            | –    | –                                         | $192 \pm 5$ [17] | $34,4 \pm 6$ [17]   |

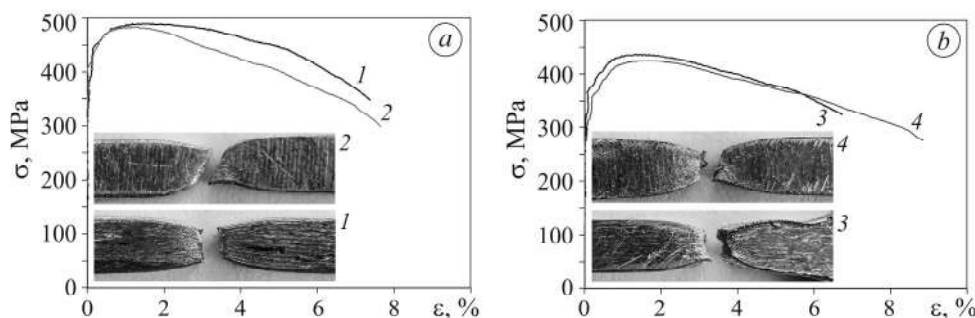


Рис. 4. Типові діаграми навантаження розтягом тришарових композитів системи VT1-0–Al за ширини зазору 1 ( $R = 0,38$ , три цикли вальцювання) (а) та 1,5 mm ( $R = 0,37$ , чотири цикли) (b), орієнтованих вздовж ( $0^\circ$ , криві 1 та 3) та поперек ( $90^\circ$ , криві 2 та 4) напрямку вальцювання.

Fig. 4. Typical diagrams of tensile loading of VT1-0–Al three-layer composites with a gap width of 1 ( $R = 0.38$ , 3 rolling cycles) (a) and 1.5 mm ( $R = 0.37$ , 4 rolling cycles) (b) oriented along ( $0^\circ$ , curves 1, 3) and across ( $90^\circ$ , curves 2, 4) the rolling direction.

Щоб дослідити умови стоншення та поведінку композитів системи Ti–TiB–Al за різних режимів пластичного деформування, вальцювали (від одного до чотирьох циклів) за температур 20; 400 та  $600^\circ\text{C}$ . Оскільки композити системи VT1-0–Al успішно вальцювали за кімнатної температури, не нагріваючи, то перший цикл вальцювання композиту цієї системи виконали за ідентичної температури. Далі температуру обирали так, щоб вона не перевищувала температуру плавлення алюмінію, проте підвищувала його пластичність. Після вальцювання отримали зразки з різним ступенем обтискання (табл. 4). Зі збільшенням кількості циклів і температури вальцювання зростає параметр  $R$  та змінювалась зона взаємодії титану з алюмінієм (рис. 5): на поверхні пластин композиту Ti–TiB з'являвся криво-лінійний рельєф із розривами, заповненими пластичним алюмінієм. Одночасне

збільшення кількості циклів та температури вальцювання призвело до незначного зростання товщини перехідного прошарку (рис. 5d). У всіх зразках на межі поділу виявили фази, які за складом можуть відповідати  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{TiAl}$  та твердому розчину титану в алюмінії (рис. 5).

**Таблиця 4. Умови вальцювання тришарових композитів системи Ti-TiB-Al**

| Кількість циклів вальцювання | 1    | 2        | 3              | 4                    |
|------------------------------|------|----------|----------------|----------------------|
| $T, ^\circ\text{C}$          | 20   | 20 + 400 | 20 + 400 + 400 | 20 + 400 + 400 + 600 |
| $R$                          | 0,05 | 0,12     | 0,2            | 0,36                 |

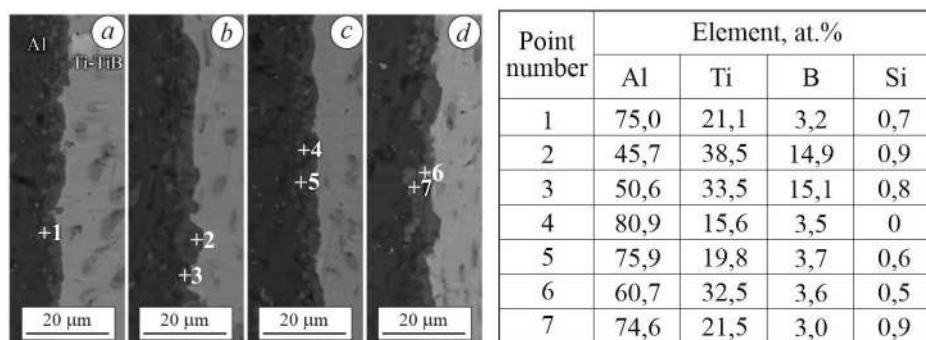


Рис. 5. Мікроструктурні особливості в зоні взаємодії тришарових матеріалів системи Ti-TiB-Al після вальцювання при 20°C (a); 20 та 400°C (b); 20, 400 та 400°C (c), а також 20; 400; 400 та 600°C (d) зі ступенем обтискання 0,05 (a), 0,12 (b), 0,2 (c) та 0,36 (d), а також результати мікрорентгеноспектрального аналізу.

Fig. 5. Microstructural features of Ti-TiB-Al three-layer materials interaction zone after rolling at temperatures of 20°C (a); 20 and 400°C (b); 20, 400 and 400°C (c) and 20, 400, 400 and 600°C (d) with a reduction ratios of 0.05 (a), 0.12 (b), 0.2 (c) and 0.36 (d) and the EDS analysis results.

Границя міцності композиту системи Ti-TiB-Al зі ступенем обтискання 0,36 після чотирьох циклів вальцювання при 20; 400; 400 та 600°C становила  $725 \pm 20$  МПа, а максимальна деформація в момент руйнування –  $0,98 \pm 0,12\%$  (рис. 6a). Виявили крихке руйнування зразків з косим зломом без формування шийки, яке не призвело до очевидних відшарувань шарів композиту (рис. 6b).

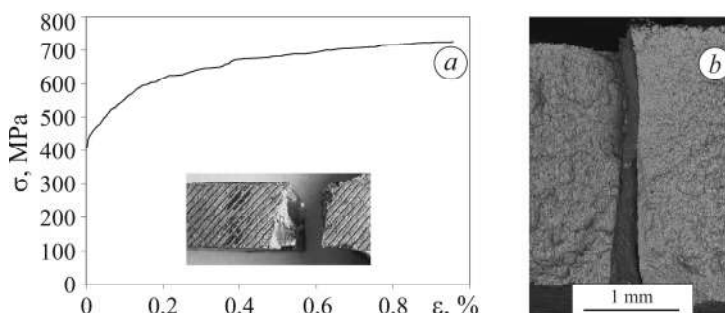


Рис. 6. Типова діаграма навантаження розтягом (a) зразка тришарового композиту системи Ti-TiB-Al після чотирьох циклів вальцювання при 20; 400; 400 та 600°C до ступеня обтискання 0,36 та його поверхня зламу після руйнування (b).

Fig. 6. Typical diagram of tensile loading (a) of Ti-TiB-Al three-layer composites after 4 rolling cycles at temperatures of 20; 400; 400 and 600°C and a reduction ratio of 0.36 and its fracture surface after failure (b).

Після вальцювання композити систем VT1-0–Al та Ti–TiB–Al мають суттєво вищі показники міцності порівняно з технічно чистим алюмінієм і водночас переважають за ними вихідний титан (рис. 7). Таким чином, через простоту виготовлення та вдале поєднання механічних властивостей отримані композиційні матеріали (особливо системи VT1-0–Al після вальцювання) перспективні для виробів, у яких необхідно поєднати високу міцність та малу вагу.

Рис. 7. Узагальнювальна залежність границі міцності за розтягу  $\sigma_B$  шаруватих композитів систем VT1-0–Al та Ti–TiB–Al, а також вихідних матеріалів (технічного Al та титану VT1-0) від їх густини  $\rho$ : ■ – Al; □ – Ti VT1-0; ◇ – VT1-0–Al,  $S = 1$ ; ◆ – VT1-0–Al,  $S = 1,5$ ; ○ – VT1-0–Al,  $S = 1$ ,  $R = 0,27$ ; ● – VT1-0–Al,  $S = 1$ ,  $R = 0,35$ ; △ – VT1-0–Al,  $S = 1,5$ ,  $R = 0,3$ ; ▲ – VT1-0–Al,  $S = 1,5$ ,  $R = 0,45$ ; × – Ti–TiB–Al,  $S = 1,5$ ,  $R = 0,36$ .

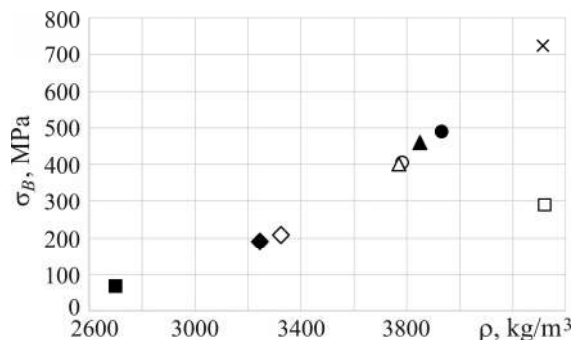


Fig. 7. Generalized dependence of the ultimate tensile strength  $\sigma_B$  of the created layered VT1-0–Al and Ti–TiB–Al composites and the initial materials (technical Al and titanium VT1-0) on their density  $\rho$ : ■ – Al; □ – Ti VT1-0; ◇ – VT1-0–Al,  $S = 1$ ; ◆ – VT1-0–Al,  $S = 1,5$ ; ○ – VT1-0–Al,  $S = 1$ ,  $R = 0,27$ ; ● – VT1-0–Al,  $S = 1$ ,  $R = 0,35$ ; △ – VT1-0–Al,  $S = 1,5$ ,  $R = 0,3$ ; ▲ – VT1-0–Al,  $S = 1,5$ ,  $R = 0,45$ ; × – Ti–TiB–Al,  $S = 1,5$ ,  $R = 0,36$ .

## ВИСНОВКИ

Встановлено, що під час вальцювання у створених шаруватих композиційних матеріалах систем VT1-0–Al та Ti–TiB–Al, виготовлених інфільтрацією розплавом алюмінію у зазор між пластинами титану, відбувалася фрагментація перехідного прошарку з утворенням надривів на поверхні пластин, які заповнював пластичний алюміній. Ступінь обтискання матеріалів системи VT1-0–Al змінювали від 0,27 до 0,45. З його збільшенням границя міцності за розтягу композитів зростала практично вдвічі порівняно з невальцьованими їх варіантами залежно від вихідної товщини алюмінієвого шару. А максимальна деформація в момент руйнування знижувалась. Анізотропія границі міцності отриманих матеріалів, спричинена зміною орієнтації зразків до напрямку вальцювання, практично не проявилася. Ступінь обтискання матеріалів системи Ti–TiB–Al змінювали від 0,05 до 0,36. Границя міцності композиту після чотирьох циклів вальцювання за температур 20; 400; 400 та 600°C, відповідно, досягла 725±20 МПа, а максимальна деформація в момент руйнування становила 0,98±0,12%. Руйнування під час розтягу цих композитів не призводить до суттєвих відшарувань, що свідчить про високу адгезію шарів між собою. Шаруваті композити із титану або титану, армованого боридом титану, сформовані інфільтрацією розплавом алюмінію з подальшим вальцюванням, перспективні для виготовлення елементів, здатних зберігати цілісність уздовж шарів внаслідок пластичного деформування.

*Робота виконана в межах наукового проєкту 0123U102125.*

1. Luzan S. A. and Bantkovskiy V. A. Structure and tribotechnical properties of deposited composite layers based on PG 10N-01 alloy containing  $Al_2O_3$  // Materials Science. – 2023. – 59, № 3. – P. 328–334. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00781-y>
2. Structure, phase composition, mechanical and corrosion properties of aluminum-based composites / Y. O. Shishkina, G. A. Bagliuk, Y. S. Kyryliuk, S. F. Kyryliuk, O. V. Tolochyna, and V. M. Talash // Materials Science. – 2024. – 59, № 6. – P. 679–685. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00828-0>

3. *Recent progress in architecture design of nanocarbon-reinforced metal matrix composites and their properties: A review* / J. Liu, R. Ding, J. Cao, K. Zhan, S. Li, B. Zhao, and V. Ji // *Carbon*. – 2024. – **228**. – P. 119382. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119382>
4. *A review on aluminium matrix composite with various reinforcement particles and their behaviour* / S. Arunkumar, M. Subramani Sundaram, K. M. Suketh Kanna, and S. Vigneshwara // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – **33**. – P. 484–490. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.053>
5. *Continuous Mo fiber reinforced Ti/Al<sub>3</sub>Ti metal-intermetallic laminated composites* / Y. Chang, Z. Wang, X. Li, Z. Leng, C. Guo, Z. Niu, and F. Jiang // *Intermetallics*. – 2019. – **112**. – Article number 106544. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106544>
6. *Fabrication and properties of continuous unidirectional Mo fiber reinforced TiAl composites by slurry casting and vacuum hot pressing* / Y. Zhou, Q. Wang, X.-L. Han, and D.-L. Sun // *Composites Sci. and Technol.* – 2013. – **83**. – P. 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.04.015>
7. *Effect of fabrication parameters on the microstructure and mechanical properties of unidirectional Mo-fiber reinforced TiAl matrix composites* / Y. Zhou, D.-L. Sun, Q. Wang, and X.-L. Han // *Mater. Sci. and Eng. A*. – 2013. – **575**. – P. 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.051>
8. *Improved fracture toughness of NiTi shape memory alloy fiber-reinforced Ti–Al metal-inter-metallic-laminate composite* / Y. Tian, E. Wang, W. Li, Z. Niu, Y. Chang, C. Guo, Z. Wang, Z. Leng, and F. Jiang // *J. of Alloys and Compounds*. – 2018. – **739**. – P. 669–677. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.258>
9. *Fabrication, mechanical properties and damping capacity of shape memory alloy NiTi fiber-reinforced metal-intermetallic-laminate (SMAFR-MIL) composite* / E. Wang, C. Guo, P. Zhou, C. Lin, X. Han, and F. Jiang // *Mater. and Design*. – 2016. **95**. – P. 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.130>
10. *Fabrication, interfacial characterization and mechanical properties of continuous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic fiber reinforced Ti/Al<sub>3</sub>Ti metal-intermetallic laminated (CCFR-MIL) composite* / Y. Han, C. Lin, X. Han, Y. Chang, C. Guo, and F. Jiang // *Mater. Sci. and Eng. A*. – 2017. – **688**. – P. 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.024>
11. *Vecchio K. S. and Jiang F. Fracture toughness of ceramic-fiber-reinforced metallic-intermetallic-laminate (CFR-MIL) composites* // *Mater. Sci. and Eng. A*. – 2016. – **649**. – P. 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.018>
12. *Synthesis and characterization of TiB<sub>2</sub> reinforced aluminium matrix composites: A review* / N. Kumar, G. Gautam, R. K. Gautam, A. Mohan, and S. Mohan // *J. of the Institution of Engineers (India): Ser. D*. – 2016. – **97**. – P. 233–253. <https://doi.org/10.1007/s40033-015-0091-7>
13. *Brittle-to-ductile transition in a Ti–TiB metal-matrix composite* / M. Ozerov, N. Stepanov, A. Kolesnikov, V. Sokolovsky, and S. Zhrebetsov // *Mater. Letters*. – 2017. – **187**. – P. 28–31. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.10.060>
14. *Effect of original layer thicknesses on the interface bonding and mechanical properties of Ti/Al laminate composites* / M. Fan, J. Domblesky, K. Jin, L. Qin, S. Cui, X. Guo, N. Kim, and J. Tao // *Mater. and Design*. – 2016. – **99**. – P. 535–542. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.102>
15. *Effect of interface on mechanical properties and formability of Ti/Al/Ti laminated composites* / M. Cao, C. Wang, K. Deng, K. Nie, W. Liang, and Y. Wu // *J. of Mater. Res. and Technol.* – 2021. – **14**. – P. 1655–1669. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.021>
16. *Danesh Manesh H. and Karimi Taheri A. Bond strength and formability of an aluminum-clad steel sheet* // *J. of Alloys and Compounds*. – 2003. – **361**, № 1–2. – P. 138–143. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00392-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00392-X)
17. *Smirnova Y., Huriia I., and Loboda P. Liquid phase fabrication technology of layered Ti/Al composite* // *U.P.B. Scientific bulletin, Series B: Chemistry and Mater. Sci.* – 2021. – **83**, № 4. – P. 273–282.
18. *Kostin V. A., Grigorenko G. M., and Grigorenko S. G. Plotting of calculation thermokinetic diagrams of anizothermal transformations of titanium alloys on aluminides base* // *Electro-metallurgy Today*. – 2017. – № 2. – P. 45–51. <https://doi.org/10.15407/sem2017.02.07>

Одержано 30.07.2024