

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.06.030>

УДК 538.911; 539.261; 544.344.015.35; 546.82; 546.62; 546.681.

**Н.М. Білявина, О.І. Наконечна, А.М. Курилюк, В.А. Макара**

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

E-mail: les@univ.kiev.ua

## Ізотермічний переріз діаграми стану системи Ti–Al–Ga при 850 °С

*Представлено членом-кореспондентом НАН України В.А. Макарою*

*В повному концентраційному інтервалі методом електродугової плавки виготовлені сплави подвійних базисних систем Ti–Al і Ti–Ga, а також сплави потрійної системи Ti–Al–Ga. З використанням методу рентгенівської порошкової дифрактометрії вивчено фазовий склад відпалених при 850 °С сплавів, в результаті чого підтверджено літературні відомості про існування при температурі відпалу сплавів чотирьох алюмінідів титану ( $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $r-TiAl_2$ ,  $TiAl_3$ ), восьми галідів титану ( $Ti_3Ga$ ,  $Ti_2Ga$ ,  $Ti_5Ga_3$ ,  $Ti_5Ga_4$ ,  $TiGa$ ,  $Ti_2Ga_3$ ,  $TiGa_2$  й  $TiGa_3$ ), а також показана відсутність утворення потрійних сполук. Встановлено, що ізоструктурні сполуки  $TiAl-TiGa$ ,  $TiAl_2-TiGa_2$  та  $TiAl_3-TiGa_3$  утворюють в системі Ti–Al–Ga неперервні ряди твердих розчинів, а на основі подвійних галідів  $Ti_2Ga_3$ ,  $Ti_5Ga_4$  та  $Ti_2Ga$  існують обмежені тверді розчини, області гомогенності яких витягнені до 15, 6 і 10 ат. % Al відповідно. Неперервні ряди твердих розчинів  $Ti(Al,Ga)_3$ ,  $Ti(Al,Ga)_2$ ,  $Ti(Al,Ga)$ , обмежені тверді розчини  $Ti_2(Ga,Al)_3$ ,  $Ti_5(Ga,Al)_4$ ,  $Ti_2(Ga,Al)$ , подвійні сполуки  $Ti_3Al$ ,  $Ti_3Ga$  та твердий розчин на основі  $\alpha-Ti$  (до 15 ат. % Al/Ga) формують фазові поля, з урахуванням яких в повному концентраційному інтервалі побудовано ізотермічний переріз діаграми стану системи Ti–Al–Ga при 850 °С.*

**Ключові слова:** титан, алюміній, галій, ізотермічний переріз діаграми стану, рентгенівська порошкова дифрактометрія..

Відомо, що завдяки хорошим механічним характеристикам (модуль Юнга 100–120 ГПа, 0,2 % границя текучості і границя міцності 700–1100 МПа) багаті на титан сплави системи Ti–Al (до 10 ваг. % Al), які леговані ванадієм, молібденом, оловом, цирконієм тощо, знайшли своє широке застосування як в промисловості при створенні аерокосмічних двигунів, так і в медицині при створенні біосумісних покриттів (зокрема для стоматологічних імплантів) [1]. Щодо вивчення впливу галію на властивості багатих на титан сплавів, то показано, що легування галієм сплавів системи Ti–Al істотно збільшує їх жароміцність [2], а також знижує умовну границю міцності на 0,2 % при значенні ударної в'язкості біля 40 Дж/см<sup>2</sup> [3]. Більше того, легуванням галієм титановим сплавам притаманні хороші бак-

Цитування: Білявина Н.М., Наконечна О.І., Курилюк А.М., Макара В.А. Ізотермічний переріз діаграми стану системи Ti–Al–Ga при 850 °С. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2020. № 6. С. 30–36. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.06.030>

терицидні властивості. Так, за рахунок високої антибактеріальної активності Ga у відношенні до багаторезистентного золотистого стафілокока його метаболічна активність зменшується на 80 % [4].

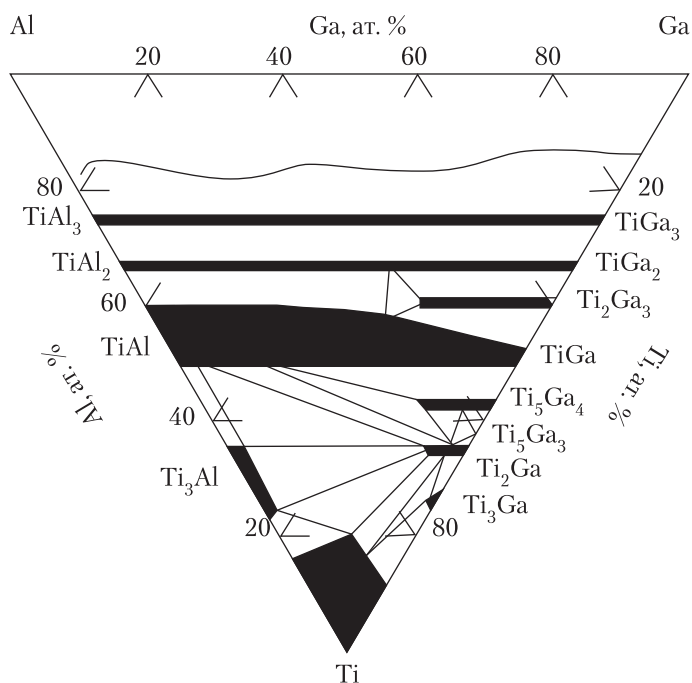
Таким чином, дослідження сплавів титану з алюмінієм та галієм актуальне та має практичний інтерес. Проте розширення номенклатури нових матеріалів на основі цих сплавів передусім базується на наявних даних про характер фазових рівноваг у відповідній системі. Раніше в системі Ti–Al–Ga досліджувалися лише багаті на титан сплави або інші сплави окремих складів [5, 6], в результаті чого було показано існування при високих температурах неперервних рядів твердих розчинів між ізоструктурними сполуками TiAl і TiGa типу CuAl та  $Ti_3Al$  і  $Ti_3Ga$  типу  $Mg_3Cd$  [6], а також встановлена значна розчинність алюмінію й галію в  $\alpha$ -Ti (900 °C) та  $\beta$ -Ti (1000 °C) [5].

Метою даної роботи було рентгенівське дослідження сплавів та побудова в повному концентраційному інтервалі ізотермічного перерізу діаграми стану системи Ti–Al–Ga при 850 °C.

Сплави для експериментального дослідження було виготовлено методом електродугової плавки в середовищі очищеного аргону з галію ГЛ1000 (99,999 %), електролітичного алюмінію (99,99 %) та йодованого титану (99,8 %). Виплавлені сплави запаювали в вакуумовані та заповнені очищеним аргоном кварцові ампули і відпалювали при температурі 850 °C у муфельних печах протягом 1500 год. Після відпалу сплави гартували у холодній воді без розбивання ампул.

Фазові рівноваги в системі Ti–Al–Ga та кристалічна структура ідентифікованих сполук досліджували методами рентгенівського фазового та рентгеноструктурного аналізів. Дифрактограми порошків досліджуваних сплавів одержували на мідному фільтрованому випромінюванні на автоматизованому рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 в дискретному режимі: крок сканування 0,05°, час експозиції у кожній точці 2–5 с.

Для аналізу та інтерпретації отриманих рентгенівських даних було застосовано оригінальний програмний комплекс, який включає в себе повний набір стандартних процедур Рітвелда (первинна обробка дифрактограм методом повнопрофільного аналізу, проведення якісного та кількісного фазового аналізу з використанням бази даних PDF-2, перевірка та уточнення структурних моделей тощо). Більш повну інформацію про



**Рис. 1.** Склади досліджених сплавів подвійних базисних систем Ti–Al і Ti–Ga та складів досліджених сплавів потрійної системи Ti–Al–Ga

застосовані при дослідженні методики можна отримати на електронному ресурсі [www.x-rau.univ.kiev.ua](http://www.x-rau.univ.kiev.ua).

Дослідженню сплавів потрійної системи Ti–Al–Ga передувала перевірка літературних відомостей щодо кількості та кристалічних структур сполук, які утворюються в подвійних базисних системах Ti–Al і Ti–Ga при температурі побудови ізотермічного перерізу (850 °C).

**Система Ti–Al.** В цій системі досліджено 14 литих та відпалених протягом 1500 год при 850 °C сплавів (рис. 1) в областях концентрацій, які згідно з літературними даними відповідають стехіометрії існуючих при цій температурі алюмінідів титану (табл. 1).

В результаті рентгенівського дослідження показано, що всі виготовлені сплави однофазні і містять твердий розчин та основи  $\alpha$ -Ti ( $\alpha$ -(Ti, Al)), розчинність алюмінію в якому при 850 °C становить 15 ат. % або сполуки  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $r$ - $TiAl_2$ ,  $TiAl_3$ . Інших з зазначених в таблиці сполук, а саме, сполук  $Ti_{0,72}Al_{1,28}$ ,  $h$ - $TiAl_2$ ,  $h$ - $Ti_5Al_{11}$ ,  $h$ - $Ti_2Al_5$ ,  $TiAl_3$ ,  $Ti_5Al_{11}$  й  $Ti_9Al_{23}$ , в відпалених при 850 °C сплавах не зафіксовано.

**Система Ti – Ga.** В цій системі досліджено 34 литих і відпалених протягом 150 год при 950 °C та протягом 1500 год при 850 °C сплавів, склади яких наведені на рис.1.

### Кристалографічні характеристики сполук подвійних систем Ti–Al та Ti–Ga

Сполука	Температура, °C і спосіб утворення <sup>1)</sup>	Структурний тип або сингонія	Параметри ґратки, нм			Література
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
Система Ti–Al						
$Ti_3Al$	1250, <i>Pd</i>	$Mg_3Cd$	0,5793	–	0,4655	[8, 10]
$TiAl$	1530, <i>L</i>	$CuAu I$	0,2807	–	0,3970	[8, 10]
$Ti_{0,72}Al_{1,28}$	1445, <i>P</i> -1424, розпл.	Ромб.	0,4026	0,3962	0,4026	[9, 10]
$h$ - $TiAl_2$	1400, <i>P</i>	$ZrGa_2$	1,2088	0,3946	0,4029	[9, 10]
$r$ - $TiAl_2$	1214, <i>S</i>	$HfGa_2$	0,3967	–	2,4297	[9, 10]
$h$ - $Ti_5Al_{11}$	1416, <i>P</i> -1206, розпл.	$CuAl$	0,3923	–	0,3938	[9, 10]
$h$ - $Ti_2Al_5$	1215, <i>S</i> -970, розпл.	?	0,3905	–	2,9196	[9, 10]
$TiAl_3$	1340, <i>P</i>	$TiAl_3$	0,3849	–	0,8598	[9, 10]
$Ti_5Al_{11}$	1400, <i>Pd</i> -950, розпад	Тетр.	0,391	–	1,652	[10]
$Ti_9Al_{23}$	1400, <i>Pd</i> -950, розпад	Тетр.	0,394	–	3,346	[10]
Система Ti–Ga						
$Ti_3Ga$	1030, <i>Pd</i>	$Mg_3Cd$	0,5742	–	0,4635	[11, 12]
$Ti_2Ga$	1500, <i>L</i>	$Ni_2In$	0,4514	–	0,5501	[11, 12]
$h$ - $Ti_5Ga_3$	1425, <i>L</i>	$W_5Si_3$	1,0222	–	0,5054	[11, 12]
$r$ - $Ti_5Ga_3$	?, <i>S</i>	$Mn_5Si_3$	0,7906	–	0,5308	[11, 12]
$Ti_5Ga_4$	1235, <i>L</i>	$Ti_5Ga_4$	0,7861	–	0,5452	[11, 12]
$TiGa$	1176, <i>P</i>	$AuCu I$	0,2807	–	0,3970	[11, 12]
$Ti_2Ga_3$	1075, <i>Pd</i>	$Ti_2Ga_3$	0,6284	–	0,4010	[11, 12]
$TiGa_2$	1165, <i>L</i>	$HfGa_2$	0,3929	–	2,437	[11, 12]
$TiGa_3$	925, <i>P</i>	$TiAl_3$	0,3789	–	0,8734	[11, 12]

<sup>1)</sup> Спосіб утворення: *L* – з рідкого стану, *P* – за перитектичною реакцією, *Pd* – за перитектоїдною реакцією, *S* – в твердому стані.

В результаті дослідження встановлено, що відпалені при 850 °C сплави зі вмістом 25, 33,3, 37,5, 44,4, 50, 60, 66,6 й 75 ат.% галію практично однофазні та відповідають відомим в літературі сполукам  $Ti_3Ga$ ,  $Ti_2Ga$ ,  $Ti_5Ga_3$ ,  $Ti_5Ga_4$ ,  $TiGa$ ,  $Ti_2Ga_3$ ,  $TiGa_2$  й  $TiGa_3$  відповідно (див. таблицю). Таким чином показано, що фазові рівноваги в потрійній системі Ti–Al–Ga при 850 °C формують усі вісім галідів титану (див. таблицю), а область гомогенності твердого розчину на основі  $\alpha$ -Ti ( $\alpha$ -(Ti,Ga)) простягається до 12,5 ат. % галію.

*Система Ti–Al–Ga.* В потрійній системі Ti–Al–Ga досліджено 73 відпалених 1500 год при 850 °C сплавів (багаті на титан сплави попередньо гомогенізували 150 год при 1000 °C) (див. рис. 1). При виборі оптимальних складів сплавів, природно, опиралися на дані про будову діаграм стану подвійних систем Ti–Al і Ti–Ga (див. таблицю), враховуючи наявну ізоструктурність певних подвійних алюмінідів та галідів титану.

В результаті рентгенівського дослідження литих та відпалених при 850 °C сплавів встановлено, що потрійні сполуки при взаємодії алюмінію та галію з титаном не утворюються.

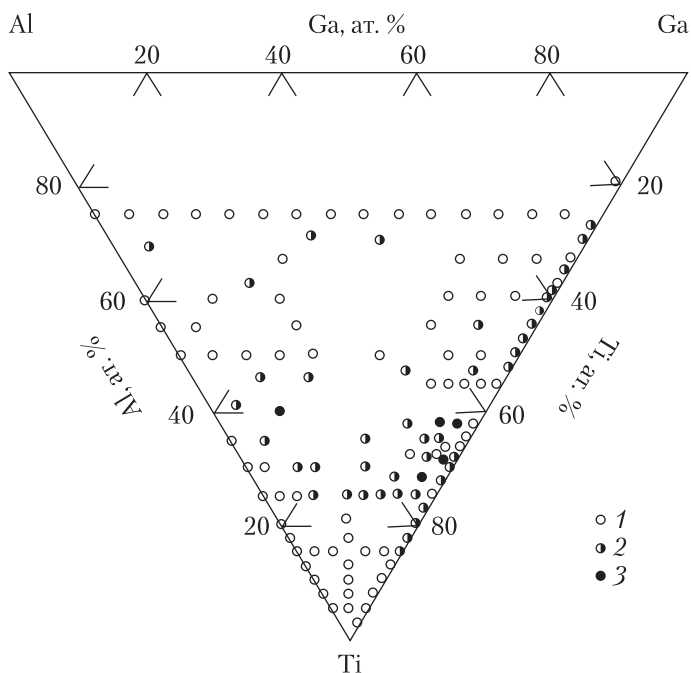
Титановий кут ізотермічного перерізу системи Ti–Al–Ga при 850 °C характеризується широкою областю твердого розчину на основі  $\alpha$ -Ti. При цьому, якщо  $\alpha$ -титан в подвійних системах Ti–Ga і Ti–Al за нашими даними розчиняє 12,5 ат. % галію та 15 ат. % алюмінію, відповідно, то сумісна розчинність в ньому галію та алюмінію дещо вища.

Згідно з отриманими даними сполуки  $Ti_3Al$  і  $Ti_3Ga$  при 850 °C третій компонент практично не розчинюють, хоча за даними авторів [6] при більш високих температурах (900–1000 °C) між цими ізоструктурними сполуками в системі Ti–Al–Ga існують неперервні ряди твердих розчинів. Фазовий склад відпалених при 850 °C сплавів з 75 ат. % титану та відпалених сплавів в прилеглий до неї області концентрацій вказує на існування в титановому куті системи таких фазових полів:  $Ti_3Al + Ti_2(Ga,Al)$ ;  $Ti_3Al + \alpha$ -(Ti,Al,Ga) +  $Ti_2(Ga,Al)$ ;  $\alpha$ -(Ti,Al,Ga) +  $Ti_2(Ga,Al)$ ;  $Ti_2(Ga,Al) + Ti_3Ga$ ;  $\alpha$ -(Ti,Al,Ga) +  $Ti_3Ga$ .

Результати дослідження відпалених при 850 °C сплавів на ізоконцентраціях 50, 33,3 та 25 ат. % титану показують, що ізоструктурні сполуки TiAl–TiGa,  $TiAl_2$ – $TiGa_2$  та  $TiAl_3$ – $TiGa_3$  (див. таблицю) утворюють неперервні ряди твердих розчинів.

Збільшення в потрійних сплавах періодів ґраток галідів  $Ti_2Ga_3$ ,  $Ti_5Ga_4$  та  $Ti_2Ga$  свідчить, що на їх основі утворюються обмежені тверді розчини  $Ti_2(Ga,Al)_3$ ,  $Ti_5(Ga,Al)_4$  і  $Ti_2(Ga,Al)$ , області гомогенності яких витягнені вздовж відповідних ізоконцентрат титану до 15, 6 та 10 ат. % Al.

**Рис. 2.** Ізотермічний переріз діаграми стану системи Ti–Al–Ga при 850 °C



Слід зазначити також, що при температурі відпалу сплавів (850 °С) тверді розчини між ізоструктурними сполуками  $Ti_3Al-Ti_3Ga$  в потрійній системі не утворюються, хоча за даними авторів роботи [2] при більш високих температурах (900 та 1000 °С) цим сполукам притаманне утворення неперервних рядів твердих розчинів.

Зазначені вище неперервні ряди твердих розчинів  $Ti(Al,Ga)_3$ ,  $Ti(Al,Ga)_2$ ,  $Ti(Al,Ga)$ , обмежені тверді розчини  $Ti_2(Ga,Al)_3$ ,  $Ti_5(Ga,Al)_4$ ,  $Ti_2(Ga,Al)$ , подвійні сполуки  $Ti_3Al$ ,  $Ti_3Ga$  і твердий розчин на основі  $\alpha$ -Ti формують фазові поля, з урахуванням яких нами побудовано ізотермічний переріз (850 °С) діаграми стану системи  $Ti-Al-Ga$  (рис. 2).

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Froes F.H., Eylon D. Titanium: Physical Metallurgy Processing, and Applications. ASM International. Materials Park. Ohio, 2015. 44073-0002.
2. Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности. *Технология легких сплавов*. 1993. Т. 7–8. С. 47–54.
3. Kitashima T., Suresh K.S., Yamabe-Mitarai Y., Iwasaki S. Tensile Strength and Impact Toughness of Gallium-Bearing Near- $\alpha$  Titanium alloys. *Mater. Sci. Forum*. 2014. **783**. P. 619–623.
4. Cochis A., Azzimonti B., Chiesa R., Rimondini L., Gasik M.M. Metallurgical Gallium Additions to Titanium Alloys Demonstrate a Strong Time-Increasing Antibacterial Activity without any Cellular Toxicity. *ACS Biomater. Sci. Eng.* 2019. **5**, № 6. P. 2815–2820.
5. Antonova N.V., Tretyachenko L.A., Velikanova T.Ya., Martsenyuk P.S. TiAl-TiGa section of the Ti-Al-Ga system. *J. Alloys and Compound*. 1998. **264**. P. 167–172. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00257-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00257-0)
6. Глазунов С.Г., Никишов О.А., Солонина О.П., Сорокина Л.В., Ермолова М.И., Тхоревская Ж.Д. Структура и свойства сплавов системы титан-алюминий-галлий. *Технология легких сплавов*. 1974. № 6, С. 37–39.
7. Schuster J.C., Ipser Y. Phases and phase relations in the partial system  $TiAl_3-TiAl$ . *Z. Metallk.* 1990. **81**, № 6. P. 389–396.
8. Корнилов И.И., Пылаева Е.И., Волкова М.А., Крипякевич П.И., Маркив В.Я. Фазовое строение сплавов двойной системы  $Ti-Al$ , содержащих от 0 до 30 ат. % Al. *Докл. АН СССР*. 1965. **161**. № 4. С. 843–846.
9. Okamoto H. Al-Ti (Aluminum-Titanium). *J. Phase Equilibria*. 2000. **21**, № 3. P. 311. <https://doi.org/10.1361/105497100770340101>
10. Batalu D., Cosmeleata G., Aloman A. Critical analysis of the Ti-Al phase diagrams. *UPB Sci. Bull., Series B*. 2006. **68**, № 4. P. 77–90.
11. Antonova N.V., Tretyachenko L.A. Phase diagram of the Ti-Ga system. *J. Alloys and Compounds*. 2001. **317–318**. P. 398–405.
12. Okamoto H. Ga-Ti (Gallium-Titanium). *J. Phase Equilibria*. 2002. **23**, № 5. P. 457–458. <https://doi.org/10.1361/105497102770331505>

Надійшло до редакції 12.01.2020

#### REFERENCES

1. Froes, F. H. (Ed.). (2015). Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications eBook. ASM International, Materials Park. Ohio 44073-0002.
2. Glazunov, S. G. & Yasinskij, K. K. (1993). Titanovye splavy dlya aviatsionnoj tekhniki i drugikh otraslej promyshlennosti. *Tekhnologiya legkikh spлавov*, 7-8, pp. 47-54 (in Russian).
3. Kitashima, T., Suresh, K. S., Yamabe-Mitarai, Y. & Iwasaki, S. (2014). Tensile Strength and Impact Toughness of Gallium-Bearing Near- $\alpha$  Titanium alloys. *Materials Science Forum*, 783, pp. 619-623.

4. Cochis, A., Azzimonti, B., Chiesa, R., Rimondini, L. & Gasik, M. M. (2019). Metallurgical Gallium Additions to Titanium Alloys Demonstrate a Strong Time-Increasing Antibacterial Activity without any Cellular Toxicity. *ACS Biomater. Sci. Eng.*, 5, No. 6, pp. 2815-2820.
5. Antonova, N. V., Tretyachenko, L. A., Velikanova, T. Ya., & Martsenyuk, P. S. (1998). TiAl–TiGa section of the Ti–Al–Ga system. *J. Alloys and Compounds*, 264, pp. 167-172. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(97\)00257-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00257-0)
6. Glazunov, S. G., Nikishov, O. A., Solonina, O. P., Sorokina, L. V., Ermolova, M. I. & Tkhorevskaya, Zh. D. (1974). Структура і svojstva сплавов системи титан-алюміній-галій. *Tekhnologiya legkikh spлавov*, No. 6, pp. 37-39 (in Russian).
7. Schuster, J. C. & Ipsier, Y. (1990). Phases and phase relations in the partial system TiAl<sub>3</sub>–TiAl. *Z. Metallk.*, 81, No. 6, pp. 389-396.
8. Kornilov, I. I., Py`laeva, E. I., Volkova, M. A., Kripyakevich, P. I. & Markiv, V. Ya. (1965). Fazovoe stroenie сплавов dvojnoj системи Ti–Al, soderzhashhikh ot 0 do 30 at. % Al. *Dokl. akad. nauk. SSSR*, 161, No. 4, pp. 843-846 (in Russian).
9. Okamoto, H. (2000). Al–Ti (Aluminum-Titanium). *J. Phase Equilibria*, 21, No. 3, p. 311. <https://doi.org/10.1361/105497100770340101>
10. Batalu, D., Cosmeleata, G. & Aloman, A. (2006). Critical analysis of the Ti-Al phase diagrams. *UPB Sci. Bull., Series B*, 68, No. 4, pp. 77-90.
11. Antonova, N. V. & Tretyachenko, L. A. (2001) Phase diagram of the Ti–Ga system. *Journal of Alloys and Compounds*, 317-318, pp. 398-405. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)01416-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)01416-X)
12. Okamoto, H. (2002) Ga–Ti (Gallium-Titanium). *J. Phase Equilibria*, 23, No. 5, pp. 457-458. <https://doi.org/10.1361/105497102770331505>

Received 12.01.2020

Н.Н. Белявина, О.И. Наконечная,  
А.Н. Курлюк, В.А. Макара

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко  
E-mail: les@univ.kiev.ua

#### ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ СЕЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ Ti–Al–Ga ПРИ 850 °C

В полном концентрационном интервале методом электродуговой плавки изготовлены сплавы двойных базисных систем Ti–Al и Ti–Ga, а также сплавы тройной системы Ti–Al–Ga. С использованием метода рентгеновской порошковой дифрактометрии изучен фазовый состав отожженных при 850 °C сплавов, в результате чего подтверждены литературные сведения о существовании при температуре отжига сплавов четырех алюминидов титана (Ti<sub>3</sub>Al, TiAl, r-TiAl<sub>2</sub>, TiAl<sub>3</sub>), восьми галидов титана (Ti<sub>3</sub>Ga, Ti<sub>2</sub>Ga, Ti<sub>5</sub>Ga<sub>3</sub>, Ti<sub>5</sub>Ga<sub>4</sub>, TiGa, Ti<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>, TiGa<sub>2</sub> и TiGa<sub>3</sub>), а также показано отсутствие образования в системе тройных соединений. Установлено, что изоструктурные соединения TiAl–TiGa, TiAl<sub>2</sub>–TiGa<sub>2</sub> и TiAl<sub>3</sub>–TiGa<sub>3</sub> образуют в системе Ti–Al–Ga непрерывные ряды твердых растворов, в то время как на основе двойных галидов Ti<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>, Ti<sub>5</sub>Ga<sub>4</sub> и Ti<sub>2</sub>Ga существуют ограниченные твердые растворы, области гомогенности которых вытянуты до 15, 6 и 10 ат. % Al соответственно. Непрерывные ряды твердых растворов Ti(Al,Ga)<sub>3</sub>, Ti(Al,Ga)<sub>2</sub>, Ti(Al,Ga), ограниченные твердые растворы Ti<sub>2</sub>(Ga,Al)<sub>3</sub>, Ti<sub>5</sub>(Ga,Al)<sub>4</sub>, Ti<sub>2</sub>(Ga,Al), двойные соединения Ti<sub>3</sub>Al, Ti<sub>3</sub>Ga и твердый раствор на основе α-Ti (до 15 ат.% Al/Ga) формируют фазовые поля, с учетом которых в полном концентрационном интервале построено изотермическое сечение диаграммы состояния системы Ti–Al–Ga при 850 °C.

**Ключевые слова:** титан, алюминий, галлий, изотермическое сечение диаграммы состояния, рентгеновская порошковая дифрактометрия.

*N.N. Belyavina, O.I. Nakonechna,  
A.N. Kuryliuk, V.A. Makara*

Taras Shevchenko National University of Kyiv

E-mail: les@univ.kiev.ua

#### ISOTHERMAL SECTION OF THE Ti–Al–Ga SYSTEM AT 850 °C

Alloys of the Ti–Al and Ti–Ga binary systems, as well as alloys of the Ti–Al–Ga ternary system, are obtained by the arc melting, annealed at 850 °C, and studied by the X-ray powder diffraction method. As a result, the existence of four binary aluminides ( $\text{Ti}_3\text{Al}$ ,  $\text{TiAl}$ ,  $r\text{-TiAl}_2$ ,  $\text{TiAl}_3$ ) and eight binary galides ( $\text{Ti}_3\text{Ga}$ ,  $\text{Ti}_2\text{Ga}$ ,  $\text{Ti}_5\text{Ga}_3$ ,  $\text{Ti}_5\text{Ga}_4$ ,  $\text{TiGa}$ ,  $\text{Ti}_2\text{Ga}_3$ ,  $\text{TiGa}_2$ ,  $\text{TiGa}_3$ ) at 850 °C is confirmed. It is shown that ternary compounds are not formed through the titanium, aluminum, and gallium interaction.  $\text{TiAl-TiGa}$ ,  $\text{TiAl}_2\text{-TiGa}_2$ , and  $\text{TiAl}_3\text{-TiGa}_3$  isostructural compounds form continuous solid solutions in the Ti–Al–Ga system, while  $\text{Ti}_2\text{Ga}_3$ ,  $\text{Ti}_5\text{Ga}_4$ , and  $\text{Ti}_2\text{Ga}$  binary galides form extended solid solutions up to 15, 6, and 10 at. % Al, respectively. Following phases are the equilibrium ones in the system: continuous  $\text{Ti}(\text{Al,Ga})_3$ ,  $\text{Ti}(\text{Al,Ga})_2$ ,  $\text{Ti}(\text{Al,Ga})$  solid solutions, extended  $\text{Ti}_2(\text{Ga,Al})_3$ ,  $\text{Ti}_5(\text{Ga,Al})_4$ ,  $\text{Ti}_2(\text{Ga,Al})$  solid solutions, binary  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Ga}$  compounds, as well as the solid solution of the base of  $\alpha$ -Ti metal (up to 15 at.% Al/Ga). As a result of this study, the isothermal section (850 °C) of the Ti–Al–Ga system is constructed in the full concentration range.

**Keywords:** *titanium, aluminum, gallium, isothermal section, X-ray powder diffraction.*