

Я.О. Смірнова, аспірант, асистент, e-mail: yana.luschay@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6371-3716>, Web of Science ResearcherID: AAA-9477-2022

І.М. Гурія, канд. техн. наук, доц., доцент, e-mail: guriya@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0394-9708>, Web of Science ResearcherID: AAA-9338-2022

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

Мікроструктура та механічні властивості шаруватого литого композиту BT-6/Al

Шаруваті титан/алюмінієві композиційні матеріали як з чистих металів, так і їх сплавів все активніше досліджують завдяки їх унікальним властивостям. Однак, найбільш поширені твердофазні методи мають ряд недоліків, яких можна уникнути, застосовуючи спрощені рідкофазні ливарні технології.

У представлений роботі досліджено мікроструктуру межі взаємодії та механічну поведінку при розриванні композиту системи BT-6/Al, виготовленого рідкофазним ливарним методом.

Технологія виготовлення шаруватого матеріалу системи BT-6/Al полягала у просоченні пакету із декількох пластин титанового сплаву розплавом алюмінію. Встановлено, що алюміній рівномірно просочується між пластинами, а на межі взаємодії металів утворюється перехідний шар товщиною 3,03–4,33 мкм, який складається з твердого розчину титану в алюмінії та поодиноких зерен фаз Al_3Ti та $AlTi$. Кількість просочуваних титанових пластин та зміна ширини зазору між ними не впливає на товщину утвореного перехідного шару.

У результаті дослідження механічних властивостей було встановлено, що основним параметром, який впливає на їх величину, є співвідношення товщин шарів Ti до Al . Проаналізовано правило сумішей та визначено міцність на розривання для п'яти- та семишарових матеріалів. Не дивлячись на те, що значення міцності на розривання отриманих композитів зменшуються у порівнянні з вихідним титаном марки BT-6, шаруваті матеріали завдяки своїй структурі можуть підвищувати стійкість до руйнування та позитивно впливати на механізми демпфування. Тому подальше дослідження поведінки шаруватих титан/алюмінієвих композиційних матеріалів під дією напружень, перпендикулярних до їх шарів, є актуальним.

Ключові слова: композиційний матеріал, шаруватий композит, титан, алюміній, просочення, міцність на розривання.

Протягом останніх двох десятиліть активно досліджуються титан/алюмінієві композиційні матеріали. Це зумовлено високою питомою міцністю та жорсткістю, корозійною стійкістю, низькою щільністю тощо [1]. Серед титан/алюмінієвих композитів важливе місце займають шаруваті структури, поведінка під час руйнування яких позитивно змінюється за рахунок збільшення кількості границь поділу, що перешкоджають розповсюдженню тріщин [2].

Серед відомих технологій виготовлення титан/алюмінієвих композитів все більшу увагу приділяють рідкофазним ливарним методам, які вирішують ряд проблем поширених твердофазних методів – прокатування, зварювання або гарячого пресування [3–6], а саме – низьку міцність міжфазного з'єднання, обмежені розміри та конфігурацію отримуваних виробів, складний технологічний процес їх виготовлення. Це робить рідкофазні ливарні методи придатними для масового виробництва завдяки меншим собівартості й енергозатратності [1, 7–9].

Для виготовлення шаруватих титан/алюмінієвих композиційних матеріалів використовують як технічно

чисті метали, так і їх сплави [3–6, 10–13]. Одним з найбільш поширених є корозійностійкий, жаро- та високоміцний і досить пластичний титановий сплав BT-6 ($Ti-6Al-4V$), який має високу технологічність під час оброблення тиском та задовільні ливарні властивості. Такі характеристики дозволяють використовувати сплав для деталей авіаційних двигунів, ракет, кріплень, для елементів конструкцій, що працюють у воді, деталей та ємностей хімічного машинобудування, бронезахисних елементів, а також хірургічних імплантів [14–15].

У даній роботі було поставлено наступні задачі: виготовити рідкофазним ливарним методом три-, п'яти- та семишарові матеріали системи BT-6/Al, дослідити мікроструктуру межі взаємодії та механічну поведінку при розриванні.

У роботі використовували технічно чистий алюміній та пластини титану марки BT-6, розмірами $30 \times 30 \times 0,5$ мм.

Технологія, за якою виготовляли шаруваті композиційні матеріали для дослідження, детально описана у нашій попередній роботі [16]. Процес виготовлення полягає у просочуванні пакетів із двох (рис. 1, а),

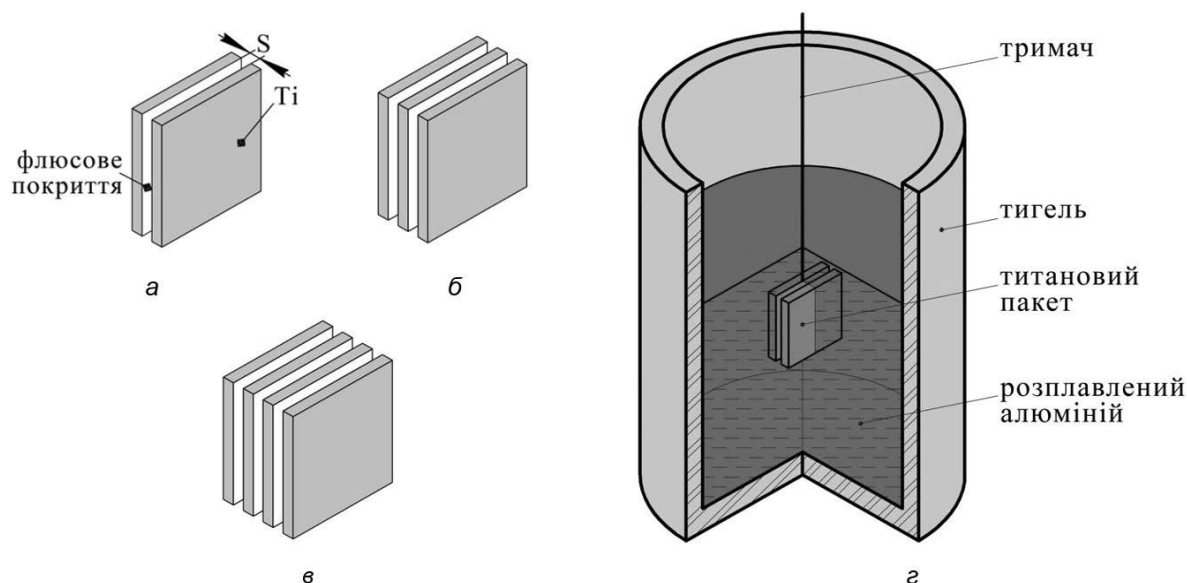


Рис. 1. Схематичне зображення пакетів з двома (а), трьома (б) та чотирма (в) титановими пластинами та процесу виготовлення шаруватого композиційного матеріалу (г) [16]

Таблиця 1

Умови просочування титанових пакетів

Умови просочування	№ титанового пакета				
	1	2	3	4	5
Температура розплаву t , °C	700				
Час витримування τ , с	300				
Кількість титанових пластин, шт.	2			3	4
Ширина зазору між титановими пластинами S , мм	0,5	1	1,5	1	1

Таблиця 2

Розмірні параметри виготовлених шаруватих композиційних матеріалів, які піддавали випробуванням на розривання

№ титанового пакета	Вихідна товщина зазору між пластинами, мм	Загальна товщина композиту, мм	Кількість шарів у матеріалі, шт.	Товщина шару, мм		Об'ємна частка, %		Співвідношення товщин (Ti/Al)
				Ti	Al	Ti	Al	
1	0,5	1,68	3	1	0,68	59,52	40,48	1,75/1,19
2	1	2,75	3	1	1,75	36,36	63,64	1,07/1,87
3	1,5	2,92	3	1	1,92	34,25	65,75	1,01/1,93
4	1	3,8	5	1,5	2,3	39,48	60,52	1,16/1,78
5	1	5,8	7	2	3,8	34,49	65,51	1,01/1,92

трьох (рис. 1, б) та чотирьох (рис. 1, в) титанових пластин із нанесеним флюсовим покриттям (рис. 1, г).

Технологічні параметри методу (значення ширини зазору між пластинами, температура розплаву та час витримування) вказано у табл. 1. Охолодження просочених пакетів проводили на повітрі.

Розмірні параметри отриманих шаруватих композитів, які піддавали випробуванням на розривання, наведено у табл. 2.

Мікроструктуру одержаних зразків вивчали на скануючому електронному мікроскопі «РЕМ-106И» з енергодисперсійним аналізатором хімічного складу.

Для дослідження механічних властивостей проводили випробування на розривання на повіреній універсальній машині UTM-100. Для випробувань використовували пропорційні пласкі зразки відповідно до ГОСТ 1497-84 (еквівалент ISO 6892-84). Випробування проводили при кімнатній температурі та швидкості навантаження 3 мм/хв.

Наявність флюсу на поверхні титану сприяла рівномірному просочуванню алюмінієвого розплаву між пластинами незалежно від ширини зазору між ними. На межі взаємодії титану та алюмінію спостерігається утворення рівномірного дифузійного перехідного ша-

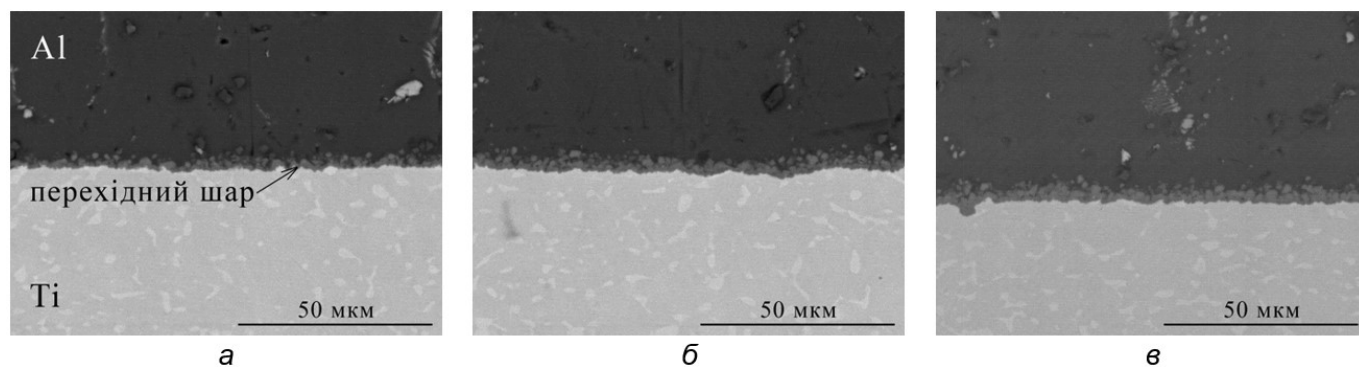
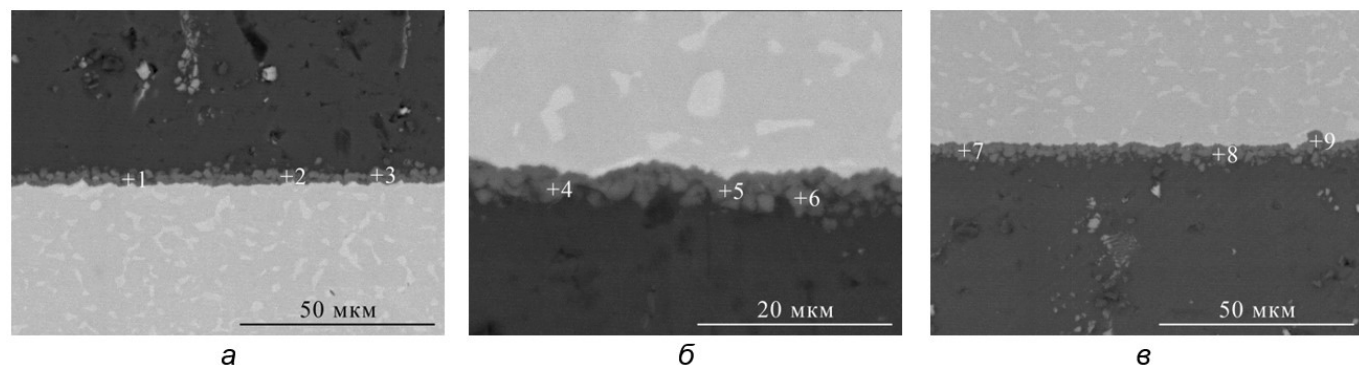


Рис. 2. Мікроструктура межі взаємодії композитів системи BT-6/Al із шириною зазору 0,5 мм (а), 1 мм (б) та 1,5 мм (в) між титановими пластинами



Атом. %	Точка №								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al	63.22	79.98	75.26	81.61	74.93	82.51	79.85	81.40	72.29
Ti	33.20	18.37	22.36	16.84	23.28	15.75	18.25	16.68	25.42
Si	2.54	1.65	1.74	1.55	1.79	1.74	1.90	1.52	1.48
V	1.04	—	0.64	—	—	—	—	0.40	0.81

Рис. 3. Мікрорентгеноспектральний аналіз у точках для 3-ох шарових композитів системи BT-6/Al із шириною зазору 0,5 (а), 1 (б) та 1,5 мм (в) між титановими пластинами

ру (рис. 2), наявність якого свідчить про металургійний зв'язок між металами. Зміна ширини зазору між титановими пластинами не вплинула на товщину перехідного шару, яка в середньому знаходиться у межах 3,03–4,33 мкм.

За температур вищих температури плавлення алюмінію перехідний шар на межі взаємодії Ti/Al формується за рахунок дифузії атомів титану до алюмінію [17]. Пересичення рідкої фази титаном, у результаті його розчинення у алюмінії, призводить до утворення фази, яка першою утворюється у системі – $TiAl_3$. Цей процес супроводжується формуванням інших інтерметалідних фаз через реакцію на межі твердий титан/ $TiAl_3$ та подальшим зростанням триалюмініду титану через реакцію на межі $TiAl_3$ /рідкий алюміній [18].

Мікрорентгеноспектральним аналізом (рис. 3) встановлено, що фазовий склад перехідного шару пакетів, витриманих протягом 300 с, переважно відповідає твердому розчину титану в алюмінії з поодинокими зернами фази Al_3Ti та $AlTi$.

Результати скануючої мікроскопії п'яти- та семишарових зразків із шириною зазору 1 мм між титановими пластинами вказали на ідентичність мікроструктури їх межі взаємодії тришаровим (рис. 4). Мікрорентге-

носпектральний аналіз у точках підтвердив наявність аналогічних фаз на межі взаємодії.

Таким чином, просочування алюмінієм титанових пластин, з витриманням протягом 300 с, забезпечило утворення металургійного зв'язку між металами та отримання три-, п'яти- та семишарових композитів з перехідним шаром, що складається з твердого розчину титану в алюмінії з поодинокими зернами фази Al_3Ti та $AlTi$.

На наступному етапі роботи досліджували механічні властивості отриманих композитів. Міцність на розривання вихідних титану та алюмінію становить 835–1100 та 40–60 МПа відповідно. У результаті випробувань встановлено, що міцність тришарового пакету з об'ємною часткою алюмінію 40,48 %, є найбільшою серед досліджуваних зразків, і складає 602 МПа. Збільшення об'ємної частки алюмінію до 63,63 % та 65,75 % призвело до зменшення міцності до 394 та 383 МПа відповідно. Результати випробування на розривання тришарових пакетів з різною товщиною алюмінієвого шару представлені на рис. 5.

Отримані зразки п'яти- та семишарового матеріалу не вдалося випробувати через геометричні обмеження універсальної машини, яку використовували.

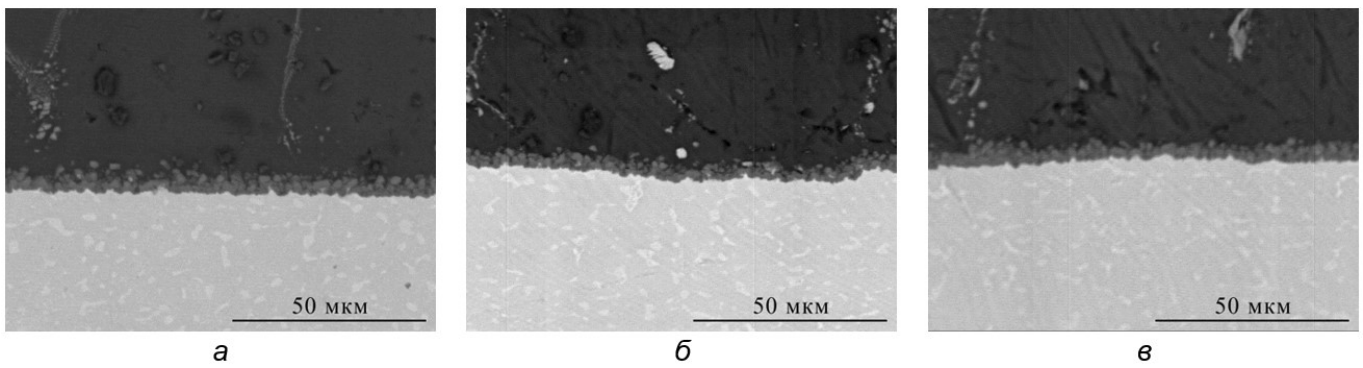


Рис. 4. Мікроструктура межі взаємодії три- (а), п'яти- (б) та семишарових (в) композитів системи ВТ-6/АІ із шириною зазору 1 мм між титановими пластинами

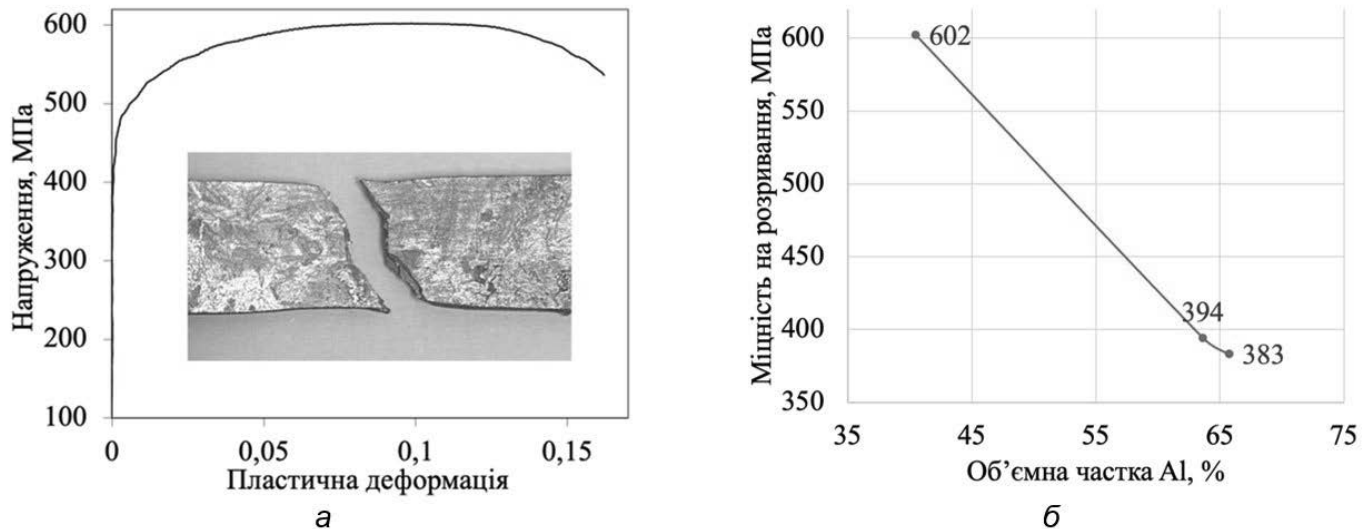


Рис. 5. Результати випробування на розривання: крива напруження-деформація для зразка з об'ємною часткою алюмінію 40,48 % (а), залежність міцності на розривання від зазору між титановими пластинами (б)

Проте відомо, що пружні властивості та механічна міцність шаруватих матеріалів, на відміну від пластичності та в'язкості, підпорядковуються правилу сумішей [19]. Для визначення можливості достовірного розрахунку значень міцності на розривання п'яти- та семишарового матеріалу було досліджено величину розбіжності між експериментальними та розрахованими величинами міцності для тришарових матеріалів.

За відомими кривими напруження-деформація вихідних матеріалів та об'ємними частками фаз у композиті (або товщини кожної з фаз) межу міцності на розривання можна розрахувати за наступними формулами:

$$\sigma_{В\text{ КМ}} = V_{к1} \sigma_{В\text{ К1}} + V_{к2} \sigma_{В\text{ К2}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{В\text{ КМ}} = (h_{к1} \sigma_{В\text{ К1}} + h_{к2} \sigma_{В\text{ К2}}) / h_{к1} + h_{к2}, \quad (2)$$

де $\sigma_{В\text{ КМ}}$ – межа міцності на розривання композиційного матеріалу, МПа; $V_{к1}$, $V_{к2}$ – об'ємна частка у композиційному матеріалі складових компонентів 1 та 2 відповідно, %; $\sigma_{В\text{ К1}}$, $\sigma_{В\text{ К2}}$ – межа міцності на розривання складового компоненту 1 та 2 відповідно, МПа; $h_{к1}$, $h_{к2}$ – товщина у композиційному матеріалі складових компонентів 1 та 2 відповідно, мм.

Оскільки товщина перехідного шару, яка складала 0,08–0,1 % від товщини всього матеріалу, є незна-

чною, а фазовий склад є нерівномірним по довжині межі взаємодії, його внесок у міцність матеріалу не враховували при розрахунках. Порівняння, наведене у табл. 3, показує відповідність експериментальних результатів розрахунковим для усіх зразків із максимальною розбіжністю 3,78 %, а представлена технологія дозволяє отримати матеріал з контрольованими механічними властивостями.

Аналізуючи отримані результати можемо припустити, що при збільшенні об'ємного вмісту алюмінію у матеріалі більше 66 % різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями міцності на розривання також буде збільшуватися.

Авторами [20] також встановлено, що відхилення від правила відбувається у шаруватих матеріалах, де вміст алюмінію менше 20 об. %, основними факторами, які на це впливають, є шорсткість та нерівність межі поділу виготовленого матеріалу, наявність інтерметалідного шару на межі поділу титан/алюміній та зміна ефекту обмеження (constraint effect) при руйнуванні.

Таким чином, для уникнення значних похибок та неточностей доцільно застосовувати правило сумішей за умови вмісту алюмінію у матеріалі від 20 до 66 %, що дозволяє визначити міцність для виготовлених п'яти- та семишарових композитів. Так, розраховане значення міцності на розривання складає 417,11 МПа для п'ятишарового композиту з 60,52 %

Таблиця 3

Порівняння розрахункових та експериментальних механічних властивостей шаруватих композиційних матеріалів

№ титанового пакета	Міцність на розривання, МПа		Різниця	
	Експериментальна	Розрахована	МПа	%
1	602	603,57	-1,57	-0,26
2	394	388,18	5,82	1,47
3	383	368,5	14,5	3,78

алюмінію у об'ємі матеріалу та 370,7 МПа для семишарового композиту з 65,51 % алюмінію у об'ємі матеріалу.

У роботі встановлено, що значення міцності на розривання три-, п'яти- та семишарових композитів зменшуються, у порівнянні з вихідним титаном марки BT-6, при збільшенні об'ємної частки алюмінію у матеріалі. Але, важливо зазначити, що шаруваті матеріали можуть підвищувати стійкість до руйнування за рахунок активації ряду механізмів зміцнення, а плоскі межі взаємодії можуть бути джерелом унікальних механізмів демпфування [2]. Тому, подальше дослідження поведінки композитів під дією напружень, перпендикулярних до шарів матеріалу, є актуальним.

Висновки

У роботі представлено шаруватий композиційний матеріал BT-6/Al, виготовлений за ливарною рідкофазною технологією, яка полягає у просоченні титанового пакету розплавом алюмінію.

Встановлено, що між вихідними металами виникає металургійний зв'язок, а на межі взаємодії утворюється перехідний титан-алюмінієвий дифузійний шар,

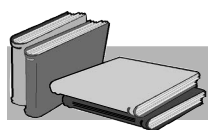
що складається з твердого розчину титану в алюмінії та поодиноких інтерметалідних зерен. Як кількість просочуваних титанових пластин, так і зміна ширини зазору між ними не вплинула на товщину утвореного перехідного шару.

Збільшення об'ємної частки алюмінію у композиційному матеріалі від 40,48 до 65,75 % призвело до зменшення міцності від 602 до 383 МПа відповідно. Таким чином, основним параметром, який впливає на механічні властивості, є співвідношення товщин шарів Ti до Al, що дозволяє отримати матеріал з контрольованими механічними властивостями.

Проаналізовано правило сумішей та визначено значення міцності на розривання для п'яти- та семишарових матеріалів, яка складала 417,11 та 370,7 МПа відповідно.

Незважаючи на зменшення значень міцності на розривання у порівнянні з вихідним титаном марки BT-6, шаруваті структури з плоскими межами взаємодії можуть підвищувати стійкість до руйнування та позитивно впливати на механізми демпфування.

Результати роботи підтверджують актуальність подальшого дослідження поведінки композитів під дією напружень, перпендикулярних до шарів матеріалу.

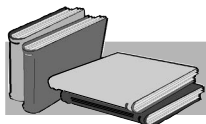


ЛІТЕРАТУРА

1. Nie X.-Y., Zhao K.-N., Li H.-X., Du Q., Zhang J.-S., Zhuang L.-Z. Comparisons of interface microstructure and mechanical behavior between Ti/Al and Ti-6Al-4V/Al bimetallic composites. *China Foundry*. 2015. Vol.12. No. 1. P. 1–8.
2. Lesuer D.R., Syn C.K., Sherby O.D., Wadsworth J., Lewandowski J.J., Hunt W.H. Jr. Mechanical behaviour of laminated metal composites. *International Materials Reviews*. 1996. Vol. 41. Iss. 5. P. 169–197. DOI: <https://doi.org/10.1179/imr.1996.41.5.169>
3. Luo J.-G., Acoff V.L. Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multilayered composites from elemental foils. *Materials Science and Engineering A*. 2004. Vol. 379. Iss. 1–2. P. 164–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.021>
4. Lazurenko D.V., Bataev I.A., Mali V.I., Bataev A.A., Maliutina Iu.N., Lozhkin V.S., Jorge A.M.J. Explosively welded multilayer Ti-Al composites: Structure and transformation during heat treatment. *Materials & Design*. 2016. Vol. 102. P. 122–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.037>
5. Paul H., Maj Ł., Prażmowski M., Gałka A., Miszczyk M., Petrzak P. Microstructure and mechanical properties of multi-layered Al/Ti composites produced by explosive welding. *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 15. P. 1391–1398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.343>
6. Huang M., Xu C., Fan G., Maawad E., Gan W., Geng L., Xie H. Role of layered structure in ductility improvement of layered Ti-Al metal composite. *Acta Materialia*. 2018. Vol. 153. P. 235–249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.05.005>
7. 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.

8. Qin L., Fan M., Guo X., Tao J. Plastic deformation behaviors of Ti-Al laminated composite fabricated by vacuum hot-pressing. *Vacuum*. 2018. Vol. 155. P. 96–107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.021>
9. Крейдер К. Композиционные материалы с металлической матрицей / под ред. К. Крейдера. Москва: Машиностроение, 1978. 503 с.
10. Sano T., Catalano J., Casem D., Dandekar D. Microstructural and mechanical behavior characterization of ultrasonically consolidated titanium-aluminum laminates. Army Research Lab Aberdeen Proving Ground Md Weapons and Materials Research Directorate. 2009.
11. Крюков Д.Б., Гуськов М.С., Гуськов Д.С. Исследование влияния термической обработки на структурные превращения и физико-механические свойства композиционного материала титан-алюминий. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2016. № 1 (17). С. 290–298.
12. Shao C., Zhao S., Wang X., Zhu Y., Zhang Z., Ritchie R.O. Architecture of high-strength aluminum–matrix composites processed by a novel microcasting technique. *NPG Asia Materials*. 2019. 11:69. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0174-2>
13. Szachogluchowicz I., Sniezek L., Hutsaylyuk V. Low cycle fatigue properties laminate AA2519-Ti6Al4V. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 114. P. 26–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.022>
14. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. Москва: ВИЛС – МАТИ, 2009. 520 с.
15. Sibum H. Titanium and Titanium Alloys – From Raw Material to Semi-finished Products. *Advanced Engineering Materials*. 2003. Vol. 5. Iss. 6. P. 393–398. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.200310092>
16. 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. URL: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezb3b_447954.pdf
17. Xu L., Cui Y.Y., Hao Y.L., Yang R. Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples. *Materials Science and Engineering A*. 2006. Vol. 435–436. P. 638–647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.077>
18. 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. No. 21. P. 1722–1727. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60921-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60921-7)
19. Padnuru Sripathy A., Gupta M. Insight Into Layered Metal Matrix Composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*. 2021. Vol. 1. P. 121–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00021-5>
20. Du Y., Fan G., Yu T., Hansen N., Geng L., Huang X. Laminated Ti-Al composites: processing, structure and strength. *Materials Science & Engineering A*. 2016. Vol. 673. P. 572–580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.108>

Надійшла 27.01.2022



REFERENCES

1. Nie, X.-Y., Zhao, K.-N., Li, H.-X., Du, Q., Zhang, J.-S., Zhuang, L.-Z. (2015). Comparisons of interface microstructure and mechanical behavior between Ti/Al and Ti-6Al-4V/Al bimetallic composites. *China Foundry*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8.
2. Lesuer, D.R., Syn, C.K., Sherby, O.D., Wadsworth, J., Lewandowski, J.J., Hunt, W.H.Jr. (1996). Mechanical behaviour of laminated metal composites. *International Materials Reviews*, vol. 41, iss. 5, pp. 169–197, doi: <https://doi.org/10.1179/imr.1996.41.5.169>
3. Luo, J.-G., Acoff, V.L. (2004). Using cold roll bonding and annealing to process Ti/Al multi-layered composites from elemental foils. *Materials Science and Engineering A*, vol. 379, iss. 1–2, pp. 164–172, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.021>
4. Lazurenko, D.V., Bataev, I.A., Mali, V.I., Bataev, A.A., Maliutina, Iu.N., Lozhkin, V.S., Jorge, A.M.J. (2016). Explosively welded multilayer Ti-Al composites: Structure and transformation during heat treatment. *Materials & Design*, vol. 102, pp. 122–130, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.037>
5. Paul, H., Maj, Ł., Prażmowski, M., Gałka, A., Miszczyk, M., Petrzak, P. (2018). Microstructure and mechanical properties of multi-layered Al/Ti composites produced by explosive welding. *Procedia Manufacturing*, vol. 15, pp. 1391–1398, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.343>
6. Huang, M., Xu, C., Fan, G., Maawad, E., Gan, W., Geng, L., Xie, H. (2018). Role of layered structure in ductility improvement of layered Ti-Al metal composite. *Acta Materialia*, vol. 153, pp. 235–249, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.05.005>
7. Kovtunov, A.I., Myamin, S.V. (2013). Study of the technological and mechanical properties of laminated titano-aluminium composite materials, produced by liquid-phase method. *Aviation Materials and Technologies*, no. 1 (26), pp. 9–12 [in Russian].
8. Qin, L., Fan, M., Guo, X., Tao, J. (2018). Plastic deformation behaviors of Ti-Al laminated composite fabricated by vacuum hot-pressing. *Vacuum*, vol. 155, pp. 96–107, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.021>
9. Kreyder, K. (1978). Metallic Matrix Composites. Ed. by K. Kreyder. Moscow: Mashinostroenie, 503 p. [in Russian].
10. Sano, T., Catalano, J., Casem, D., Dandekar, D. (2009). Microstructural and mechanical behavior characterization of ultrasonically consolidated titanium-aluminum laminates. Army Research Lab Aberdeen Proving Ground Md Weapons and Materials Research Directorate.

11. Kryukov, D.I., Gus'kov, M.S., Gus'kov, D.S. (2016). Research of influence of heat treatment on structural transformations and physico-mechanical properties of composite material titanium-aluminum. *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*, no. 1 (17), pp. 290–298 [in Russian].
12. Shao, C., Zhao, S., Wang, X., Zhu, Y., Zhang, Z., Ritchie, R.O. (2019). Architecture of high-strength aluminum–matrix composites processed by a novel microcasting technique. *NPG Asia Materials*. 11:69, doi: <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0174-2>
13. Szachogluchowicz, I., Sniezek, L., Hutsaylyuk, V. (2015). Low cycle fatigue properties laminate AA2519-Ti6Al4V. *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 26–33, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.022>
14. Ilin, A.A., Kolachyov, B.A., Polkin, I.S. (2009). Titanium alloys. Composition, structure, properties. Handbook. Moscow: VILS – MATI, 520 p. [in Russian].
15. Sibum, H. (2003). Titanium and Titanium Alloys – From Raw Material to Semi-finished Products. *Advanced Engineering Materials*, vol. 5, iss. 6, pp. 393–398, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200310092>
16. Smirnova, Y., Huriia, I., Loboda, P. (2021). Liquid phase fabrication technology of layered Ti/Al composite. *U.P.B. Scientific bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, vol. 83, iss. 4, pp. 273–282. URL: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezb3b_447954.pdf
17. Xu, L., Cui, Y.Y., Hao, Y.L., Yang, R. (2006). Growth of intermetallic layer in multi-laminated Ti/Al diffusion couples. *Materials Science and Engineering A*, vol. 435–436, pp. 638–647, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.077>
18. Sun, Y., Zhao, Y., Zhang, D., Liu, C., Diao, H., Ma, C. (2011). Multilayered Ti-Al intermetallic sheets fabricated by cold rolling and annealing of titanium and aluminum foils. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, no. 21, pp. 1722–1727, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60921-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60921-7)
19. Padnuru Sripathy, A., Gupta, M. (2021). Insight Into Layered Metal Matrix Composites. *Encyclopedia of Materials: Composites*, vol. 1, pp. 121–139, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00021-5>
20. Du, Y., Fan, G., Yu, T., Hansen, N., Geng, L., Huang, X. (2016). Laminated Ti-Al composites: processing, structure and strength. *Materials Science & Engineering A*, vol. 673, pp. 572–580, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.108>

Received 27.01.2022

Summary

Ya.O. Smirnova, PhD Student, Assistant, e-mail: yana.luschay@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-6371-3716>, Web of Science

ResearcherID: AAA-9477-2022

I.M. Huriia, PhD (Engin.), Assistant Professor, Associate Professor,
 e-mail: guriya@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0394-9708>, Web of
 Science ResearcherID: AAA-9338-2022

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic
 Institute” (Kyiv, Ukraine)*

Microstructure and mechanical properties of layered cast VT-6/Al composite

Layered titanium/aluminum composite materials based on pure metals and their alloys are widely investigated due to their unique properties. However, the most common solid-phase methods have some disadvantages that can be avoided by using simplified liquid-phase casting technologies.

In the presented work the interface microstructure and mechanical behavior during tensile test of the VT-6/Al composite produced using the liquid-phase casting method are investigated.

The technology of manufacturing VT-6/Al layered material consisted in infiltration of several titanium plates' package with molten aluminum. It was found that aluminum evenly infiltrates between the plates and 3.03–4.33 μm thick transition layer is formed at the interface. It consists of a solid solution of titanium in aluminum and single grains of Al₃Ti and AlTi phases. The number of infiltrated titanium plates and the gap changing between them does not affect at the thickness of the formed transition layer.

It was found that the main parameter that affects the mechanical properties is the ratio of the thicknesses of the Ti to Al layers. The rule of mixture is analyzed and the tensile strength for five- and seven-layer materials is determined. Despite the fact that the values of tensile strength of the obtained composites are reduced compared to the original titanium grade VT-6, layered materials due to their structure can improve fracture resistance and positively effect on damping mechanisms. Therefore, further study of the layered titanium/aluminum composite materials behavior under perpendicular load to their layers is relevant.

Keywords

Composite material, layered composite, titanium, aluminum, infiltration, tensile strength.