

Microstructure and properties of aluminum composites with carbide-containing master alloy and titanium carbide prepared by hot-forging

Yu.O. Shishkina, G.A. Bagliuk

*Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, 3, Krzhynanovsky St., Kyiv, 03142, Ukraine.
Tel.: +380992388197
E-mail: juliunona@gmail.com*

Article info: received 25.06.2018, revised 27.06.2018, accepted 29.06.2018

Shishkina, Yu.O., Bagliuk, G.A. (2018) Microstructure and properties of aluminum composites with carbide-containing master alloy and titanium carbide prepared by hot-forging 2(39), doi: 10.26909/csl.2.2018.4

For the production of aluminosar composites, three compositions of the master alloy are selected – 20Al-16C-64Ti (% , wt.) with the maximum carbon content and the finest titanium carbide particles formed after synthesis, 40Al-6C-54Ti (% , wt.) and 45Al-11C-44Ti (% wt.) with a maximum content of aluminum and with different titanium and carbon ratios, to determine the effect of the composition of the master alloy on the mechanical properties of hot forged aluminosar composite materials. The Al-TiC composite was obtained to compare it properties with Al-master alloy composite materials. A technological scheme for the production of aluminum matrix composites by the method of hot forging was developed, the regularities of the processes of their structure formation in the volume of consolidated billets, physical and mechanical properties, tribotechnical properties and corrosion resistance have been investigated. The hardness and strength properties of the composites with master alloy are significantly lower than those of samples with TiC, whereas the ductility of the latter is higher. The results of complex tribotechnical tests of hot forged aluminium composites have shown that the materials under study in a pair of friction with CT105 steel undergo significant damage as a result of the implementation of the adhesive wear mechanism. Study of the corrosion resistance of the materials in a 3,5 % solution of NaCl have shown that their corrosion resistance is 1 point (absolutely stable), which significantly exceeds the corrosion resistance of aluminum, Al-TiC composite and one of the most widely used aluminum alloys 1160.

In a solution of 3 % NaCl + ml/l HCl, almost all investigated hot stamped aluminum matrix composite materials belong to a group of low-strength or lower-stable. For materials containing 15 % TiC – 85 % corrosion resistance decreases to 9th ball, which translates them into a group of unstable. Such a significant drop in corrosion resistance in the second solution is due to the fact that acids, like alkalis, destroy the oxide film on aluminum, and the metal dissolves. This is especially true for acids containing halogens (hydrochloric, sulfuric, hydrofluoric acid) - their aggressiveness increases with the growth of the mass of halogen.

Thus, the corrosion resistance of the studied composite materials improves with the strengthening of their particles of titanium carbide and carbide-containing powdered ligatures of the Al-Ti-C system. However, unlike the 85 % Al-15 % (TiC) composite, samples with a different ligation compound exhibit absolute resistance in a 3,5 % NaCl solution. Pre-sintering slightly improves the corrosion resistance of 85 % Al-15% (TiC) composites, mainly due to the formation of a stronger contact between the matrix material and the reinforcing phase. In a solution of 3 % NaCl + ml/l HCl, these materials exhibit reduced resistance.

Key words: master alloy, titanium carbide, thermal synthesis, compositee, hot forging, strength, hardness, wear resistance, corrosion resistance.

Мікроструктура та властивості гарячештампованих алюмінієвих композитів з карбідомісткою лігатурою та карбідом титану

Ю.О. Шишкіна, Г.А. Баглюк

Інститут проблем матеріалознавства Національної академії наук України ім. І.М. Францевича, Київ, Україна

Методом гарячого штампування з використанням синтезованих лігатур системи Al-Ti-C отримані алюмоматричні композиційні матеріали з карбідомісткою зміцнюючою фазою та карбідом титану, для порівняння їх

фізико-механічних властивостей. Встановлено, що композити системи «Al-карбідовмістка лігатура» мають вищі значення твердості, границі міцності та текучості, а також мають абсолютну корозійну стійкість у 3,5 %-вому розчині NaCl. Проте, композити 85 % Al-15 % (TiC) зберігають досить високі значення пластичності - у два рази більші ніж для матеріалів з лігатурою системи Al-Ti-C. Триботехнічні випробування показали, що досліджувані матеріали у парі тертя зі сталлю У10 зазнають значних пошкоджень у результаті реалізації адгезійного механізму зношування.

Вступ

Останнім часом алюмоматричні композиційні матеріали (АМКМ), зміцнені дисперсними високимодульними з'єднаннями, отримали широке розповсюдження. В літературі детально розглянуті питання щодо взаємодії алюмінію та його сплавів з різноманітними зміцнюючими фазами [1-4] та відмічається, що карбід титану є однією з найперспективніших добавок внаслідок його високої твердості, модуля пружності, низької питомої ваги. Крім того, параметри ґратки TiC близькі до параметрів ґратки твердого розчину алюмінію [5-7].

Зміцнюючі частки у АМКМ зазвичай вводять або їх механічним змішуванням з порошком алюмінію (при використанні методів порошкової металургії), або прямим введенням в розплав алюмінію. Однак, такі методи не дозволяють в повному обсязі реалізувати можливості дисперсного зміцнення внаслідок того, що карбід титану та більшість керамічних з'єднань (B_4C , SiC, TiB_2), що найчастіше використовують, активно взаємодіють з розплавом алюмінію при ливарних методах отримання композитів, або під час термічної обробки, наприклад, порошкових композитів. Кращим є спосіб введення зміцнюючих фаз до матричного алюмінію в якості лігатур системи Al-Ti-C [8, 9], синтезованих в результаті in-situ реакції між Al, Ti і вуглецем, в результаті якої утворюються дисперсні частинки карбиду титану.

Серед методів отримання АМКМ перевага надається методам порошкової металургії. Найменш дослідженим серед них є гаряче штампування (ГШ) пористих матеріалів. Більшість статей на цю тему присвячена штампуванню алюмінієвих сплавів зміцнених Al_2O_3 та SiC [10-14]. До того ж, ГШ технологічно та економічно вигідний метод, що дозволяє одразу отримувати деталі заданої форми з високими механічними характеристиками.

Отже, метою даної роботи є встановлення основних фізико-механічних та експлуатаційних властивостей гарячештапованих алюмінієвих композитів, зміцнених карбідомісткою лігатурою та карбідом титану.

Матеріали і методи дослідження

Для отримання алюмоматричних композиційних матеріалів, зміцнених карбідомісткою ліга-

турою та TiC використовували порошки алюмінію (ПА-4, ГОСТ 6058-73, розмір зерна 40 мкм), титану (ПТХ-80, ТУ48-10-78-83, розмір зерна 80 мкм), вуглецю (лампова сажа, розмір зерна < 20 мкм), а також порошок карбиду титану (ТУ 1798-111-75420116-2006, розмір зерна 40 мкм).

Для оцінки впливу співвідношення компонентів лігатури на структуру і властивості отриманих з її використанням композитів були синтезовані три варіанти лігатур із шихти, що вміщали 20, 45 та 40 % (мас.) алюмінію. Крім того, вміст вуглецю у кожній вихідній шихті вибирався таким чином, щоб забезпечити отримання після синтезу стехіометричного ($45Al-11C-44Ti$ (% мас.), $20Al-16C-64Ti$ (% мас.)) та нестехіометричного ($40Al-6C-54Ti$ (% мас.)) карбиду титану.

Термічний синтез лігатур проводили за наступною технологічною схемою. Вихідні порошкові шихти змішували в барабанному змішувачі у спирті. З суміші порошоків були зроблені навіски (виходячи з об'єму робочої порожнини прес-форми та насипної щільності порошку). Пресування заготовок проводилося на гідравлічному пресі (ГП60), при навантаженні 500 МПа. Отримані брикети спікали в герметичній камері, заповненій технічно чистим аргоном, на установці непрямого індукційного нагрівання при температурі 950 °С.

Після термічного синтезу брикети розмелювали в планетарному млині протягом 5 – 15 хв., в результаті чого отримували порошок відповідної лігатури.

Дисперсність частинок розмелюваної суміші контролювали за допомогою ситового аналізу. Критерієм оцінки ступеню розмелювання суміші була наявність в ній переважної кількості частинок із середнім розміром до 10 мкм.

Виготовлення експериментальних зразків композитів проводили за такою схемою: порошок алюмінію і 15 % (мас.) лігатури, або карбиду титану змішували в планетарному млині протягом 7,5 хв. Співвідношення маси порошку і розмелених куль в даному випадку складало 1:5.

Надалі отриману порошкову шихту пресували під тиском 550 МПа в заготовки Ø 40 мм та висотою 12 мм, спресовані заготовки спікали у аргоні при температурі 600 °С протягом однієї години та надавали гарячому штампуванню на дугостаторному пресі в напівзакритому штампі.

Із отриманих поковок вирізали відповідні темплети для проведення дослідження механічних характеристик композитів (твердість, міцність на розрив, пластичність). Також проводили визначення триботехнічних характеристик матеріалу та дослідження корозійної стійкості. Мікроструктуру отриманих лігатур і композитів досліджували за допомогою металографічного мікроскопу XJL-17AT і за допомогою електронного мікроскопа JEOL SUPERPRO-733. Травлення зразків проводили в 40 %-вому розчині NaOH. Рентгенофазовий аналіз зразків проводили на дифрактометрі ДРОН-3М. 2D і 3D профілі поверхні, товщина, кількісні та якісні характеристики поверхні зразків визначались за допомогою безконтактного інтерференційного 3D профілографу «Мікрон - альфа» фірми «Мікрон-система». Випробування проводилися в парі з кругом зі сталі У10 за ДСТУ 2823-94 на машині торцевого тертя.

Результати та їх обговорення

В результаті термічного синтезу лігатур із порошкових сумішей, що містили алюміній, титан та вуглець, вихідні брикети перетворилися на досить міцні, але розділені на прошарки спеки. До того ж, після спікання спостерігався помітний об'ємне різностання пресовок, що супроводжувалося утворенням макропор та раковин.

Результати мікроструктурного аналізу (рис. 1) показали наявність в структурі синтезованих лігатур досить рівномірно розподілених у сірій металевій матриці світлих частинок зміцнюючої фази різної дисперсності та форми.

Структура, де наявні сірі області, оточені дисперсними сферичними частинками, характерна для зразків, які змішували з урахуванням стехіометрії карбіду титану (рис. 1, а, б). У цих зразках із максимальним вмістом вуглецю світлі дисперсні частинки рівномірно розподілені за обсягом і розташовані досить щільно одна до одної. У зразках з найменшим вмістом вуглецю, отриманих із суміші складу

40Al-6C-54Ti (% мас.) світлі включення виглядають як разорієнтовані витягнуті голкоподібні зерна (рис. 1, в).

Фазовий склад лігатур після синтезу наведено у таблиці 1. Слід відмітити, що в зразку складом 40Al-6C-54Ti (% мас.) відмічається наявність складного карбіду Ti_3AlC , а алюміній переходить у інтерметаліди.

Таблиця 1.

Фазовий склад лігатур системи Al-Ti-C після термічного синтезу при 950 °C

№	Склад, % (мас.)	Фазовий склад за РФА
1	20Al-16C-64Ti	TiC, Al, Al_5Ti_3 , $AlTi_3$, Al_2Ti
2	45Al-11C-44Ti	TiC, Al, $AlTi_3$, Al_2Ti
3	40Al-6C-54Ti	TiC, Al, Al_5Ti_3 , Al_3Ti , Ti_3AlC

Розмелі в планетарному млині лігатура складу 45Al-44Ti-11C (% мас.) виявив значну пластичність матеріалу через велику кількість алюмінію, що не прореагував. Після 20 хв. розмелу розмір отриманих часточок порошку складав 80 - 100 мкм, у той час як при розмелі лігатури 20Al-16C-64Ti (% мас.), 40Al-6C-54Ti (% мас.) уже через 10 хв. розмір часток не перевищував $6 \div 10$ мкм і при подальшому збільшенні часу обробки істотно не змінювався. Для лігатури 40Al-6C-54Ti (% мас.) її крихіткість пояснюється переважно інтерметалідною структурою.

Дослідження зразків, отриманих після гарячого штампування пористих заготовок із суміші порошків алюмінію, відповідної лігатури та карбіду титану, показали, що мікроструктура композитів характеризується наявністю чітко виражених двох фаз: основою є матриця з алюмінію, у якій розподілені агломерати лігатури розміром від 5 до 100 мкм (темні включення), (рис. 2, а, б, в), та TiC (рис. 2, г).

Результати дослідження основних механічних властивостей гарячештапованих алюмоматричних композитів наведено на рисунку 3. Якщо ма-

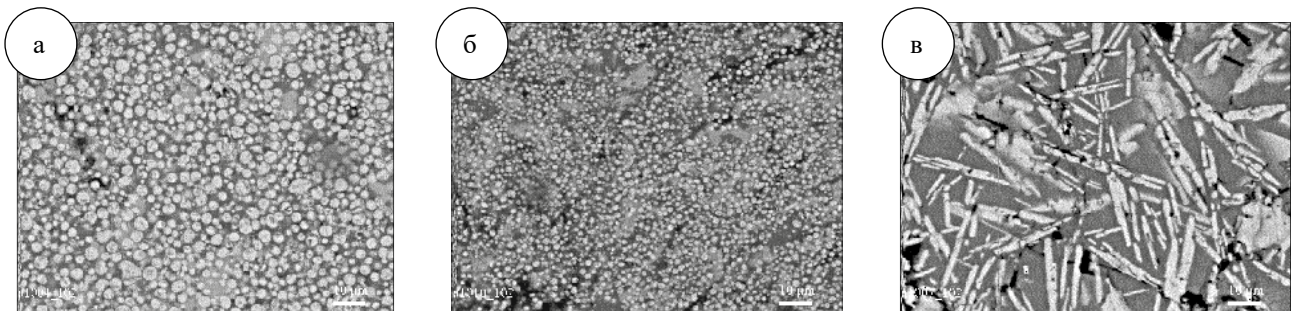


Рис. 1. СЕМ зображення лігатури системи Al-Ti-C після синтезу: а – 45Al-11C-44Ti (% мас.); б – 20Al-16C-64Ti (% мас.), в - 40Al-6C-54Ti (% мас.)

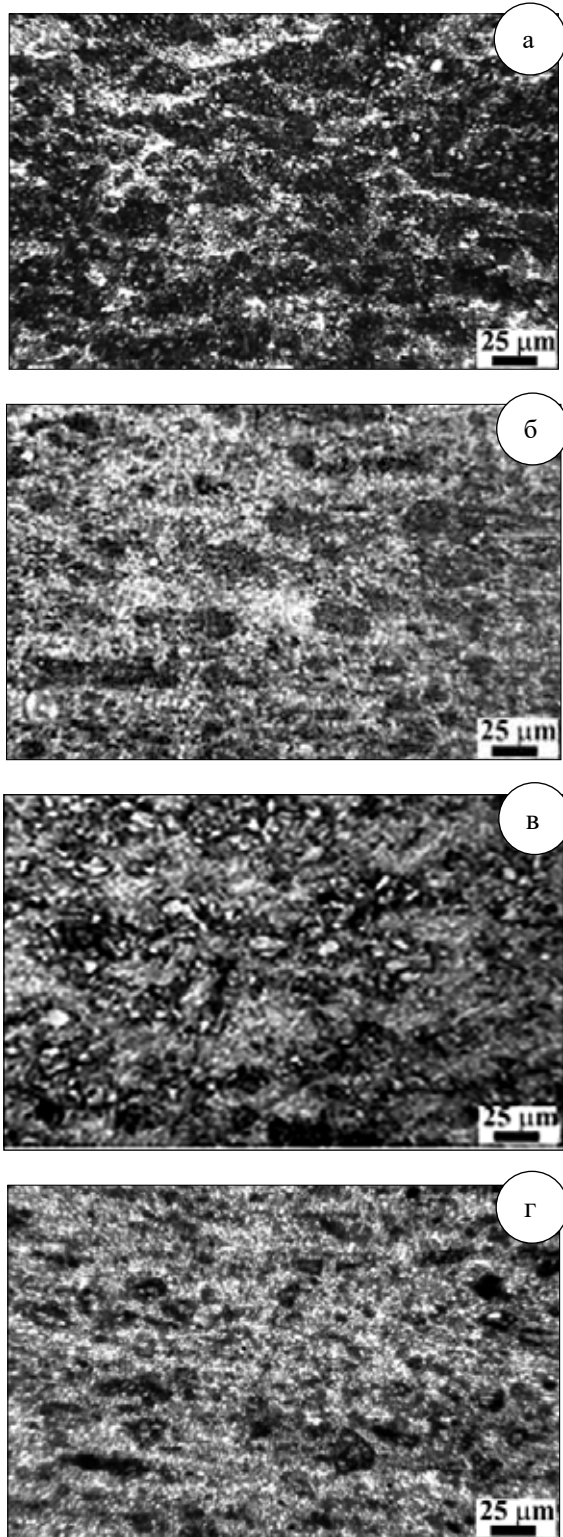


Рис. 2. Мікроструктура алюмінієвих композитів після спікання та гарячого штампування:
 а – 85 % Al-15 % (20Al-16C-64Ti),
 б – 85 % Al-15 % (45Al-11C-44Ti),
 в – 85 % Al-15 % (40Al-6C-54Ti),
 г – 85 % Al-15 % (TiC)

теріали отримані з використанням лігатур складу 40Al-6C-54Ti (% мас.) та 45Al-11C-44Ti (% мас.) при однаковому вмісті лігатури в шихті відрізняються між собою несуттєво, то міцність і твердість композиту, отриманого з використанням шихти складу 20Al-16C-64Ti (% мас.) за тих же умов практично завжди перевищують відповідні характеристики композитів з лігатурами 40Al-6C-54Ti (% мас.) та лігатурами 45Al-11C-44Ti (% мас.), а пластичність, навпаки – має дещо нижчі значення, бо кількість TiC при однаковому вмісті лігатури в шихті для матеріалів з лігатурами 40Al-6C-54 (% мас.) та 45Al-11C-44Ti (% мас.) відрізняються несуттєво, тоді як в разі використання аналогічних складів композитів з лігатурою – 20Al-16C-64Ti (% мас.) загальний вміст карбіду титану в матеріалі збільшується майже на чверть.

Враховуючи дані, що приведені вище (рис. 3) для композитів, з лігатурами, видно що, АМКМ з карбідом титану мають значно нижчі показники, при однаковому вмісті зміцнюючої фази і наближаються до характеристик композитів з лігатурою нестехіометричного складу за карбідом титану 40Al-6C-54Ti (% мас.).

З метою дослідження впливу зміцнюючої лігатури системи Al-Ti-C та часток карбіду титану на зносостійкість алюмоматричних композиційних матеріалів, отриманих гарячою штамповкою, були проведені триботехнічні випробування зразків у парі зі сталлю У10.

У таблиці 2 наведені значення масового зношування та коефіцієнту тертя в залежності від швидкості випробувань та навантаження для АМКМ з 15 % лігатури складу 20Al-16C-64Ti (% мас.) і карбідом титану. Для композитів складу 85 % Al-15 % (45Al-11C-44Ti), 85 % Al-15 % (40Al-6C-54Ti) дані отримати не вдалось. Підвищення навантаження і швидкості тертя дає поступове збільшення масового зношування. Композит 15 % TiC – 85 % Al працює при всіх швидкостях до навантаження в 0,7 МПа, за навантаженням в 1 МПа та швидкості 1 м/с починається його активна взаємодія з поверхнею контр-тіла, що призводить до значного підвищення значення масового зношування (таблиця 2), у той час як матеріал складу 15 % лігатури- 85 % Al працюють ще й при 1 МПа і швидкості 3 м/с, хоча при цих значеннях вже помітно, що й поверхня зразка, зміцненого лігатурою, починає взаємодіяти з контр-тілом.

Значення коефіцієнту тертя загалом навпаки зменшується при підвищенні навантаження, так само як і для композитів з карбідом титану. Мінімальні коефіцієнт тертя 0,29 при навантаженні 0,7 МПа і швидкості 4 м/с зафіксовано для зразків 85 % Al-15 % (20Al-16C-64Ti). Для композиту 15 % TiC – 85 % Al

Таблиця 2.

Залежність масового зношування та коефіцієнта тертя, для композитів, зміцнених лігатурою складу 20Al-16C-64Ti (% мас.) і TiC від швидкості ковзання та навантаження

P, МПа	V, м/с	Масове зношування, Im, мг/км		Коефіцієнт тертя, μ	
		85% Al-15% (20Al-16C-64Ti)	85% Al-15% (TiC)	85% Al-15% (20Al-16C-64Ti)	85% Al-15% (TiC)
0,4	1	5,9	9,55	0,43	0,6
	2	13,05	14,7	0,39	0,5
	3	12,95	14,9	0,33	0,37
	4	12,49	15,27	0,31	0,4
0,7	1	10	15,55	0,46	0,52
	2	11	17,6	0,35	0,44
	3	15,2	19	0,31	0,41
	4	15,6	19,7	0,29	0,37
1	1	20,8	90,75	0,37	0,38
	2	29,9	-	0,38	-
	3	19,45	-	0,6	-

найменше значення коефіцієнту тертя 0,37 встановлено при навантаженні 0,7 МПа та швидкості 4 м/с.

Сліди пластичної деформації добре помітно на зображенні структури зразків після тертя (рис. 4, а, в) та профілограмах (рис. 4, б, г). Поверхня композиту 85 % Al-15 % (20Al-16C-64Ti) характеризується досить різким перепадом по висоті виступів і западин, що видно з 2D профілю (рис. 4, а).

Це свідчить про те, що в результаті тертя відбулось відшарування значної кількості матеріалу з поверхні зразка. У випадку композиту 85 % Al-15 % (TiC), нерівності що утворились на поверхні тертя теж мають досить різкі перерпади між виступами та западинами, але характер 2D та 3D профілів зовсім інший (рис. 4, в, г) і свідчить про викришування часток карбиду титану. На зображенні поверхні тертя зразків складу 85 % Al-15 % (20Al-16C-64Ti), (рис. 4, а), після спікання та гарячої штамповки з'являються характерні борозди тертя, що свідчить про більшу міцність цього матеріалу в порівнянні з складу 15 % TiC-75 % Al, що добре співвідноситься з механічними властивостями даних матеріалів (рис. 3).

Таким чином було виявлено що, досліджувані матеріали у парі тертя зі сталлю У10 зазнають значних пошкоджень у результаті реалізації адгезійного механізму зношування.

Дослідження корозійної стійкості матеріалів проводили у 3,5 %-вому розчині NaCl та у 3 %-вому

NaCl + мл/л HCl за кімнатної температури прискореним методом. Результати досліджень показали (таблиця 3), що корозійна стійкість алюмоматричних композитів, зміцнених 15 % лігатури різного складу та карбідом титану перевищує стійкість алюмінію та сплаву Д16 у 3,5 %-вому розчині NaCl. Так, стійкість проти корозії композитів з TiC 3 бали (дуже стійкі). У випадку композитів системи Al-лігатура стійкість проти корозії становить 1 бал (абсолютно стійкі) незалежно від фазового складу лігатури. Така відмінність між матеріалами говорить про те, що алюмініди титану, які утворюються під час термічного синтезу лігатури разом з карбідом титану, у даному випадку мають позитивний вплив на корозійну стійкість композитів системи 15 % лігатура різного складу – 85 % Al, у той час як композити 85 % Al-15 % (TiC) хоч слабо, але кородують.

У розчині 3 %-вого NaCl + мл/л HCl майже всі досліджувані гарячештамовані алюмоматричні композиційні матеріали відносяться до групи малостійких або понижено стійких. Для матеріалів складу 15 % TiC – 85 % корозійна стійкість зменшується до 9-того балу, що переводить їх до групи нестійких. Таке значне падіння корозійної стійкості в другому розчині пояснюється тим, що кислоти, як і луги, руйнують окисну плівку на алюмінії, і метал розчиняється. Особливо це стосується кислот, що

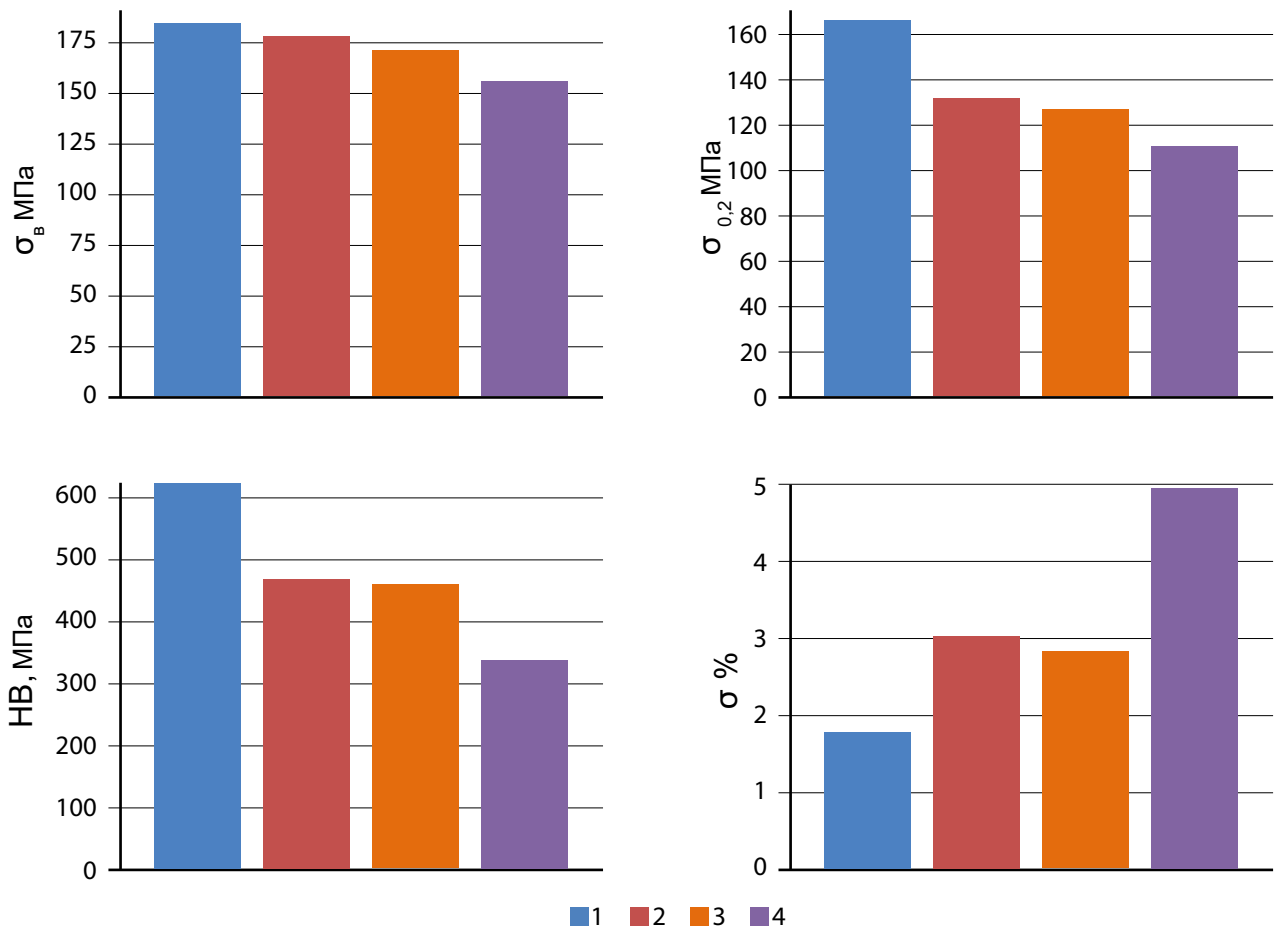
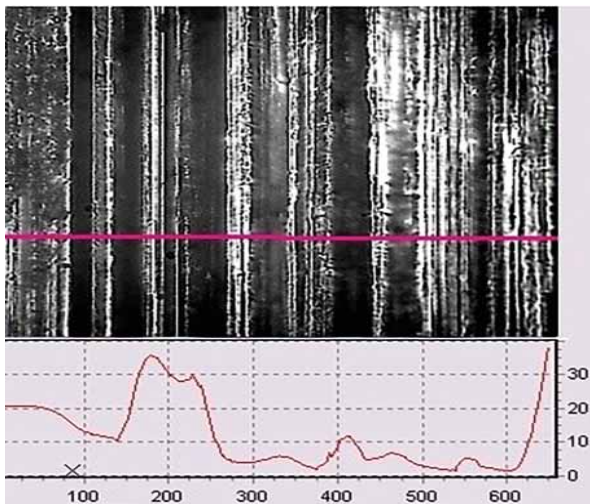


Рис. 3. Основні механічні характеристики гарячештамованих АМКМ:
 1 – 85 % Al-15 % (20Al-16C-64Ti), 2 – 85 % Al-15 % (45Al-11C-44Ti),
 3 – 85 % Al-15 % (40Al-6C-54Ti), 4 – 85 % Al-15 % (TiC)

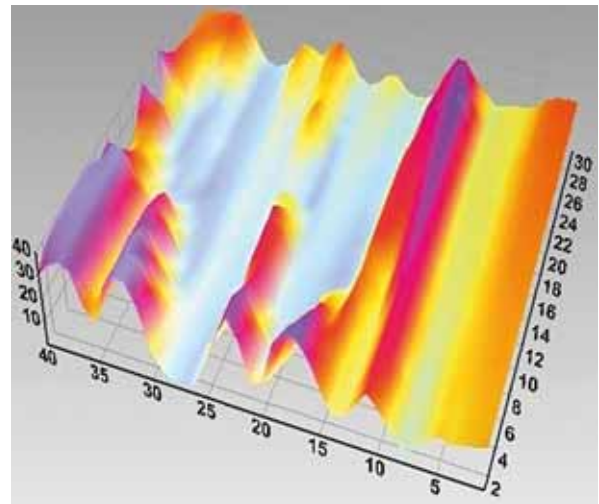
Таблиця 3.

Корозійна стійкість алюмоматричних композиційних матеріалів, отриманих гарячою штамповкою в порівнянні з алюмінієм та сплавом Д16

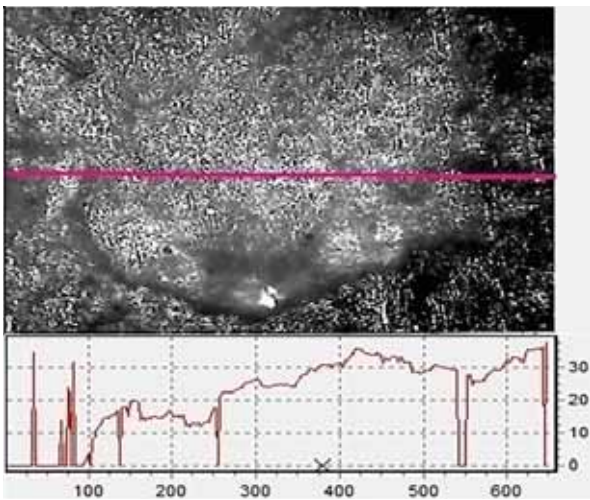
Склад матеріалу, % (об)		Корозійні властивості			
		3,5%-вий NaCl		3%-вий NaCl + мл/л HCl	
		П, мм/рік	Бал*	П, мм/рік	Бал
Слікання+ГШ	85% Al-15% (40Al-6C-54Ti)	-	1	1,71	7
	85% Al-15% (45Al-11C-44Ti)	-	1	2,25	7
	85% Al-15% (20Al-16C-64Ti)	-	1	0,95	7
	85% Al-15% (TiC)	0,014	3	10,20	9
Литі	Al	0,67	6	1,304	7
	Д16	0,63	6	0,71	6



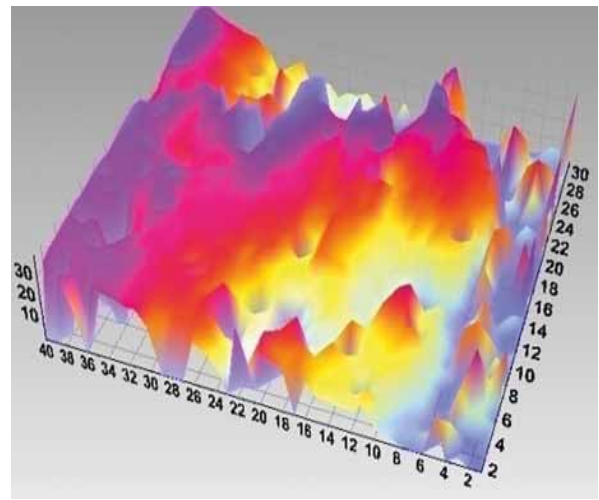
а



б



в



г

Рис. 4. Зображення мікроструктури поверхні тертя та 2D і 3D-профілів композитів, після випробувань на зносостійкість при швидкості 3 м/с та навантаженні 1 МПа (а, б) та швидкості 1 м/с та навантаженні 1 МПа (в, г): а, б – 85 % Al-15 % (20Al-16C-64Ti); в, г – 85 % Al-15 % (TiC)

містять галогени (соляна, сірчана, фтористоводнева кислоти) - агресивність їх зростає із зростанням маси галогену [15].

Таким чином, корозійна стійкість досліджуваних композиційних матеріалів покращується при зміцненні їх частками карбіду титану та карбідовмісткої порошкової лігатури системи Al-Ti-C. Але на відміну від композиту 85 % Al-15 % (TiC), зразки з лігатурою різного складу демонструють абсолютну стійкість у 3,5 %-вому розчині NaCl. Попереднє спікання дещо покращує корозійну стійкість композитів складу 85 % Al-15 % (TiC), переважно завдяки утворенню більш міцного контакту між матричною

матеріалом та зміцнюючою фазою. У розчині 3 %-вого NaCl + мл/л HCl ці матеріали демонструють пониженою стійкістю.

Висновки

У статті наведено дані структурного і фазового аналізу лігатур, отриманих термічним синтезом з порошкових сумішей системи Al-Ti-C трьох складів. Показано, що в залежності від співвідношення вмістів титану і вуглецю в суміші при її нагріванні відбувається *in-situ* виділення дисперсних часток карбіду титану або складних карбідів титану-алюмінію.

Для порівняння фізико-механічних властивостей методом гарячого штампування отримані алюмоматричні композиційні матеріали з карбидовмісткою зміцнюючою фазою та з карбідом титану. Встановлено, що композити системи «Al-карбидовмістка лігатура» мають вищі значення твердості, границі міцності та текучості. Так, наприклад, для зразків 85 % Al-15 % (20Al-16C-64Ti) значення твердості становлять 627 МПа, у той час як для композитів 85 % Al-15 % (TiC) – 338 МПа. Проте, останні зберігають досить високі значення пластичності - у два рази більші ніж для матеріалів з лігатурою системи Al-Ti-C. Це пояснюється наявністю у складі карбидовміскої лігатури невеликої кількості різноманітних алюмінідів титану, що утворюються разом з карбідом титану під час синтезу. Вони ж дозволяють значно підвищити корозійну стійкість досліджуваних матеріалів у 3,5 %-вому розчині NaCl в порівнянні з композитом складу 85 % Al-15 % (TiC).

Триботехнічні випробування показали, що досліджувані матеріали у парі тертя зі сталлю У10 зазнають значних пошкоджень у результаті реалізації адгезійного механізму зношування. Слід зазначити, що для композитів складу 85 % Al-15 % (45Al-11C-44Ti), 85 % Al-15 % (40Al-6C-54Ti) не вдалось отримати дані навіть за мінімальним навантаженням та швидкості тертя.

References

1. *Lloyd, D.J.* Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites / D.J Lloyd // International Materials Reviews. – 1994. – Vol. 39. – No. 1. – P. 1-23.
2. *Balci, Ö.* Influence of TiB₂ particle size on the microstructure and properties of Al matrix composites prepared via mechanical alloying and pressureless sintering / Ö. Balci, D. Ağaoğulları, H. Gökçe, I. Duman, M.L.Öveçoğlu // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 142. – P. 78-84.
3. *Коновалов, В.П.* Термодинамические аспекты процесса взаимодействия тугоплавких соединений с металлическими расплавами / В.П. Коновалов, А.Д. Панасюк, В.А. Лавренко // Порошковая металлургия. – 2011. – №. 3-4. – С. 132-143.
4. *Viala, J.C.* Chemical compatibility between aluminium base matrices and light refractory carbide reinforcements / J.C. Viala, M. Peronnet, F. Bosselet, J. Bouix // ICCM12. Cambridge, UK. – 1999. – P. 739-747.
5. *Кипарисов, С.С.* Карбид титана: получение, свойства, применения / С.С. Кипарисов, Ю.В. Левинский, А.П. Петров. – М.: Металлургия. – 1987. – 216 с.
6. *Samer, N.* Microstructure and mechanical properties of an Al-TiC metalmatrix composite obtained by reactive synthesis / N. Samer, J. Andrieux, B. Gardiola, N. Karnatak // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2015. – Vol. 72. – P. 50-57.
7. *Mohapatra, S.* Fabrication of Al-TiC composites by hot consolidation technique: its microstructure and mechanical properties / S. Mohapatra, A.K. Chaubey, D.K. Mishra, S.K. Singh // Journal of Materials Research and Technology. – 2016. – Vol. 5. – No. 2. – P. 117-122.
8. *Selcuk, C.* Al – TiC composite made by the addition of master alloys pellets synthesised from reacted elemental powders / C. Selcuk, A.R. Kennedy // Materials Letters. – 2006. – Vol. 60. – No. 28. – P. 3364-3366.
9. Pat. №. 4751048 US, C22C 1/10. Process for forming metal second phase composites and product thereof / L. Christodoulou, D.C. Nagle, J.M. Brubacher Assignee: Martin Marietta Corporation, Bethesda, Md. – № 927032; filed 05.11.1986; date of patent 14.06.1988, Appl. № 662928.
10. *Özdemir, İ.* The effect of forging on the properties of particulate-SiC-reinforced aluminium-alloy composites / İ. Özdemir, Ü. Cöcen, K. Önel // Composites Science and Technology. – 2000. – Vol. 60. – No. 3. – P. 411-419.
11. *Awadallah, A.* Forging of discontinuously reinforced aluminum composites / A. Awadallah, J.J. Lewandowski // Metalworking: Bulk Forming. – 2013. – Vol. 14. – P. 366-373
12. *Baker, T.N.* Powder processing of AA6061 aluminium metal matrix composites using hot forging as means of consolidation / T.N. Baker, A.J. Gorton, Y. Song, M.H. Carvalho, T. Marcelo, H. Carvalhinhos // Powder metallurgy. – 1996. – Vol. 39. – No. 3. – P. 223-229.
13. *Dám, K.* Structural and mechanical characteristics of the Al-23Si-8Fe-5Mn alloy prepared by combination of centrifugal spraying and hot die forging / K. Dám, F. Průša, D. Vojtěch // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 610. – P. 197-202.
14. *Ceschini, L.* Forging of the AA2618/20 vol.% Al₂O₃p composite: Effects on microstructure and tensile properties / L. Ceschini, G. Minak, A. Morri // Composites Science and Technology. – 2009. – Vol. 69. – No. 11. – C. 1783-1789.
15. *Рачев, Х.* Справочник по коррозии / Х. Рачев, С. Стефанова, Н.И. Исаев, С.И. Нейковский. – М.: Мир. – 1982. – 520 с.