

Зносостійкість *in situ* композитів Ti—Si—Ga

К. О. Валуйська, І. Д. Горна, В. Т. Варченко,
М. Д. Бега, І. Ю. Окунь, Я. І. Євич, С. О. Фірстов

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: gid@ipms.kiev.ua

Вперше проведено дослідження триботехнічних властивостей in situ композитів системи Ti—Si—Ga. Показано, що сплави мають високу зносостійкість в жорстких умовах тертя без змазки в парі зі сталями Ст.45 та ШХ15 при високій швидкості ковзання (6 м/с). Сплав Ti—10Si—15Ga (% (ат.)) на основі інтерметалідної фази α_2 -Ti₃Ga демонструє більш високий спротив зносу у порівнянні зі сплавом Ti—5Si—15Ga (% (ат.)) на основі α -Ti матриці.

Ключові слова: титанові *in situ* композити, інтерметаліди титану, силіциї, трибологічні властивості.

В останні роки титанові сплави знаходять все більш широке застосування в різних галузях промисловості як конструкційні матеріали. Водночас добре відомо, що титанові сплави мають низьку зносостійкість через схильність до контактного схоплення та, як наслідок, до значного зношення і механічного пошкодження контактуючих поверхонь, це суттєво обмежує області їхнього використання [1—3].

Одним із шляхів підвищення трибологічних властивостей титанових сплавів є створення гетерофазних (композиційних) структур, в яких матриця та зміцнююча фаза (або фази) мають різні фізико-механічні характеристики [4]. До таких матеріалів можна віднести *in situ* композити на основі системи Ti—Si, зносостійкість яких із додатковим легуванням викликає інтерес дослідників в останній час [5—7], особливо це може стосуватися високотемпературних титанових сплавів. В роботах [4, 5] встановлено, що легування подвійного евтектичного сплаву Ti—Si алюмінієм покращує його триботехнічні характеристики завдяки зростанню об'ємної частки евтектики α -Ti + Ti₅Si₃ та зміні морфології частинок силіцидів.

Галій є другим після алюмінію легуючим елементом, що стабілізує модифікацію α -Ti, а в потрібній системі Ti—Si—Ga в широкому інтервалі концентрацій існують сплави з подвійними евтектиками β^* -Ti (α -Ti) + Ti₅Si₃ та α_2 -Ti₃Ga + Ti₅Si₃ [8, 9]. Сплави з евтектикою α_2 -Ti₃Ga + Ti₅Si₃, як сплави на основі інтерметаліду титану α_2 -Ti₃Ga, можуть мати переваги в порівнянні зі сплавами з металевою титановою матрицею завдяки більш високому інтервалу робочих температур, меншій щільності, підвищених жорсткості та стійкості до окиснення [10, 11].

Метою даної роботи є вивчення триботехнічних властивостей *in situ* композитів Ti—5Si—15Ga та Ti—10Si—15Ga*, до фазового складу яких можуть входити α -Ti та інтерметалідні фази Ti₅Si₃ і α_2 -Ti₃Ga.

*Тут і надалі склад композитів наведено в % (ат.).

Я. І. Євич, С. О. Фірстов, 2018

Матеріали та методи дослідження

Зливки масою до 100 г одержані з чистих матеріалів (йодидний титан — 99,97%, кремній КР1, олово — 99,99%, галій марки ГЛООО — 99,99%) методом дугової плавки з невитратним вольфрамовим електродом на мідному водоохолоджуваному піддоні в середовищі аргону, додатково очищеному розплавленим титановим геттером. Структуру і фазовий склад сплавів досліджували методами сканівної електронної мікроскопії (СЕМ) та рентгенівського аналізу.

Механічні властивості — модуль пружності E , границю пружності σ_y , границю міцності σ_p та стрілу прогину f визначали в випробуваннях на 3-точковий згин при кімнатній температурі. Твердість за Віккерсом (HV30) вимірювали при навантаженні 30 Н.

Дослідження антифрикційних властивостей проведено без змазки на машині тертя М-22М по схемі вал (контртіло)—вкладиш (матеріал) при навантаженні 20 Н та швидкостях ковзання 1, 2, 4 і 6 м/с. Шлях тертя складав 3 та 10 км. Тертя зразків проводили в парі із контртілами, виготовленими із Ст.45 та ШХ15. Вимірювання зміщення зразка (лінійне зношення) відносно контртіла (бази) записували автоматично на ПК.

Результати та їх обговорення

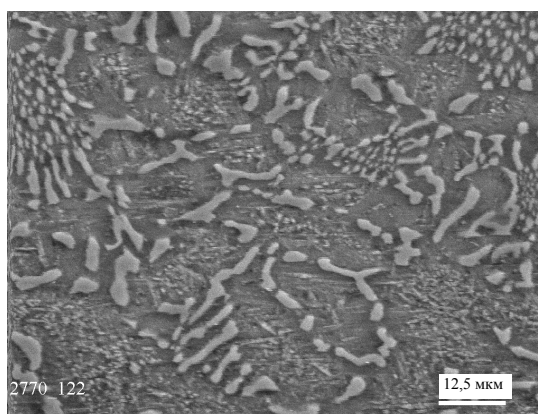
В таблиці наведено хімічний та фазовий склади, а також вибрані механічні властивості двох сплавів, що досліджували. Згідно з представленими даними, сплав Ti—5Si—15Ga має менші за значеннями твердість за Віккерсом і модуль пружності, але більшу максимальну міцність руйнування $\sigma_m = 1251$ МПа за повної відсутності пластичності у порівнянні із сплавом Ti—10Si—15Ga. Підвищення вмісту силіцію до 10% призводить до зниження міцності та невеликої пластифікації сплаву Ti—10Si—15Ga (у випробуваннях на згин стріла прогину f складає ~ 12 мкм).

На рис. 1 представлено мікрофотографії структури сплавів, отримані методом СЕМ. Сплав Ti—5Si—15Ga має типову доєвтектичну структуру, яка складається з дендритів β^* -перетвореного Ti (α -Ti) та евтектики β^* -Ti + Ti₅Si₃ (рис. 1, а). В середині дендритів спостерігаються невеличкі частинки інтерметалідної фази α_2 -Ti₃Ga. Зі збільшенням вмісту силіцію до 10% структура сплаву Ti—10Si—15Ga стає повністю евтектичною з евтектикою α_2 -Ti₃Ga + Ti₅Si₃, а матрицю сплаву утворює інтерметалідна фаза α_2 -Ti₃Ga (рис. 1, б).

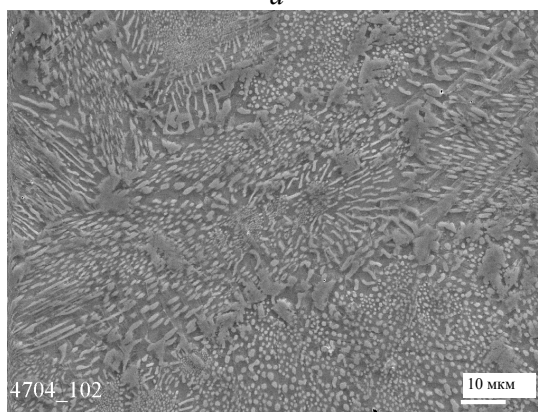
На першому роботі етапі проводили трибологічні випробування сплаву Ti—5Si—15Ga в парі зі сталями Ст.45 та ШХ15 зі швидкостями ковзання 1—6 м/с. На рис. 2 наведено СЕМ мікрофотографії поверхні тертя цього сплаву. Відмічається, що після тертя в парі зі Ст.45 поверхня тертя зразка виглядає частково вирівняною з помітними смугами ковзання та з чисельними ділянками схоплювання (рис. 2, а). В парі з ШХ15 поверхня тертя сплаву Ti—5Si—15Ga є більш вирівняною з помітними смугами ковзання, втім ділянок схоплювання спостерігається менша кількість (рис. 2, б). Також встановлено, що під час тертя спостерігали невеликі втрати маси контртіл — в середньому 0,7 мг/км в

парі зі Ст.45 та 1,1 мг/км в парі з ШХ15. До менших втрат маси контртіла із Ст.45 можуть привести як процеси більш інтенсивного схоплювання, **Хімічний та фазовий склади, фізико-механічні властивості сплавів Ti—5Si—15Ga та Ti—10Si—15Ga**

Склад, % (ат.)	Фазовий склад	HV30, ГПа	E , ГПа	σ_y , МПа	σ_m , МПа	f , мкм
Ti—5Si—15Ga	α -Ti + α_2 -Ti ₃ Ga + Ti ₅ Si ₃	5,2	142	1251	1251	0
Ti—10Si—15Ga	α_2 -Ti ₃ Ga + Ti ₅ Si ₃	5,6	146	796	833	12



a



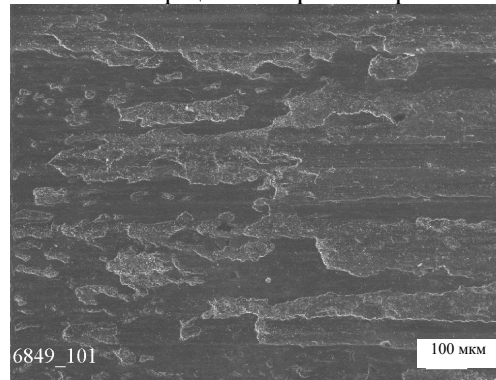
б

Рис. 1. СЕМ мікрофотографії структури литих сплавів Ti—5Si—15Ga (*a*) та Ti—10Si—15Ga (*б*).

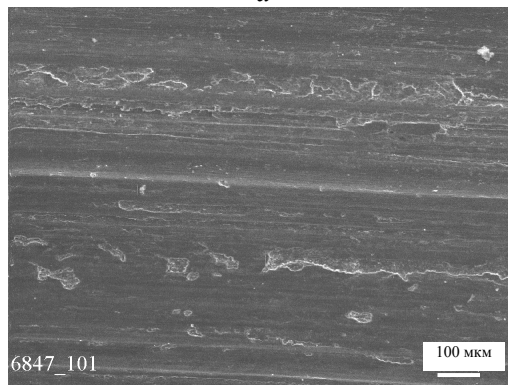
так і утворення на робочій поверхні оксидної плівки темного кольору за рахунок більш високої окиснювальної здатності у порівнянні із сталлю ШХ15 [12].

Визначені трибологічні властивості сплаву Ti—5Si—15Ga представлено на рис. 3. Відмічається, що швидкість ковзання впливає на коефіцієнт тертя та зміщення (лінійне зношення) сплаву Ti—5Si—15Ga. В парі зі Ст.45 зі швидкістю ковзання 1 м/с середнє значення коефіцієнта тертя найнижче — ~0,2 (рис. 3, *a*). Зі збільшенням швидкості до 2 м/с коефіцієнт тертя вдвічі підвищується — до ~0,4. Подальше зростання швидкості

ковзання до 6 м/с поступово приводить до зменшення коефіцієнта тертя до $\sim 0,3$. Середні значення коефіцієнта тертя в парі зі сталлю ШХ15 нижчі



a



б

Рис. 2 СЕМ мікрофотографії поверхонь тертя сплаву Ti—5Si—15Ga в парі зі сталлями Ст.45 (*a*) та ШХ15 (*б*).

за коефіцієнти тертя в парі зі сталлю Ст.45 (рис. 3, *б*). За малих швидкостей ковзання ~ 1 м/с коефіцієнт тертя складає $\sim 0,1$. З підвищенням швидкості ковзання до 2, 3 та 6 м/с коефіцієнт тертя майже не змінюється і дорівнює $\sim 0,15—0,2$. Зі збільшенням швидкості ковзання зменшується зношення сплаву Ti—5Si—15Ga в парі зі сталлю Ст.45 (рис. 3, *в*). В парі зі сталлю ШХ15 значне зміщення (зношення) сплав зазнає тільки під час ковзання зі швидкістю 1 м/с (рис. 3, *г*).

Встановлено, що коефіцієнт тертя сплаву Ti—5Si—15Ga в парі з ШХ15 менший, а зносостійкість більша, ніж в парі зі сталлю Ст.45. Досліджувані пари тертя добре працюють при високих швидкостях ковзання 4—6 м/с.

На другому етапі роботи досліджували зносостійкість евтектичного сплаву Ti—10Si—15Ga під час ковзання зі швидкістю 6 м/с в парі зі сталлю Ст.45, а шлях ковзання збільшили до 10 км (рис. 4). Під час випробувань на поверхні тертя зразка Ti—10Si—15Ga та контртіла також спостерігали появу оксидної плівки темного кольору.

Коефіцієнт тертя цього сплаву за вибраних умов дорівнював $\sim 0,2$ (рис. 4, *a*), що майже в 1,5 рази менше за значення коефіцієнта тертя

доевтектичного сплаву Ti—5Si—15Ga. Середнє значення зміщення (лінійного зносу) складало 13 мкм на шляху ковзання 10 км (рис. 3, б). В той же час зразок сплаву Ti—5Si—15Ga зношувався на шляху 3 км

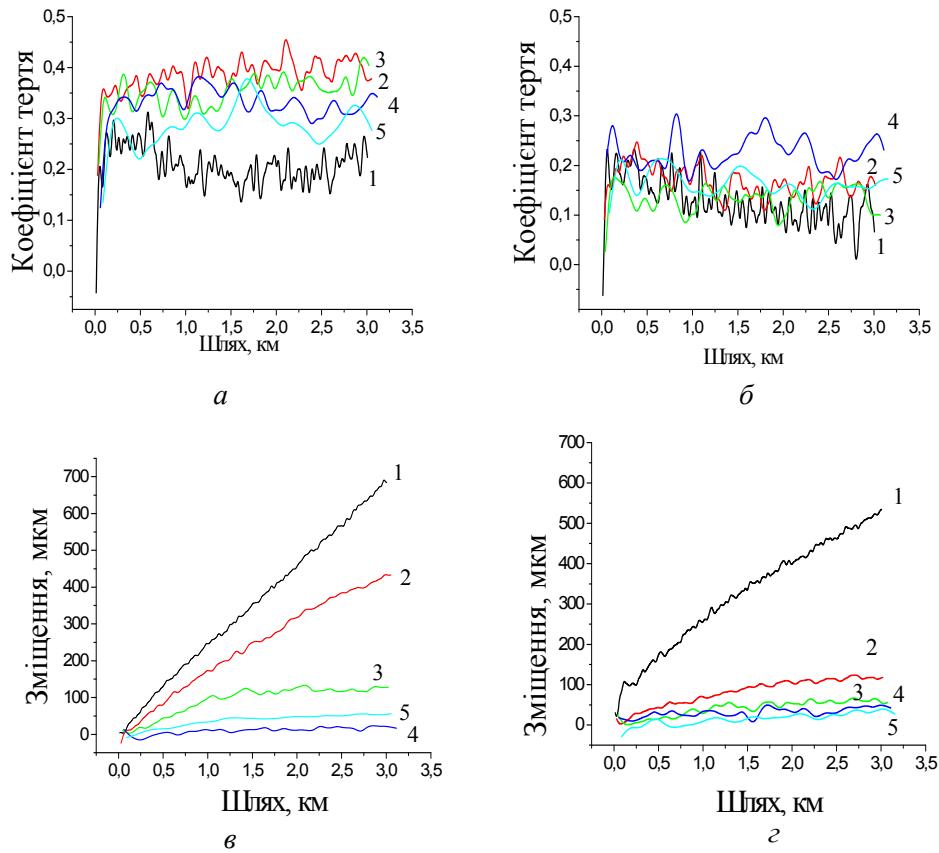


Рис. 3. Залежності коефіцієнта тертя (а, б) та зміщення (лінійного зносу) (в, г) сплаву Ti—5Si—15Ga від шляху ковзання в парі зі Ст.45 (а, в) та ШХ15 (б, г). Швидкість ковзання (м/с): 1 —1; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4 та 5—6.

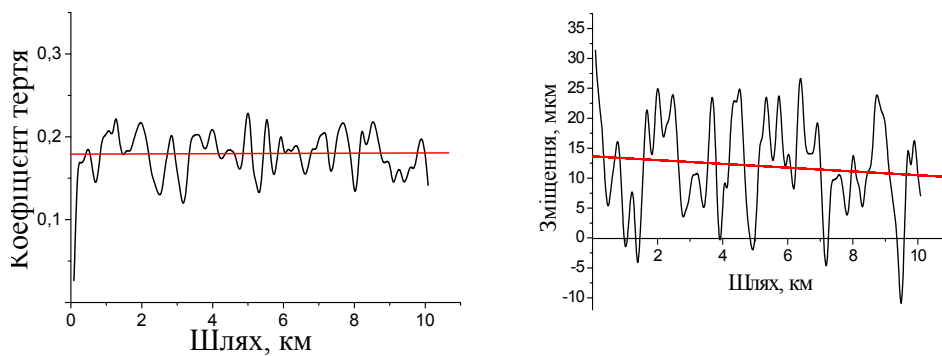


Рис. 4. Залежності коефіцієнта тертя (а) та зміщення (б) сплаву Ti—10Si—15Ga від шляху ковзання в парі зі сталлю Ст.45.

в середньому на 30—50 мкм (рис. 3, в). Слід відзначити, що спостерігаємо на рис. 4, б коливання зміни зміщення (явище релаксаційних коливань (автоколивань)) [13, 14] з урахуванням достатньо низької стійкості до окиснення сталі Ст.45 [12] може свідчити про процеси самозалічування та самоорганізації під час тертя сплавів, які досліджуються [14, 15].

Висновки

Вперше досліджено трибологічні властивості *in situ* композитів системи Ti—Si—Ga.

Показано, що евтектичні сплави системи Ti—Si—Ga в литому стані в жорстких умовах тертя без змащування мають малі коефіцієнти тертя (~0,2), причому сплав Ti—10Si—15Ga на основі інтерметаліду α_2 -Ti₃Ga має більшу зносостійкість у порівнянні із сплавом Ti—5Si—15Ga на основі титанової матриці α -Ti.

Встановлено явище релаксаційних коливань (автоколивань) під час тертя евтектичного сплаву Ti—10Si—15Ga в парі зі сталлю Ст.45, яке може свідчити про процеси самозалічування та самоорганізації структури і потребує подальшого вивчення.

1. Глазунов С. Г. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. — М. : Металлургия, 1974. — 308 с.
2. Титановые сплавы в машиностроении / Под ред. Г. И. Капырина. — Л. : Машиностроение, 1977. — 247 с.
3. Казанцев И. А. Износостойкость композиционных материалов на основе титана, полученных микродуговым оксидированием / [И. А. Казанцев, А. О. Кривенков, А. Е. Розен, С. Н. Чугунок] // Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. — 2008. — № 1. — С. 159—164.
4. Корнієнко А. О. Підвищення зносостійкості композиційних електродітичних покриттів шляхом зміцнення матриці модифікуванням наночастинками та термічною обробкою // Проблеми трибології. — 2009. — № 2. — С. 32—35.
5. Tkachenko S. Tribological properties of Ti—Si—Zr alloys / [S. Tkachenko, O. Datskevich, L. Kulak, H. Engqvist]. — Metal. Brno. Czech Republic, 2013. — 6 p.
6. Yongzhong Zhan. Microstructure and tribological behavior of Ti—Si eutectic alloys with Al addition / [Yongzhong Zhan, Zhengwen Yu, YingWang et al.] // Tribology Lett. — 2007. — 26, No. 1. — P. 25—31.
7. Tkachenko Serhii. The effect of Al addition on the tribological behavior of Ti—Si—Zr alloys / [Serhii Tkachenko, Oleg Datskevich, Leonid Kulak et al.] // J. Tribol. — 2019. — 141 (4). — (10 P.)—doi: 10.1115/1.4042098 .
8. Tretyachenko L. A. Phase equilibria in the Ti-Rich corner of the Ti—Si—Ga System / [L. A. Tretyachenko, N. V. Antonova, P. S. Martsenyuk, T. Ya. Velikanova] // J. Phase Equilibria. — 1999. — 20 (6). — P. 581—592.
9. Горпенко К. О. Структура і фізико-механічні властивості литих сплавів системи Ti—Si—Ga, багатих на титан / [К. О. Горпенко, І. Д. Горна, М. Д. Бега та ін.] // Электронная микроскопия и прочность материалов. — Киев : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2007. — Вып. 14. — С. 83—88.
10. Фирстов С. А. Интерметаллиды и материалы на их основе / С. А. Фирстов, И. Д. Горная // Неорганическое материаловедение: Энциклоп. изд. Т. 2. Кн. 1. — К. : Наук. думка, 2008. — С. 397—403.

11. *Westbrook J. H.* Basic mechanical properties and lattice defects of intermetallic compounds / J. H. Westbrook, R. L. Fleisher. — John Willy & Sons, LTD, 2000. — 249 p.
12. *Марочник стали и сплавов.* http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=207.
13. *Бершадский Л. И.* // Трение и износ. — 1992. — **13**, № 6. — С. 1077—1094.
14. *Бершадский Л. И.* Самоорганизация и надежность трибосистем. — Киев : Об-во “Знание” УССР, 1981. — 35 с.
15. *Костецкий Б. И.* Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. — 1985. — **6**, № 2. — С. 202—212.

Износостойкость *in situ* композитов Ti—Si—Ga

Е. А. Валуйская, И. Д. Горная, В. Т. Варченко,
Н. Д. Бега, И. Ю. Окунь, С. А. Фирстов

*Впервые проведено исследование триботехнических свойств *in situ* композитов системы Ti—Si—Ga. Показано, что сплавы обладают высокой износостойкостью в жестких условиях трения без смазки в паре со сталями Ст.45 и ШХ15 при высокой скорости скольжения (6 м / с). Сплав Ti—10Si—15Ga (% (ат.)) на основе интерметаллидной фазы α_2 -Ti₃Ga демонстрирует более высокое сопротивление износу по сравнению со сплавом Ti—5Si—15Ga (% (ат.)) на основе α -Ti матрицы.*

Ключевые слова: титановые *in situ* композиты, интерметаллиды титана, кремний, трибологические свойства.

Wear resistance of *in situ* composites Ti—Si—Ga

K. O. Valuiska, I. D. Gorna, V. T. Varchenko,
M. D. Bega, Ya. I. Yevich, I. Yu. Okun', S. O. Firstov

*The study of tribotechnical properties of *in situ* composites of the Ti—Si—Ga system was first done. It was shown that the alloys have high wear resistance under rigid friction conditions without lubrication in pairs with steels Ст.45 and ШХ15 under high slip speed (6 m / s). Alloy Ti—10Si—15Ga (% (at.)) based on the intermetallic phase of α_2 -Ti₃Ga had a higher wear resistance compared to the Ti—5Si—15Ga (% (at.)) alloy based on the α -Ti matrix.*

Keywords: titanium *in situ* composites, titanium intermetallics, silicon, tribological properties.