

УДК 669.017

Д-р техн. наук Мазур В. І., канд. техн. наук Бірюкович Л. О.  
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського»

## ВПЛИВ ВМІСТУ АЛЮМІНІЮ НА МІКРОСТРУКТУРУ І ФАЗОВИЙ СКЛАД СПЛАВІВ Ti-Si-Al ЕВТЕКТИЧНОГО ТИПУ

**Мета роботи.** Вивчення мікроструктури, фазового складу та параметрів кристалічної решітки фазових складових композиційних сплавів системи Ti-Si-Al, які вміщують такі (наступні) фази:  $\alpha$ -Ti,  $Ti_3Si_3$ , TiAl та  $Ti_3Al$ .

**Методи дослідження.** Растрова електронна мікроскопія, рентгенофазовий аналіз.

**Отримані результати.** В експериментальних сплавах зафіксовано утворення двох двофазних ( $\alpha$ -Ti +  $Ti_3Si_3$  та  $Ti_{2,9}Al_{2,1}$  +  $Ti_3Si_3$ ) евтектик і однієї трифазної ( $\alpha$ -Ti +  $\gamma$  +  $Ti_3(Si, Al)_3$ ). Визначено параметри кристалічних решіток і співвідношення часток фазових складових. Збільшення вмісту алюмінію в експериментальних сплавах призводить до зменшення об'єму елементарної комірки для  $\alpha$ -Ti та  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$  в результаті зменшення параметрів кристалічної решітки, і до збільшення для силіциду  $Ti_3Si_3$ .

**Наукова новизна.** Вперше встановлена можливість утворення альтернативних двофазних евтектик  $\alpha$ -Ti +  $Ti_3(Si, Al)_3$  та  $Ti_{2,9}Al_{2,1}$  +  $Ti_3Si_3$ . Визначено вплив вмісту алюмінію на закономірність зміни параметрів кристалічних решіток фазових складових експериментальних сплавів. Зі збільшенням вмісту алюмінію в евтектичних сплавах характерно збільшення доли первинного силіциду титану  $Ti_3(Si, Al)_3$  і появи інтерметалідів  $Ti_3Al$  та TiAl. Збільшення вмісту алюмінію призводить до значного зменшення параметрів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  та об'єму кристалічної комірки фаз  $\alpha$ - $Ti_3Al$  та  $\alpha$ -Ti і до збільшення цих параметрів фази  $Ti_3(Si, Al)_3$ .

**Практична цінність.** Визначено послідовність фазових реакцій у процесі структуроутворення сплавів. Виявлення евтектико-евтектоїдного процесу уможливило керування подрібненням структурних складових з метою підвищення тріщиностійкості сплавів в перебігу проектування технології для заданого сплаву.

**Ключові слова:** евтектика, мікроструктура, система Ti-Si-Al, фазовий склад.

### Вступ

Конструкційні сплави евтектичного типу на основі системи Ti-Si-Al принципово відрізняються від існуючих промислових титанових сплавів тим, що в них використовується додатковий механізм зміцнення титанової матриці внаслідок створення структури природного композиту, яка утворюється у результаті перебігу евтектичної кристалізації під час охолодження і рідкого сплаву [1–2].

При цьому легована титанова матриця пронизана волокнами або пластинами силіциду  $Ti_3Si_3$ , який характеризується високою міцністю за кімнатної та високих температур. Лабораторні, а також стендові моторні іспити форсованих дизельних двигунів, які було укомплектовано деталями циліндро-поршневої групи, виготовленими зі сплаву TiCAD, показали їх високу надійність у робочому циклі близькому до адіабатного з відключеним повітряним охолодженням циліндрів, в детонаційному режимі з використанням для робочої суміші повітря із домішками кварцового пилу [3], тобто в умовах одночасного знакозмінного механічного навантаження, високих робочих температур, агресивного середовища, абразивних домішок.

Сплави даної системи є достатньо перспективними для створення конструкційних матеріалів з вищим рівнем жароміцності та жаростійкості. Одним з можли-

вих напрямків є розробка композицій, які б додатково включали в якості армуючих ще й фази  $Ti_3Al$  та/або TiAl.

Зважаючи на те, що міцність, пластичність та інші службові характеристики є структурно-чутливими властивостями, важливо орієнтуватися, яку структуру отримують ливарні сплави із заданими концентраціями легуючих елементів. Однак, фазові діаграми таких складних систем будувалися з використанням компонентів високої чистоти. Інформація про вплив домішок, які мають у своєму складі компоненти, доступні на ринках України, є відсутня. Тому тема даної роботи, що присвячена вивченню впливу вмісту алюмінію промислової чистоти на мікроструктуру та параметри кристалічної решітки фазових складових в Ti-Si-Al сплавах є актуальною.

### Постановка задачі

Вивчити мікроструктуру, фазовий склад та параметри кристалічної решітки фазових складових композиційних сплавів системи Ti-Si-Al, які вміщують такі фази:  $\alpha$ -Ti,  $Ti_3(Si, Al)_3$ , TiAl та  $Ti_3Al$ .

### Огляд літератури

Цілеспрямований пошук конструкційних сплавів на базі системи Ti-Si-Al є можливим лише на підставі достовірної інформації про фазові рівноваги в очікуваному концентраційному інтервалі цих сплавів.

Перші структурні дослідження фазових рівноваг у титановому куті системи Ti-Si-Al було проведено в 1954 р. у температурному інтервалі до 1200 °C [5].

Але трикомпонентна діаграма, яка включала поверхні солідус і ліквідус, а також, рівноваги у твердому стані, була побудована лише в роботі [6]. Окрім того, в цій роботі було визначено кристалічну природу та розчинність легуючих елементів в основних проміжних фазах та твердих розчинах. Встановлено, що добавки алюмінію мало впливають на розчинність кремнію в  $\alpha$ -Ti, але зменшують його розчинність у  $\beta$ -Ti [6].

На рис. 1а подано поверхні ліквідус та солідус титанового кута фазової діаграми Ti-Si-Al. В нижній частині діаграми нанесено лінію тальвегу трифазної рівноваги  $e_1$  евтектичного типу з локальним температурним максимумом в районі 30 ат. % та точки  $U_1$  і  $U_2$  чотирифазних рівноваг перитектичного типу. Пунктиром показано поверхню солідус. Видно, що в області малих концентрацій кремнію розміщується область  $\beta$ -Ti, ширина якої зменшується зі збільшенням вмісту алюмінію, так що за 50 ат. % Al утворюється область твердого розчину на базі  $\alpha$ -Ti.

На рис. 1б видно, що за при 42 ат. % Al змінюється характер первинної кристалізації: реакція  $L \leftrightarrow L + (\beta\text{-Ti})$  змінюється на  $L \leftrightarrow L + \text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3$ . Тобто, це є границя між доевтектичними і заевтектичними сплавами.

Структура трифазної евтектики утворюється за реакцією  $L + \text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3 \rightarrow \alpha + \gamma + \text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3$ . Важливою особливістю заевтектичних сплавів є евтектоїдна реакція  $\alpha + \text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3 \rightarrow \alpha_2 + \gamma + \text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3$  в інтервалі концентрації кремнію 33–42 ат. %.

## Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є структура та фазовий склад зразків сплавів системи Ti-Si-Al із різною кількістю легуючих компонентів та домішок (табл. 1).

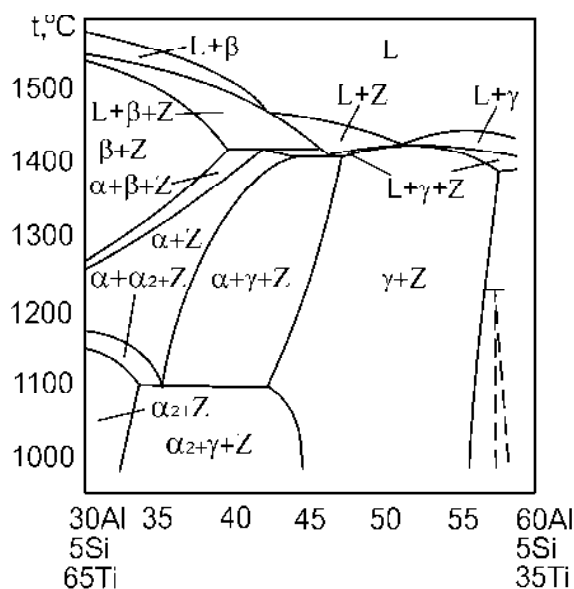
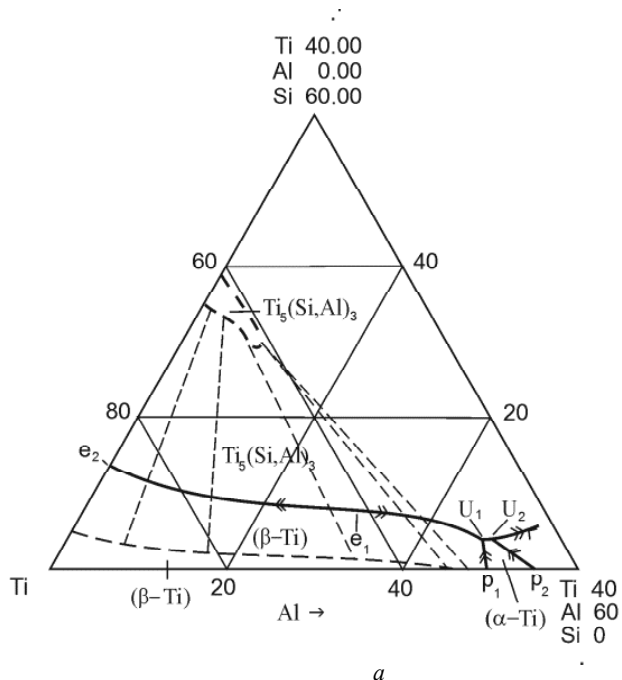
Сплави Ti-Si-Al було виплавлено вез у вакуумній печі дуговою плавкою неплавким вольфрамовим електродом на водо-охолоджуваному мідному поді в атмосфері очищеного аргону.

**Таблиця 1** – Хімічний склад експериментальних сплавів

Сплав	Хімічний склад, мас. %				
	Si	Al	Fe	Mn	Ti
1	6,7	4,0	0,18	0,07	основа
2	7,0	9,7	0,21	0,06	основа
3	6,3	14,6	0,17	0,08	основа
4	6,4	17,6	0,22	0,11	основа

## Експерименти

Дослідження мікроструктури та розподілу елементів між фазами сплаву проводили на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И фірми Selmі (Україна) з приставкою для енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу ЕДАР. Фазовий склад сплавів виявляли за допомогою рентгенівського дифрактометра UltimaIV фірми Rigaku (Японія) з використанням фірмового програмного забезпечення PDXL.



**Рис. 1.** Фазові діаграма Ti-Si-Al: а – поверхні ліквідус і солідус. Умовні позначки багатофазних рівноваг:  $e_1$ :  $L \leftrightarrow (\beta\text{-Ti}) + \text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3$ ;  $U_1$ :  $L + (\beta\text{-Ti}) \leftrightarrow (\alpha\text{-Ti}) + \text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3$ ;  $U_2$ :  $L + (\alpha\text{-Ti}) \leftrightarrow \text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3 + \gamma$  [4]; б – переріз діаграми Ti-Si-Al площинною Si = 5 ат. %. Z =  $\text{Ti}_5(\text{Si}, \text{Al})_3$  [6]

## Результати

На рисунку 2 зображено мікроструктура експериментальних сплавів. Вона є типовою для сплавів евтектичного типу і складається із первинного силіциду  $Ti_5(Si,Al)_3$  (рис. 1а–в), первинних кристалів  $\gamma$ -алюмініду  $\gamma$ -TiAl (рис. 1з) та двофазної ( $\alpha$ -Ti +  $Ti_5(Si,Al)_3$ ) і трифазної ( $\alpha$ -Ti +  $Ti_5(Si,Al)_3$  +  $\gamma$ -TiAl) евтектик – рис. 1.

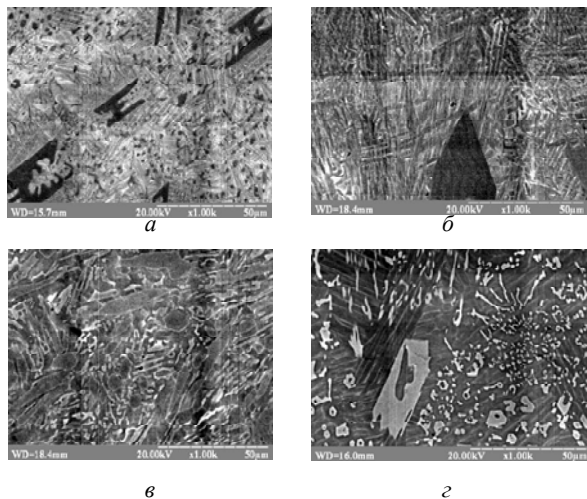


Рис. 2. Мікроструктура експериментальних сплавів системи Ti-Si-Al6:

а – сплав 1; б – сплав 2; в – сплав 3; г – сплав 4

За даними рентгеноструктурного аналізу (таблиці з переліком міжплосинних відстаней для кожного сплаву надано у Додатках А1–А5) експериментальні сплави складаються з таких фаз:  $\alpha$ -Ti (сплав 1а, дифрактограма – додаток А1),  $\alpha$ - $Ti_{2,9}Al_{2,1}$  (сплав 1б, дифрактограма – додаток А2),  $Ti_5(Si,Al)_3$ ,  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$  та  $\gamma$ -TiAl (табл. 2).

Кристалічна структура фаз  $\alpha$ - $Ti_3Al$  та  $\alpha$ - $Ti_{2,9}Al_{2,1}$ :  $DO_{19}$ , ГПУ упорядкована;  $\gamma$ -TiAl:  $L1_0$  тетрагональна упорядкована;  $\alpha$ -Ti: гексагональна;  $Ti_5Si_3$ : гексагональна.

Дані дифракційного аналізу кількісного співвідношення фаз наведені в табл. 3.

В сплавах 1а і 1б зафіксовано різне співвідношення між силіцидом  $Ti_5Si_3$  і  $\alpha$ -Ti та  $\alpha$ - $Ti_{2,9}Al_{2,1}$ . Це спричиняє різний ступінь евтектичності обох сплавів. Для пояснення цього явища необхідні додаткові дослідження. Але зважаючи на те, що дифрактограми обох фаз дуже близькі (Додаток А5), що обумовлює дуже близькі величини відповідних параметрів обох кристалічних решіток – з однієї сторони, а також існування двох альтернативних версій діаграм фазових рівноваг в системі Ti-Al (рис. 3), на одній з яких б-фаза утворює дві відокремлені фазові області – з іншої, можна припустити, що причиною є амфотерна природа алюмінію, який в залежності від природи сусіднього атому може змінювати характер донорно-акцепторної парної взаємодії. В цьому випадку ефекти металургійної спадковості можуть відігравати значну роль.

Таблиця 2 – Параметри кристалічної структури фазових складових

Сплав	Фаза	Просторова група	a, Å	b, Å	c, Å	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Об'єм V, Å <sup>3</sup>
1а	$\alpha$ -Ti	P6 <sub>3</sub> /mmc	2,9296	2,9296	4,6737	90	90	120	34,737
1б	$\alpha$ - $Ti_{2,9}Al_{2,1}$	P6 <sub>3</sub> /mmc	2,9288	2,9288	4,6734	90	90	120	34,717
2	$\alpha$ -Ti	P6 <sub>3</sub> /mmc	2,9151	2,9151	4,5454	90	90	120	33,44
3	$\alpha$ -Ti	P6 <sub>3</sub> /mmc	2,8968	2,8968	4,5676	90	90	120	33,194
1а	$Ti_5Si_3$	P6 <sub>3</sub> /mcm	7,4823	7,4823	5,1784	90	90	120	251,074
1б	$Ti_5Si_3$	P6 <sub>3</sub> /mcm	7,4835	7,4835	5,1793	90	90	120	251,203
2	$Ti_5Si_3$	P6 <sub>3</sub> /mcm	7,5092	7,5092	5,1945	90	90	120	253,66
3	$Ti_5Si_3$	P6 <sub>3</sub> /mcm	7,4950	7,4950	5,1956	90	90	120	252,83
4	$Ti_5Si_3$	P6 <sub>3</sub> /mcm	7,5172	7,5172	5,1957	90	90	120	254,24
2	$\alpha_2$ - $Ti_3Al$	P6 <sub>3</sub> /mmc	5,8082	5,8082	4,6579	90	90	120	136,08
3	$\alpha_2$ - $Ti_3Al$	P6 <sub>3</sub> /mmc	5,7774	5,7774	4,6294	90	90	120	133,82
4	$\alpha_2$ - $Ti_3Al$	P6 <sub>3</sub> /mmc	5,7491	5,7491	4,6166	90	90	120	132,145
4	$\gamma$ -TiAl	P4/mmm	2,8575	2,8575	4,0973	90	90	90	33,456

Таблиця 3 – Співвідношення фазових складових (мас. %) експериментальних сплавів

Сплав № → Фаза ↓	1а	1б	2	3	4
$\alpha$ -Ti	82,8	–	6,27	1,06	–
$\alpha$ - $Ti_{2,9}Al_{2,1}$	–	70,2	–	–	–
$Ti_5Si_3$	17,2	29,8	21,45	58,11	33,41
$\alpha_2$ - $Ti_3Al$	–	–	72,28	40,83	47,11
$\gamma$ -TiAl	–	–	–	–	19,48

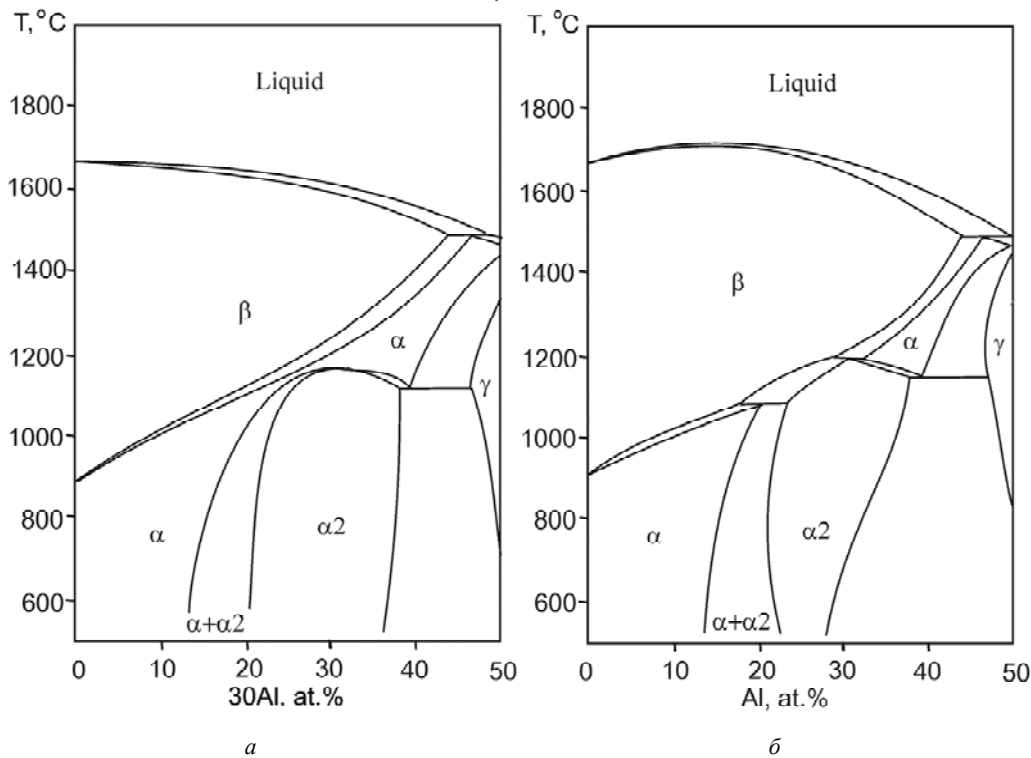


Рис. 3. Альтернативні версії фазової діаграми Ti-Al [7]: а – з однією областю  $\alpha$ - фази; б – з двома областями  $\alpha$ - фази

Згідно з фазовими діаграмами (рис. 1) і експериментальними даними утворення сплавів евтектичного типу відбувається у 4 етапи.

1. Зародження і ріст в рідині первинних кристалів  $Ti_5(Si, Al)_3$  та зміна концентрації рідкої фази в сторону евтектичної лінії.

2. Кристалізація двофазної евтектики  $L \rightarrow L + Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha-Ti$ .

3. Кристалізація трифазної евтектики  $L + Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha-Ti \rightarrow Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha-Ti + \gamma-TiAl$ .

4. Евтектоїдне перетворення за температур нижче  $1120\text{ }^\circ\text{C}$   $Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha-Ti + \gamma-TiAl \rightarrow Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha_2-Ti_3Al + \gamma-TiAl$  для сплавів з  $c_{Al} < 42\%$ , а в сплавах з більшою концентрацією алюмінію відбувається перетворення за схемою  $Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha-Ti + \gamma-TiAl \rightarrow Ti_5(Si, Al)_3 + \gamma-TiAl$ . В сплавах з концентрацією  $44\% > c_{Al} > 42\%$  можлива реакція  $Ti_5(Si, Al)_3 + \gamma-TiAl \rightarrow Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha_2-Ti_3Al + \gamma-TiAl$  не евтектоїдного типу, а в результаті різкого зменшення розчинності Al в  $\gamma-TiAl$  фазі, а можливо і в  $Ti_5(Si, Al)_3$  за температур нижче  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ .

На основі мікроаналізу сплаву №4 та роботи [6] на рис. 1а вузлова точка  $U_2$  відповідає чотирифазній рівновазі не перитектичного, а евтектичного типу:  $L \leftrightarrow Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha-Ti + \gamma-TiAl$ . Помилка можливо викликана тим, що автору розрахункової роботи [4] було невідомо про існування локального температурного максимуму на тальвегу трифазної рівноваги  $L \leftrightarrow Ti_5(Si, Al)_3 + \gamma-TiAl$  для 60 ат. % Ti. Тому напрям стрілки на лінії тальвегу справа від  $U_2$  потрібно змінити на зворотний.

Легування титан-кремнієвих сплавів алюмінієм у кількості більшій за 5 мас. % призводить до зміщення точки трифазної евтектичної рівноваги в область нижчого вмісту кремнію. Це стимулює збільшення частки первинних кристалів силіциду  $Ti_5(Si, Al)_3$ , які зберігаються до повного охолодження сплаву. З точки зору досягнення високих рівнів службових властивостей присутність великих кристалів цієї фази є не бажаним внаслідок великої твердості та крихкості цієї фази. Оскільки ці кристали з'являються у сплаві у першу чергу з розплаву зменшення їх розмірів можливе лише за рахунок зменшення концентрації кремнію у сплаві.

Як впливає із аналізу мікроструктур (рис. 1) в усіх сплавах зберігається тонко диференційована структура, характерна для евтектичних сплавів. Це означає, що в низькотемпературних твердофазних перетвореннях беруть участь  $\alpha$  та  $\gamma$ - фази саме евтектичного генезису. Це явище позитивне, тому що лінійний розмір дендритних відгалужень низькотемпературної  $\alpha_2$ - фази на декілька порядків може бути менше, ніж, наприклад, у структурі добре відомих  $\alpha_2 + \gamma$  сплавах типу дуплексних  $\gamma$ - алюмінідів.

Окремий інтерес викликають особливості мікроструктури трифазного евтектоїду  $Ti_5(Si, Al)_3 + \alpha_2-Ti_3Al + \gamma-TiAl$  (рис. 1б-г). Оскільки між високотемпературною і низькотемпературними фазами евтектоїдного генезису існують певні кристалографічні співвідношення – з одного боку, і, оскільки в межах евтектичної колонії евтектичні фази представляють безперервні гілки дендриту даної фази [8] – з іншого, то можна пояснити

ефект суміщення структурних картин первинної евтектичної і вторинної евтектоїдної структури, як це видно на рис. 1б–г.

По суті, тут реалізована ідея додаткового зміцнення за рахунок евтектоїдного перетворення, яке разом з евтектичним утворило цікавий продукт зі складною мікроструктурою – «композит в композиті». Оскільки закономірності обох типів перетворень добре відомі, то це дає основу успішного проектування конкретних технологій, які забезпечать необхідну тонку диференціацію кристалів фазових складових і тим самим покращать службові властивості, перш за все тріщиностійкість.

### Висновки

1. В сплаві № 1 зафіксовано можливість утворення однієї з двох ізоморфних фаз:  $\alpha$ -Ti та  $\alpha$ -Ti<sub>2,9</sub>Al<sub>2,1</sub> з близь-

кими параметрами кристалічних решіток. Проте масова частка цих фаз в двофазній евтектиці з силіцидом Ti<sub>5</sub>(Si, Al)<sub>3</sub> суттєво розрізняється.

2. В експериментальних сплавах зафіксовано утворення двох двофазних  $\alpha$ -Ti + Ti<sub>5</sub>(Si, Al)<sub>3</sub> та Ti<sub>2,9</sub>Al<sub>2,1</sub> + Ti<sub>5</sub>(Si, Al)<sub>3</sub> евтектик і однієї трифазної  $\alpha$ -Ti +  $\gamma$  + Ti<sub>5</sub>(Si, Al)<sub>3</sub>.

3. Зі збільшенням вмісту алюмінію в експериментальних сплавах параметри кристалічної решітки  $\alpha$ -Ti та  $\alpha$ -Ti<sub>3</sub>Al і об'єм елементарної комірки зменшуються, в той час, як в силіциді Ti<sub>5</sub>(Si, Al)<sub>3</sub> ці величини збільшуються.

4. Евтектоїдне перетворення  $(\alpha$ -Ti) +  $\gamma$  + Ti<sub>5</sub>(Si, Al)<sub>3</sub> →  $\alpha$ -Ti +  $\gamma$  + Ti<sub>5</sub>(Si, Al)<sub>3</sub> додатково подрібнює диференційованість фазових складових, що може бути використано у розробці технології функціональних сплавів з метою покращення їх службових властивостей.

### Додатки

#### Додаток А1. Міжплощинні відстані фазових складових сплава № 1а

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	Phasename
1	27.535	3.23671	17.9022	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,0,0)
2	29.4573	3.02972	17.7059	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,1)
3	34.6955	2.58335	8.31662	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (0,0,2)
4	35.415(15)	2.5325(10)	42(5)	$\alpha$ -Ti (1,0,0)
5	36.712(15)	2.4459(10)	78(6)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,0)
6	37.4348	2.40037	14.5574	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,0,2)
7	38.60(3)	2.3304(19)	54(5)	$\alpha$ -Ti (0,0,2)
8	40.523(9)	2.2243(5)	189(10)	$\alpha$ -Ti (1,0,1), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,1)
9	41.782(19)	2.1601(9)	44(5)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,0)
10	42.44(3)	2.1279(12)	32(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,2)
11	51.8301	1.7625	9.17998	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,1)
12	53.33(2)	1.7165(7)	37(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,0,2)
13	53.9664	1.69767	11.042	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,1)
14	56.7537	1.62073	8.38456	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,0,0)
15	61.06(6)	1.5162(13)	11(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,2)
16	62.8089	1.47825	11.4417	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,2)
17	63.50(3)	1.4638(5)	37(4)	$\alpha$ -Ti (1,1,0)
18	65.15(8)	1.4306(16)	9(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,2,1)
19	66.03(6)	1.4137(12)	15(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,0)
20	68.1913	1.37409	11.2648	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,0,2)
21	71.05(5)	1.3256(7)	23(3)	$\alpha$ -Ti (1,0,3)
22	72.9009	1.29649	7.66535	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,0,0)
23	74.727	1.26927	8.73438	$\alpha$ -Ti (2,0,0), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,3)
24	76.80(2)	1.2400(3)	29(4)	$\alpha$ -Ti (1,1,2), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,2)
25	77.85(3)	1.2260(4)	29(4)	$\alpha$ -Ti (2,0,1), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,2,0)
26	80.4939	1.19223	8.39067	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,2,1)
27	82.8(2)	1.165(2)	4.2(14)	$\alpha$ -Ti (0,0,4), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,0)
28	84.4826	1.14582	6.77775	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,4)
29	85.2515	1.13744	6.10735	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,1)
30	86.3568	1.12569	6.68962	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,2,3)
31	87.58(8)	1.1131(8)	3.1(12)	$\alpha$ -Ti (2,0,2), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,4)
32	93.1329	1.06074	10.224	$\alpha$ -Ti (1,0,4), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,2)
33	95.728	1.03874	10.7565	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,2,0)
34	98.1789	1.01925	10.7846	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,2,1)
35	99.14	1.01193	8.0862	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,3,3)
36	102.183	0.989889	8.47569	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (6,1,0)
37	103.369	0.981739	13.0675	$\alpha$ -Ti (2,0,3)
38	107.459	0.95541	7.28618	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,4)
39	110.24(14)	0.9390(8)	9(2)	$\alpha$ -Ti (2,1,1), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,4,0)
40	114.93(17)	0.9136(9)	7.1(19)	$\alpha$ -Ti (1,1,4), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,0,4)

**Додаток А2. Міжплощинні відстані фазових складових сплава №1б**

No.	2-theta(deg)	d(ang)	Height(cps)	Phasename
1	27.535	3.23671	17.9022	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,0,0)
2	29.4573	3.02972	17.7059	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,1)
3	34.6955	2.58335	8.31662	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (0,0,2)
4	35.415(15)	2.5325(10)	42(5)	α-Al2.1 Ti2.9(1,0,0)
5	36.712(15)	2.4459(10)	78(6)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,0)
6	37.4348	2.40037	14.5574	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,0,2)
7	38.60(3)	2.3304(19)	54(5)	α-Al2.1 Ti2.9(0,0,2)
8	40.523(9)	2.2243(5)	189(10)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,1),α-Al2.1 Ti2.9(1,0,1)
9	41.782(19)	2.1601(9)	44(5)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,0)
10	42.44(3)	2.1279(12)	32(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,2)
11	51.8301	1.7625	9.17998	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,1)
12	53.33(2)	1.7165(7)	37(4)	α-Al2.1 Ti2.9(1,0,2)
13	53.9664	1.69767	11.042	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,1)
14	56.7537	1.62073	8.38456	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,0,0)
15	61.06(6)	1.5162(13)	11(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,2)
16	62.8089	1.47825	11.4417	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,2)
17	63.50(3)	1.4638(5)	37(4)	α-Al2.1 Ti2.9(1,1,0)
18	65.15(8)	1.4306(16)	9(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,2,1)
19	66.03(6)	1.4137(12)	15(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,0)
20	68.1913	1.37409	11.2648	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,0,2)
21	71.05(5)	1.3256(7)	23(3)	α-Al2.1 Ti2.9(1,0,3)
22	72.9009	1.29649	7.66535	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,0,0)
23	74.727	1.26927	8.73438	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,3),α-Al2.1 Ti2.9(2,0,0)
24	76.80(2)	1.2400(3)	29(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,2),α-Al2.1 Ti2.9(1,1,2)
25	77.85(3)	1.2260(4)	29(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,2,0),α-Al2.1 Ti2.9(2,0,1)
26	80.4939	1.19223	8.39067	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,2,1)
27	82.8(2)	1.165(2)	4.2(14)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,0),α-Al2.1 Ti2.9(0,0,4)
28	84.4826	1.14582	6.77775	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,4)
29	85.2515	1.13744	6.10735	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,1)
30	86.3568	1.12569	6.68962	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,2,3)
31	87.58(8)	1.1131(8)	3.1(12)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,4),α-Al2.1 Ti2.9(2,0,2)
32	93.1329	1.06074	10.224	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,2),α-Al2.1 Ti2.9(1,0,4)
33	95.728	1.03874	10.7565	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,2,0)
34	98.1789	1.01925	10.7846	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,2,1)
35	99.14	1.01193	8.0862	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,3,3)
36	102.183	0.989889	8.47569	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (6,1,0)
37	103.369	0.981739	13.0675	α-Al2.1 Ti2.9(2,0,3)
38	107.459	0.95541	7.28618	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,4)
39	110.24(14)	0.9390(8)	9(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,4,0),α-Al2.1 Ti2.9(2,1,1)
40	114.93(17)	0.9136(9)	7.1(19)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,0,4),α-Al2.1 Ti2.9(1,1,4)

**Додаток А3. Міжплощинні відстані фазових складових сплава № 2**

No	2-theta(deg)	d(ang)	Height(cps)	Phasename
1	26.18(4)	3.401(5)	8(2)	Ti <sub>3</sub> Al (1,0,1)
2	27.49(6)	3.242(7)	9(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,0,0)
3	29.4614	3.02931	12.0753	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,1)
4	31.0158	2.88095	7.10996	Ti <sub>3</sub> Al (1,1,0)
5	34.5617	2.59305	15.5049	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (0,0,2)
6	35.87(2)	2.5015(14)	58(5)	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,0),α-Ti(1,0,0)
7	36.694(6)	2.4471(4)	25(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,0)
a	37.31(4)	2.408(3)	14(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,0,2)
9	38.81(2)	2.3184(13)	78(6)	Ti <sub>3</sub> Al (0,0,2)
10	39.565	2.27591	9.59745	Ti (0,0,2)
11	40.880(10)	2.2057(5)	278(12)	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,1), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,1),α-Ti(1,0,1)
12	41.77(4)	2.161(2)	15(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,0)
13	42.37(2)	2.1315(11)	33(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,2)
14	53.83(3)	1.7016(10)	29(4)	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,2), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,1)
15	60.92(7)	1.5196(17)	8(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,2)
16	64.24(2)	1.4487(4)	21(3)	Ti <sub>3</sub> Al (2,2,0),α-Ti(1,1,0)
17	65.97(9)	1.4148(18)	9(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,0)
18	68.14(3)	1.3751(5)	12(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,0,2)
19	71.56(4)	1.3175(6)	29(4)	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,3)
20	72.7377	1.299	8.65014	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (0,0,4),α-Ti(1,0,3)
21	75.7494	1.25466	8.23412	Ti <sub>3</sub> Al (4,0,0), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,3,0)
22	77.51(5)	1.2305(6)	29(4)	Ti <sub>3</sub> Al (2,2,2), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,4),α-Ti(1,1,2)
23	78.84(8)	1.2131(10)	13(3)	Ti <sub>3</sub> Al (4,0,1), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,3,1),α-Ti(2,0,1)
24	83.0(2)	1.163(2)	5.3(16)	Ti <sub>3</sub> Al (0,0,4), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,0)
25	84.4929	1.1457	10.5866	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> 2,1,4
26	87.6503	1.11238	10.9499	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,4)
27	88.3789	1.10509	10.7204	Ti <sub>3</sub> Al (4,0,2),α-Ti(2,0,2)
28	93.7222	1.05562	8.98547	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,4), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,4)
29	104.13(18)	0.9766(12)	4.7(15)	Ti <sub>3</sub> Al (4,0,3), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,2,4)
30	105.89(2)	0.96518	8(2)	Ti <sub>3</sub> Al (3,3,0), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,3)
31	107.323	0.95624	8.79058	Ti <sub>3</sub> Al (3,0,4), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,4),α-Ti(2,1,0)
32	111.841	0.93	18.628	Ti <sub>3</sub> Al (4,2,1), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,3,0)
33	116.03(12)	0.9082(6)	8(2)	Ti <sub>3</sub> Al (2,2,4), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,5)

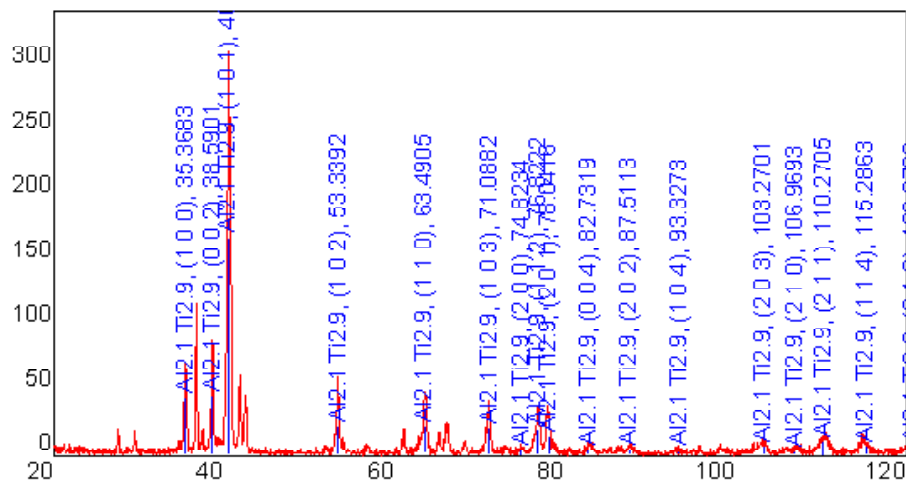
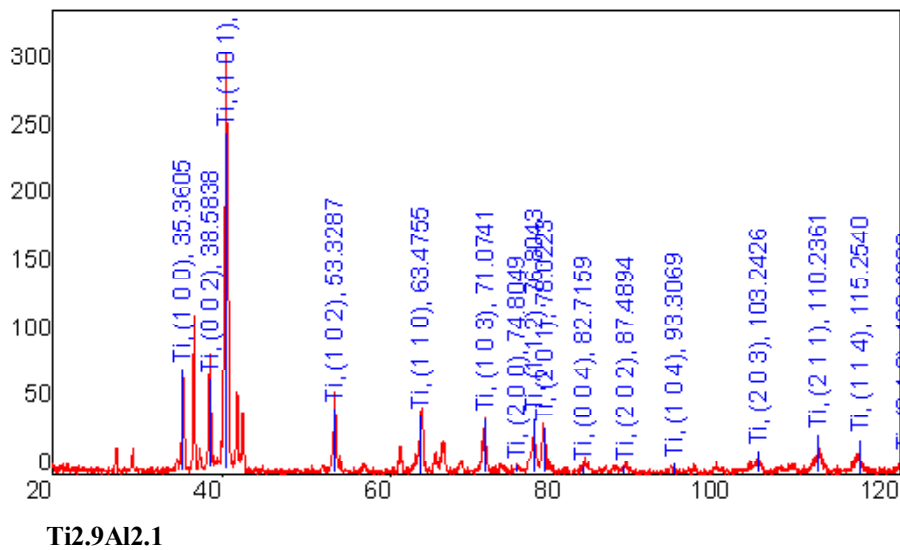
## Додаток А 4. Міжплощинні відстані фазових складових сплава № 3

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	Phasename
1	21.8902	4.05692	13.9396	TiAl (0,0,1)
2	26.39(11)	3.374(14)	6.2(18)	Ti <sub>3</sub> Al (1,0,1)
3	27.3654	3.25639	12.5385	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,0,0)
4	29.41(3)	3.034(3)	19(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,1)
5	31.3793	2.84839	6.23503	TiAl (1,0,0), Ti <sub>3</sub> Al (1,1,0)
6	36.142(5)	2.4832(4)	41(5)	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,0)
7	36.62(3)	2.452(2)	18(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,0)
8	37.372(10)	2.4043(6)	34(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,0,2)
9	38.69(4)	2.325(2)	30(4)	TiAl (1,0,1)
10	39.08(2)	2.3030(12)	33(4)	Ti <sub>3</sub> Al (0,0,2)
11	40.668(14)	2.2167(7)	91(7)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,1)
12	41.207(13)	2.1889(7)	186(10)	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,1)
13	42.327(11)	2.1336(5)	93(7)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,2)
14	44.69(15)	2.026(6)	3.9(14)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,0,2), TiAl (0,0,2)
15	50.6346	1.80127	10.9289	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,0), TiAl (1,1,1), Ti <sub>3</sub> Al (1,1,2)
16	51.8079	1.76321	7.41396	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,1)
17	54.22(4)	1.6903(11)	26(4)	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,2)
18	55.3793	1.65765	3.94549	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,2), TiAl (1,0,2), Ti <sub>3</sub> Al (3,0,0)
19	60.996(9)	1.5178(2)	20(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,2)
20	64.9091	1.4354	10.3722	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,2,1), TiAl (1,1,2), Ti <sub>3</sub> Al (2,2,0)
21	65.86(10)	1.417(2)	8(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,0), TiAl (2,0,0)
22	72.105(18)	1.3088(3)	29(4)	Ti <sub>3</sub> Al (2,0,3)
23	78.30(8)	1.2201(10)	20(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,2,0), TiAl (1,0,3), Ti <sub>3</sub> Al (2,2,2)
24	79.58(7)	1.2036(9)	16(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,0,4), Ti <sub>3</sub> Al (4,0,1)
25	82.8336	1.16439	8.17119	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,0)
26	84.3979	1.14675	5.88095	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,4)
27	87.4614	1.1143	6.43076	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,4)
28	89.2213	1.09682	9.24979	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,3), Ti <sub>3</sub> Al (4,0,2)
29	94.6964	1.04731	8.96929	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,3,1), Ti <sub>3</sub> Al (2,0,4)
30	105.39(7)	0.9684(4)	9(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,3), Ti <sub>3</sub> Al (4,0,3)
31	107.25(5)	0.9567(3)	9(2)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,4), Ti <sub>3</sub> Al (3,3,0)
32	113.05(16)	0.9235(9)	6.9(19)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (6,1,2), TiAl (3,0,1), Ti <sub>3</sub> Al (4,2,1)
33	117.81(11)	0.8995(5)	14(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (6,2,0), TiAl (3,1,0), Ti <sub>3</sub> Al (2,2,4)

## Додаток А5. Міжплощинні відстані фазових складових сплава № 4

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	Phasename
1	26.17(3)	3.403(4)	16(3)	Ti <sub>3</sub> Si (1,0,1)
2	27.469(7)	3.2443(8)	68(6)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,0,0)
3	29.3934	3.03616	17.478	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,1)
4	30.8672	2.89447	14.3985	Ti <sub>3</sub> Si (1,1,0)
5	34.511	2.59675	17.4017	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (0,0,2)
6	35.92(3)	2.4980(18)	46(5)	Ti <sub>3</sub> Si (2,0,0), $\alpha$ -Ti (1,0,0)
7	36.55(4)	2.457(2)	19(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,0)
8	37.345(10)	2.4060(6)	23(3)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,0,2)
9	38.898(5)	2.3134(3)	64(6)	Ti <sub>3</sub> Si (0,0,2)
10	40.590(8)	2.2208(4)	149(9)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,1)
11	40.941(7)	2.2025(4)	217(10)	Ti <sub>3</sub> Si (2,0,1)
12	41.687(3)	2.16483(17)	469(15)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,0,0)
13	42.220(16)	2.1387(8)	42(5)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (1,1,2)
14	53.92(4)	1.6990(11)	30(4)	Ti <sub>3</sub> Si (2,0,2), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,1), $\alpha$ -Ti (1,0,2)
15	56.604(17)	1.6247(4)	41(5)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,0,0)
16	60.84(2)	1.5214(5)	6.8(18)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,2)
17	64.34(4)	1.4468(9)	16(3)	Ti <sub>3</sub> Si (2,2,0), $\alpha$ -Ti (1,1,0)
18	66.038(16)	1.4136(3)	30(4)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,3)
19	67.9177	1.37896	8.57399	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,0,2)
20	71.73(3)	1.3147(5)	27(4)	Ti <sub>3</sub> Si (2,0,3)
21	72.645(13)	1.3004(2)	53(5)	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,0,0), $\alpha$ -Ti (1,0,3)
22	74.6141	1.27091	16.1049	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,2,3)
23	75.9698	1.25157	14.349	Ti <sub>3</sub> Si (4,0,0), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,3,0), $\alpha$ -Ti (2,0,0)
24	77.93(6)	1.2249(8)	18(3)	Ti <sub>3</sub> Si (2,2,2), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,2,0)
25	79.25(12)	1.2078(15)	11(2)	Ti <sub>3</sub> Si (4,0,1), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,3,1), $\alpha$ -Ti (2,0,1)
26	82.8619	1.16406	8.64496	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,1,0)
27	84.2539	1.14834	9.15224	Ti <sub>3</sub> Si (3,2,0), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (2,1,4)
28	88.7574	1.10135	10.463	Ti <sub>3</sub> Si (4,0,2), $\alpha$ -Ti (2,0,2)
29	94.2025	1.0515	10.9561	Ti <sub>3</sub> Si (2,0,4), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (3,1,4)
30	104.74(3)	0.9726(2)	6.6(18)	Ti <sub>3</sub> Si (4,0,3), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (6,1,1)
31	107.13	0.95743	16.2029	Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (4,1,4)
32	112.29(12)	0.9276(7)	10(2)	Ti <sub>3</sub> Si (4,2,1), Ti <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> (5,3,0), $\alpha$ -Ti (2,1,1)

**Додаток Б.** Співставлення дифракційних картин  $\alpha$ -титану та  $\alpha$ -Ti<sub>2.9</sub>Al<sub>2.1</sub>



**Список літератури**

1. Titanium matrix composites / Mazur V. I., Taran Yu. N., Firstov S. A. at al. PCT Patent WO 94/20644, Publ. 15.09.1994.
2. Titanium matrix composites / Mazur V. I., Taran Yu. N., Firstov S. A. at al. Patent 5366570 USA, Publ. 22.11.1994.
3. Мазур В. И. Конструкционный материал на основе титана для деталей двигателей внутреннего сгорания / В. И. Мазур, С. В. Капустникова // Конструкционные, инструментальные порошковые и композиционные материалы : сб. науч. трудов. – Л., 1991. – С. 9–10.
4. Perrot Pierre. Aluminium -Silicon -Titanium / Pierre Perrot. – Landolt-Börnstein : New Series IV/11A4. – MSIT. – P. 1–15.
5. Turney D. H. Studies of phase relationships and transformation processes of Ti alloy system. Part VI: The Ti-rich corner of the Ti-Al-Si system : technical report / D. H. Turney, F. A. Crossey. – Wright Air Development Center, 1954. – P. 54–101.
6. Phase equilibrium in the  $\alpha$ -Ti-Al-Si region of the Ti-Si-Al system / M. Bulanova, L. Tretyachenko, M. Golovkova, K. Meleshevich // Journal of phase equilibrium and diffusion. – 1997. – Vol. 25, No 3. – P. 209–229.
7. C. R. de Farias Azevedo. Microstructure and phase relationship in Ti-Al-Si system / C. R. de Farias Azevedo and H. M. Flower // Materials Science and Technology. – 1999. – Vol. 15. – P. 869–877.
8. Таран Ю. Н. Структура эвтектических сплавов / Ю. Н. Таран, Мазур В. И. – М. : Металлургия, 1978. – 312 с.

Одержано 08.07.2019



**Мазур В.И., Бирюкович Л.О. Влияние алюминия на микроструктуру и фазовый состав сплавов Ti-Si-Al эвтектического типа**

**Цель работы.** Изучение микроструктуры, фазового состава и параметров кристаллической решетки фазовых составляющих композиционных сплавов системы Ti-Si-Al, которые содержат фазы:  $\alpha$ -Ti,  $Ti_5Si_3$ , TiAl и  $Ti_3Al$ .

**Методы исследования.** Растровая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ.

**Полученные результаты.** В экспериментальных сплавах зафиксировано образование двух двофазных ( $\alpha$ -Ti +  $Ti_5Si_3$  и  $Ti_{2,9}Al_{2,1}$  +  $Ti_5Si_3$ ) и одной трехфазной  $\alpha$ -Ti +  $\gamma$  +  $Ti_5(Si,Al)_3$  эвтектики. Определены параметры кристаллических решеток и соотношение долей фазовых составляющих. С увеличением содержания алюминия в экспериментальных сплавах параметры кристаллической решетки  $\alpha$ -Ti и  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$  и объем элементарной ячейки уменьшаются, а в силициде  $(Ti_5Si,Al)_3$  эти величины увеличиваются.

**Научная новизна.** Впервые установлена возможность образования альтернативных двухфазных эвтектик  $\alpha$ -Ti +  $Ti_5Si_3$  и  $Ti_{2,9}Al_{2,1}$  +  $Ti_5Si_3$ . Определено влияние содержания алюминия на закономерность изменения параметров кристаллической решетки фазовых составляющих экспериментальных сплавов. С увеличением содержания алюминия в заэвтектических сплавах характерно доли первичного силицида титану  $Ti_5Si_3$  и появления интерметаллидов  $Ti_3Al$  и TiAl. Увеличение содержания алюминия приводит к значительному уменьшению параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и объема кристаллической ячейки фаз  $\alpha$ - $Ti_3Al$  и  $\alpha$ -Ti. Увеличение этих параметров наблюдали в фазе  $(Ti_5Si,Al)_3$ .

**Практическая ценность.** Определена последовательность фазовых реакций в процессе структурообразования сплавов. Выявление эвтектико-эвтектоидного процесса делает возможным измельчение структурных составляющих с целью увеличения трещиностойкости сплавов при проектировании технологического процесса для заданного сплава.

**Ключевые слова:** микроструктура, фазовый состав, эвтектика, система Ti-Si-Al.

**Mazur V., Birjukovich L. Effect of aluminium on the microstructure and phase composition of eutectic type Ti-Si-Al alloys**

**Purpose.** The study of microstructure, phase composition and parameters of crystal lattice of Ti-Si-Al composite alloys containing the next phase:  $\alpha$ -Ti,  $Ti_5Si_3$ , TiAl and  $Ti_3Al$ .

**Research methods.** SEM, light microscopy, XRD with base data.

**Obtained results.** Two bi-phase ( $\alpha$ -Ti,  $Ti_5Si_3$ , TiAl and  $Ti_3Al$ ) eutectic and three-phase  $\alpha$ -Ti +  $\gamma$  +  $Ti_5(Si,Al)_3$  one have been registered in experimental alloys. The parameters of crystalline lattice have been determined. The increasing of Al content leads both to reduction of parameters of  $\alpha$ -Ti and  $\alpha_2$ - $Ti_3Al$  crystal lattice and crystal cell volume. These value of  $Ti_5Si_3$  are reduced.

**Scientific novelty.** For the first time two alternative eutectic  $\alpha$ -Ti +  $Ti_5Si_3$  and  $Ti_{2,9}Al_{2,1}$  +  $Ti_5Si_3$  have been found. With increasing of Al content in hyper eutectic alloys the value of  $Ti_5Si_3$  increases and  $Ti_3Al$  appears as well. The increasing of Al content leads to decreasing parameters of crystalline cells of  $\alpha$ - $Ti_3Al$  and  $\alpha$ -Ti and to increasing ones of  $Ti_5(Si,Al)_3$ .

**Practical value.** It was determined the sequence of phase reactions. Identification the eutectic- eutectoid process makes it possible to control grinding grains the structural constituents in the purpose increasing the fracture toughness during design the technology for given alloys.

**Key words:** microstructure, phase content, eutectic, system Ti-Si-Al.