

УДК 548.736.4

КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА АЛЮМОГЕРМАНІДУ $Zr_5Al_{2,70}Ge_{0,30}$

Д. Марискевич*, Я. Токайчук, Р. Гладішевський

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна
e-mail: danylo.maryskevych@gmail.com

Рентгенівським дифракційним методом порошку визначено кристалічну структуру нової тернарної сполуки $Zr_5Al_{2,70(2)}Ge_{0,30(2)}$: структурний тип Nb_5SiSn_2 , символ Пірсона $tI32$, просторова група $I4/mcm$, $a = 11,0145(7)$, $c = 5,3921(4)$ Å, $V = 654,17(8)$ Å³, $Z = 4$, $R_B = 0,0603$, $R_F = 0,0414$. Структурний тип Nb_5SiSn_2 є тернарним упорядкованим варіантом бінарного структурного типу W_5Si_3 . У структурі синтезованої сполуки можна виділити ізольовані колони тетрагональних антипризм $AlZr_8$ і тетрадрів ZrM_4 ($M = 0,851(8)Al + 0,149(8)Ge$ з уточненням структури), що простягаються вздовж кристалографічного напрямку [001].

Ключові слова: цирконій, алюміній, германій, тернарна сполука, рентгенівський дифракційний метод порошку, кристалічна структура.

DOI: <https://doi.org/10.30970/vch.6101.063>

1. Вступ

Про дослідження діаграми стану потрійної системи Zr–Al–Ge у літературі відомостей немає. Під час дослідження багатих на Al сплавів $ZrAl_{3-x}Ge_x$ ($x = 0–0,8$), гомогенізованих при 600 °C, встановлено існування тернарної сполуки $ZrAl_{2,52}Ge_{0,48}$ зі структурою типу $TiAl_3$ (символ Пірсона $tI8$, просторова група $I4/mmm$, $a = 3,92395$, $c = 9,0476$ Å) [1]. При 600 °C ця тернарна сполука перебуває у рівновазі з бінарною сполукою $ZrAl_3$ з власним типом структури (символ Пірсона $tI16$, просторова група $I4/mmm$, $a = 4,00930$, $c = 17,2718$ Å). Структурні типи $TiAl_3$ і $ZrAl_3$ належать до родини кубічних щільно упакованих структур, які, звичайно, реалізуються у системах за участю *d*-металів і *p*-елементів III і IV груп Періодичної системи [2]. Крім того, встановлено існування та рентгенівським дифракційним методом монокристала визначено кристалічну структуру тернарної сполуки Zr_5AlGe_3 (Hf_5CuSn_3 , $hP18$, $P6_3/mcm$, $a = 8,104$, $c = 5,654$ Å) [3].

Мета нашої праці – визначення параметрів кристалічної структури тернарного алюмогерманіду $Zr_5Al_{2,70}Ge_{0,30}$ (структурний тип Nb_5SiSn_2 , $tI32$, $I4/mcm$ [4]), існування якого встановлено у системі Zr–Al–Ge на ізоконцентраті 62,5 ат. % Zr при 600 °C, що є продовженням систематичного дослідження взаємодії компонентів у цій системі. Структурний тип Nb_5SiSn_2 є тернарним упорядкованим варіантом бінарного структурного типу W_5Si_3 ($tI32$, $I4/mcm$) [5]. Тернарні сполуки зі структурами цих типів мають представників у системах за участю *d*-елементів IV групи (Ti, Zr, Hf) та *p*-елементів III (Al, Ga), IV (Sn, Pb) та V груп (Sb) Періодичної системи [2]. Про існування тернарних аллогерманідів Ti, Zr, чи Hf зі структурою типу

W_5Si_3 чи Nb_5SiSn_2 досі повідомлено не було. Натомість з літератури відомо про існування бінарного алюмініду Zr_5Al_3 зі структурою типу W_5Si_3 , однак він є стабільним за температур, вищих за $1\ 000\ ^\circ C$ [6].

2. Матеріали та методика експерименту

Зразки складів $Zr_{62,5}Al_{37,5-x}Ge_x$ ($x = 0, 2,5, 5$) синтезували методом електродугового сплавлення чистих металів (Zr – 99,95 мас. %; Al – 99,99 мас. %; Ge мас. %) в атмосфері аргону на водоохолоджуваному мідному поді електродугової печі, оснащеної вольфрамовим електродом (як гетер використовували пористий титан). Гомогенізацію сплаву проводили у вакуумованій кварцовій ампулі при $600\ ^\circ C$ впродовж 720 год у муфельній електропечі VULKAN A-550 з подальшим гартуванням у холодній воді. Втрати маси під час синтезу сплаву не перевищили 1 %. Сплав, розтертий у порошок, піддали рентгенофазовому та рентгеноструктурному аналізу з використанням масивів дифракційних даних, отриманих на дифрактометрах ДРОН-2.0М (проміння Fe $K\alpha$) та STOE Stadi P (проміння Cu $K\alpha_1$). Ідентифікацію фаз провели порівнянням експериментальних дифрактограм синтезованих зразків з розрахованими дифрактограмами відомих фаз системи Zr–Al–Ge за допомогою комплексу програм STOE WinXPow [7]. Уточнення параметрів профілю і структури проводили методом Рітвельда за допомогою комплексу програм FullProf Suite [8].

Локальний рентгеноспектральний аналіз провели на растровому електронному мікроскопі РЕММА-102-02 з енергодисперсійним рентгенівським спектрометром ЕДАР. Сплави для аналізу заправили у тримачі сплавом Вуда, після чого шліфували та полірували до дзеркальної поверхні. Загальний склад сплавів отримували на ділянці площею $1\ mm^2$. Локальний хімічний склад індивідуальних фаз одержали усередненням точкових складів чоритьох–п'яти зерен.

3. Результати досліджень та їх обговорення

У результаті рентгенофазового аналізу зразка $Zr_{62,5}Al_{37,5}$, що відповідає стехіометрії бінарної сполуки Zr_5Al_3 [6], з'ясовано, що він є двофазним і містить бінарні сполуки Zr_2Al (структурний тип $Co_{1,75}Ge$, символ Пірсона $hP6$, просторова група $P6_3/mcm$) [9] і Zr_3Al (структурний тип Cu_3Au , $cP4$, $Pm-3m$) [10]. Отже, підтверджено, що бінарна сполука Zr_5Al_3 зі структурою типу W_5Si_3 при $600\ ^\circ C$ не існує. Заміщення Al на Ge вздовж ізоконцентрати 62,5 ат. % Zr приводить до утворення нової тернарної фази, що засвідчив рентгенофазовий аналіз зразків $Zr_{62,5}Al_{35}Ge_{2,5}$ і $Zr_{62,5}Al_{32,5}Ge_5$: обидва зразки містили нову тернарну фазу, бінарну сполуку Zr_2Al і фазу зі структурою типу Mn_5Si_3 ($hP16$, $P6_3/mcm$), яку має бінарний германід Zr_5Ge_3 [11]. Зсув кутів відбиттів останньої фази на експериментальній дифрактограмі щодо розрахованої дифрактограми сполуки Zr_5Ge_3 засвідчив утворення твердого розчину на її основі.

У результаті локального енергодисперсійного рентгенівського спектрального аналізу сплаву $Zr_{62,5}Al_{35}Ge_{2,5}$ (рис. 1) встановлено склад тернарної сполуки: $Zr_{62(1)}Al_{34(1)}Ge_{4(1)}$ ($Zr_{4,96(8)}Al_{2,72(8)}Ge_{0,32(8)}$).

Кристалічну структуру тернарної сполуки $Zr_5Al_{2,70}Ge_{0,30}$ визначено рентгенівським дифракційним методом порошку за дифрактограмою зразка $Zr_{62,5}Al_{35}Ge_{2,5}$ (дифрактометр STOE Stadi P, проміння Cu $K\alpha_1$, інтервал $6^\circ \leq 2\theta \leq 110^\circ$, крок сканування $0,015^\circ$). Положення та інтенсивності відбиттів основної фази засвідчили

реалізацію структурного типу W_5Si_3 , чи його похідного. Уточнення кристалографічних параметрів тернарної фази $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ провели методом Рітвельда, керуючись координатами атомів високотемпературної модифікації сполуки Zr_5Al_3 [6], які було взято за початкову модель. Крім основної фази, зразок містив 4,3(2) мас. % алюмініду Zr_2Al та 4,0(2) мас. % алюмогерманіду $Zr_5Al_{0.8}Ge_{2.2}$, склад якого відповідає граничному складу твердого розчину заміщення на основі германіду Zr_5Ge_3 . Умови експерименту та результати уточнення структури сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ наведено у табл. 1. Експериментальну, розраховану та різницеву дифрактограми зразка складу $Zr_{62.5}Al_{35}Ge_{2.5}$ зображено на рис. 2.

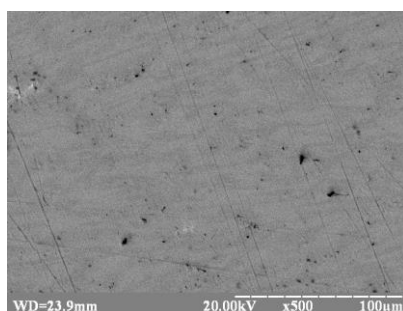


Рис. 1. Фотографія у вторинних електронах поверхні шліфа сплаву $Zr_{62.5}Al_{35}Ge_{2.5}$
Fig. 1. Photograph in the secondary electrons of a polished surface of the alloy $Zr_{62.5}Al_{35}Ge_{2.5}$

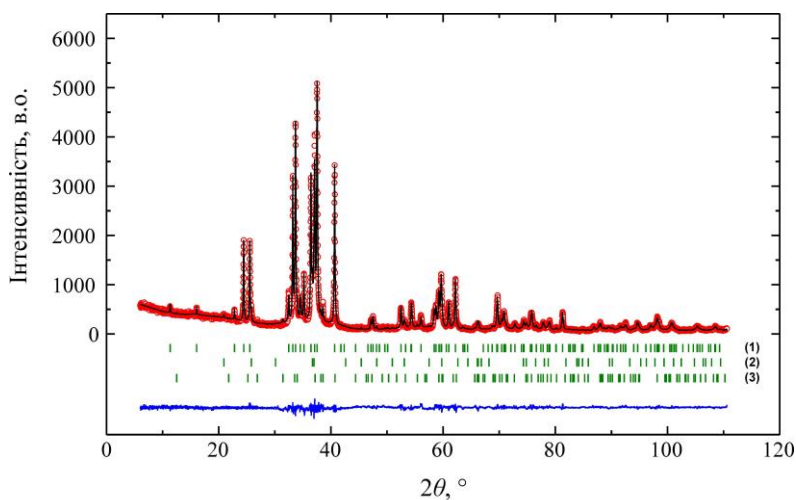


Рис. 2. Експериментальна (точки), розрахована (лінія) та різницєва (внизу рисунка) дифрактограми зразка $Zr_{62.5}Al_{35}Ge_{2.5}$ (проміння $Cu\ K\alpha_1$).
Вертикальні риски вказують на положення відбиттів сполук $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ (1), Zr_2Al (2) і $Zr_5Al_{0.8}Ge_{2.2}$ (3)

Fig. 2. Experimental (points), calculated (line) and difference (bottom) X-ray powder diffraction patterns of the sample $Zr_{62.5}Al_{35}Ge_{2.5}$ ($Cu\ K\alpha_1$ radiation).
Vertical bars indicate the positions of the reflections of the individual phases $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ (1), Zr_2Al (2) and $Zr_5Al_{0.8}Ge_{2.2}$ (3)

Таблиця 1

Умови експерименту та результати уточнення кристалічної структури індивідуальних фаз
у зразку $Zr_{62.5}Al_{35}Ge_{2.5}$ (дифрактометр STOE Stadi P, проміння $Cu K\alpha_1$)

Table 1

Experimental conditions and results of the refinement of the crystal structures of the individual phases
in the sample $Zr_{62.5}Al_{35}Ge_{2.5}$ (diffractometer STOE Stadi P, $Cu K\alpha_1$ radiation)

Фаза	$Zr_5Al_{2.70(2)}Ge_{0.30(2)}$	Zr_2Al	$Zr_5Al_{0.8}Ge_{2.2}$
Вміст фази, мас. %	91,7(6)	4,3(2)	4,0(2)
Структурний тип	Nb_5SiSn_2	$Co_{1.75}Ge$	Mn_5Si_3
Символ Пірсона	$tI32$	$hP6$	$hP16$
Просторова група	$I4/mcm$	$P6_3/mmc$	$P6_3/mcm$
Параметри елементарної комірки:			
a , Å	11,0145(7)	4,8936(5)	8,1561(11)
c , Å	5,3921(4)	5,9284(9)	5,6841(10)
Об'єм комірки V , Å ³	654,17(8)	122,95(3)	327,46(9)
Кількість формульних одиниць Z	4	2	2
Густина D_x , г·см ⁻³	5,591	5,657	6,696
Параметр текстури G [напрямок]	0,885(2) [001]	–	–
Параметри профілю U , V , W		0,095(9), 0,029(9), 0,0075(19)	
Параметр змішування		0,908(9)	
Параметри асиметрії $P1$, $P2$		0,015(6), –0,0048(13)	
Фактори достовірності:			
R_B	0,0603	0,0901	0,0986
R_F	0,0414	0,0862	0,0833
Фактори достовірності:			
R_p		0,0369	
R_{wp}		0,0401	
χ^2		1,82	

Кристалічна структура сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ належить до типу Nb_5SiSn_2 , що є тернарним упорядкованим варіантом бінарного структурного типу W_5Si_3 . Оскільки, згідно з літературними відомостями, бінарний алюмінід Zr_5Al_3 з цією структурою стабільний за вищих температур, і, згідно з результатами нашого дослідження, він не існує при 600 °С, фазу $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ можна вважати індивідуальною тернарною сполукою при 600 °С, що, можливо, утворюється шляхом стабілізації атомами Ge твердого розчину заміщення на основі Zr_5Al_3 до нижчих температур. Координати та ізотропні параметри зміщення атомів у структурі сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ наведено у табл. 2. Вміст елементарної комірки та координаційні многогранники атомів зображено на рис. 3.

Таблиця 2

Координати та ізотропні параметри зміщення атомів
у структурі сполуки $Zr_5Al_{2.70(2)}Ge_{0.30(2)}$

Table 2

Coordinates and isotropic displacement parameters of the atoms
in the structure of the compound $Zr_5Al_{2.70(2)}Ge_{0.30(2)}$

Атом	ПСТ	x	y	z	B_{iso} , Å ²
Zr1	16k	0,08050(12)	0,21911(13)	0	0,61(3)
Zr2	4b	0	1/2	1/4	0,49(7)
M^1	8h	0,1663(3)	0,6663(3)	0	1,28(19)
Al	4a	0	0	1/4	1,01(7)

¹ $M = 0,851(8)Al + 0,149(8)Ge$.

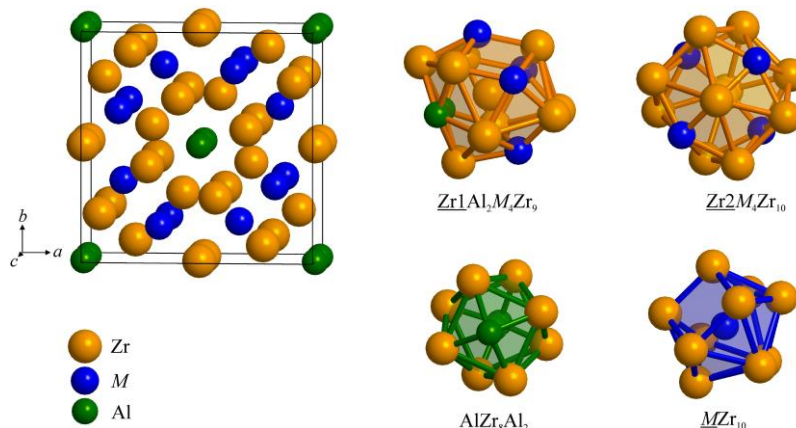


Рис. 3. Вміст елементарної комірки і координаційні многогранники атомів у структурі сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$

Fig. 3. Content of the unit cell and coordination polyhedra of atoms in the structure of the compound $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$

Кристалічна структура сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ характеризується двома правильними системами точок, зайнятих атомами Zr, та двома правильними системами точок, зайнятих атомами *p*-елементів, причому положення *4a* зайняте виключно атомами Al, тоді як положення *8h* – статистичною сумішшю атомів Al і Ge. Саме це часткове впорядкування атомів *p*-елементів зумовлює утворення тернарної надструктури типу Nb_5SiSn_2 .

Таблиця 3

Міжатомні віддалі (δ) та координаційні числа атомів (КЧ) у структурі сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$

Table 3

Interatomic distances (δ) and coordination numbers (КЧ) of atoms in the structure of the compound $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$

Атоми		δ , Å	КЧ
Zr1	- 1 M^1	2,849(5)	15
	- 2 Al	2,9031(13)	
	- 1 M^1	2,997(5)	
	- 1 Zr1	3,121(2)	
	- 2 M^1	3,123(2)	
	- 2 Zr1	3,2270(11)	
	- 2 Zr1	3,4540(13)	
	- 2 Zr2	3,4893(13)	
	- 2 Zr1	3,636(2)	
Zr2	- 2 Zr2	2,6961(2)	14
	- 4 M^1	2,920(4)	
	- 8 Zr1	3,4893(13)	
M^1	- 2 Zr1	2,849(5)	10
	- 2 Zr2	2,920(4)	
	- 2 Zr1	2,997(5)	
	- 4 Zr1	3,123(2)	
Al	- 2 Al	2,6961(2)	10
	- 8 Zr1	2,9031(13)	

¹ $M = 0,851(8)Al + 0,149(8)Ge$.

У структурі сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ атоми Zr оточені 15 і 14 атомами, які формують 15- та 14-вершинники Франка-Каспера $Zr1Al_2M_4Zr_9$ і $Zr2M_4Zr_{10}$, відповідно. Атоми статистичної суміші M оточені десятьма атомами Zr, які утворюють поліедри MZr_{10} , які можна зобразити як дефектний ікосаедр. Навколо атомів Al утворюється двошаркова тетрагональна антипризма. Міжатомні віддалі та координаційні числа атомів у структурі сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ наведено у табл. 3. Міжатомні віддалі корелюють з сумами атомних радіусів компонентів ($r_{Zr} = 1,60$; $r_{Al} = 1,431$; $r_{Ge} = 1,225$ Å [12]) і відповідними віддалями у структурах бінарних алюмінідів і германідів цирконію. Особливістю структури є коротка віддаль між атомами Zr ($\delta_{Zr2-Zr2} = 2,6961(2)$ Å), засвідчуючи сильну взаємодію між ними. Подібні короткі віддалі між атомами Zr простежуються і для ізоструктурних сполук з p -елементами III (Al, Ga), IV (Sn, Pb) та V груп (Sb) [2], а також для іншої, багатой на Zr, тернарної сполуки системи Zr–Al–Ge – Zr_5AlGe_3 [3].

У структурах двох відомих сьогодні тернарних сполук системи Zr–Al–Ge з великим вмістом Zr – $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ і Zr_5AlGe_3 – можна виділити колони з многогранників. Так, структуру сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ побудовано з двох типів ізольованих колон, що простягаються нескінченно вздовж кристалографічного напрямку [001] (рис. 4). Колони побудовано з центрованих тетрагональних антипризм $AlZr_8$ (атоми Zr з правильної системи точок $16k$) та тетраедрів ZrM_4 (атоми Zr з ПСТ $4b$). Тетрагональні антипризми з'єднані між собою гранями, тоді як тетраедри – ребрами. У структурі сполуки Zr_5AlGe_3 октаедри $ZrGe_6$, а також октаедри $AlZr_6$ з'єднані спільними гранями вздовж кристалографічного напрямку [001] та утворюють тривимірний каркас та одновимірні колони, відповідно.

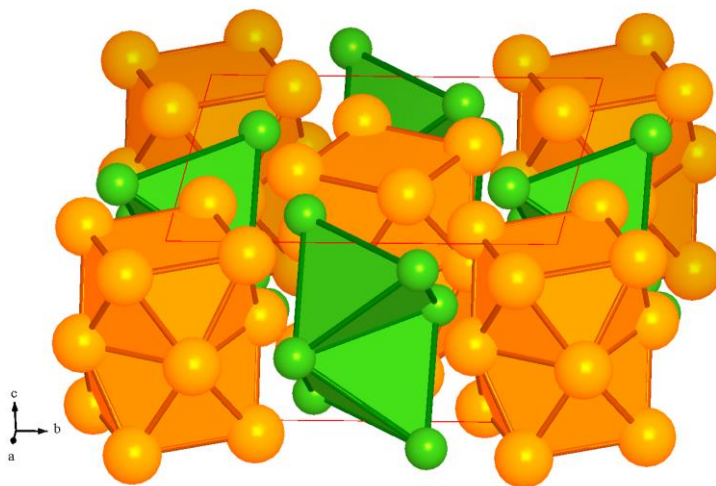


Рис. 3. Укладка тетрагональних антипризм $AlZr_8$ і тетраедрів ZrM_4 у структурі сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ вздовж кристалографічного напрямку [001]

Fig. 3. Stacking of square antiprisms $AlZr_8$ and tetrahedra ZrM_4 in the structure of the compound $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ along the crystallographic direction [001]

4. Висновки

Кристалічна структура сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ належить до типу Nb_5SiSn_2 , що є тернарним упорядкованим варіантом бінарного структурного типу W_5Si_3 . Фаза $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ при $600\text{ }^\circ\text{C}$ є індивідуальною тернарною сполукою, що, можливо, утворюється шляхом стабілізації атомами Ge твердого розчину заміщення на основі високотемпературної модифікації Zr_5Al_3 до нижчих температур. Структуру сполуки $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ побудовано з ізольованих колон тетрагональних антипризм $AlZr_8$ і тетраєдрів ZrM_4 , що простягаються нескінченно вздовж кристалографічного напрямку [001].

1. *Maryskevych D., Tokaychuk Ya., Gladyshevskii R.* Structural evolution in the systems $TAl_{3-x}Ge_x$ ($T = Zr, Hf$) // *Solid State Phenom.* 2019. Vol. 289. P. 71–76.
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.289.71>
2. *Villars P., Cenzual K.* (Eds.). *Pearson's Crystal Data – Crystal Structure Database for Inorganic Compounds.* Materials Park: ASM International (OH), Release 2018/19.
3. *Maryskevych D., Tokaychuk Ya., Prots. Yu., Akselrud L., Gladyshevskii R.* Crystal structure of Zr_5AlGe_3 // *Chem. Met. Alloys.* 2019. Vol. 12. P. 39–43.
DOI: <https://doi.org/10.30970/cma12.0393>
4. *Horyn R., Lukaszewicz K.* The crystal structure of Nb_5Sn_2Si // *Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. Chim.* 1970. Vol. 18. P. 59–64.
5. *Aronsson B.* The crystal structure of Mo_5Si_3 and W_5Si_3 // *Acta Chem. Scand.* 1955. Vol. 9. P. 1107–1110. DOI: <https://doi.org/10.3891/acta.chem.scand.09-1107>
6. *Edshammar L. E., Andersson S.* Studies on the zirconium–aluminium and hafnium–aluminium systems // *Acta Chem. Scand.* 1960. Vol. 14. P. 223–224.
7. *STOE WinXPow (Version 2.21).* Darmstadt : Stoe & Cie, 2005.
8. *Rodríguez-Carvajal J.* Recent developments of the Program *FULLPROF* // *Commission on Powder Diffraction (IUCr), Newsletter.* 2001. Vol. 26. P. 12–19.
9. *Schubert K., Anantharaman T. R., Ata H. O. K., Meissner H. G., Pötzschke M., Rossteutscher W., Stolz E.* Einige strukturelle Ergebnisse an metallischen Phasen (6) // *Naturwissenschaften.* 1960. Bd. 47. S. 512.
10. *Pötzschke M., Schubert K.* Zum Aufbau einiger zu T^4-B^3 homologer und quasihomologer Systeme. II. Die Systeme Titan–Aluminium, Zirkonium–Aluminium, Hafnium–Aluminium, Molybdän–Aluminium und einige ternäre Systeme // *Z. Metallkd.* 1962. Bd. 53. S. 548–560.
11. *Carlson O. N., Armstrong P. E., Wilhelm H. A.* Zirconium–germanium alloy system // *Trans. Am. Soc. Met.* 1956. Vol. 48. P. 843–854.
12. *Emsley J.* *The Elements.* Oxford Univ. Press, 1997.

CRYSTAL STRUCTURE OF THE ALUMOGERMANIDE $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ **D. Maryskevych*, Ya. Tokaychuk, R. Gladyshevskii**

*Ivan Franko National University of Lviv,
Kyryla i Mefodiya Str., 6, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: danylo.maryskevych@gmail.com*

A new ternary compound, $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$, was found in the system Zr–Al–Ge at 600 °C. Its crystal structure was determined by X-ray powder diffraction using experimental data collected at room temperature on a diffractometer STOE Stadi P (Cu $K\alpha_1$ radiation, angular range $6^\circ \leq 2\theta \leq 110^\circ$, scan step 0.015°). An alloy of nominal composition $Zr_{62.5}Al_3Ge_{2.5}$, arc-melted and annealed at 600 °C, was used for the diffraction experiment. The chemical composition of the compound was confirmed by X-ray spectral analysis, carried out using an electron microscope REMMA-102-02.

The crystal structure of the ternary compound $Zr_5Al_{2.70(2)}Ge_{0.30(2)}$ belongs to the structure type Nb_5SiSn_2 (Pearson symbol $tI32$, space group $I4/mcm$, $a = 11.0145(7)$, $c = 5.3921(4)$ Å, $V = 654.17(8)$ Å³, $Z = 4$, $R_B = 0.0603$, $R_F = 0.0414$). The structure type Nb_5SiSn_2 is a ternary ordered variant of the binary type W_5Si_3 , to which the structure of the high-temperature modification of Zr_5Al_3 belongs. At 600°C $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ is a distinct ternary compound, which probably forms *via* stabilization at lower temperatures of the substitutional solid solution based on Zr_5Al_3 .

In the structure of the compound $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ the Zr atoms are surrounded by 15 and 14 atoms, which form 15- and 14-vertex Frank-Kasper polyhedra $Zr_1Al_2M_4Zr_9$ and $Zr_2M_4Zr_{10}$, respectively. The atoms of the statistical mixture M (0.851(8)Al + 0.149(8)Ge from the refinement) are surrounded by ten Zr atoms, which form defect icosahedra MZr_{10} . The coordination polyhedra of the Al atoms are bi-capped square antiprisms $AlZr_8Al_2$. The interatomic distances in the structure of the compound correlate with the sums of the atomic radii of the corresponding elements, except for short distances between Zr atoms ($\delta_{Zr_2-Zr_2} = 2.6961(2)$ Å), which indicate strong interactions between these atoms.

The structure of the compound $Zr_5Al_{2.70}Ge_{0.30}$ is built up from infinite columns of Al-centered square antiprisms $AlZr_8$ and Zr-centered tetrahedra ZrM_4 along the crystallographic direction [001].

Keywords: zirconium, aluminum, germanium, ternary compound, X-ray powder diffraction, crystal structure.

Стаття надійшла до редколегії 04.11.2019

Прийнята до друку 19.02.2020