ISSN 2078-5615. Вісник Львівського університету. Серія хімічна. 2026. Випуск 67. С. 63–71
Visnyk of the Lviv University. Series Chemistry. 2026. Issue 67. P. 63–71

УДК 546.3-663.730.682

СИНТЕЗ І КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА СПОЛУК $R_{26}Co_6In_{11}$ (R = Gd, Ho, Tm, Lu)

Г. Ничипорук*, Д. Димитриаді, П. Демченко, Я. Каличак

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна
**e-mail: halyna.nychyporuk@lnu.edu.ua*

Тернарні сполуки складу $РЗМ_{26}Co_6In_{11}$ (РЗМ = Gd, Ho, Tm, Lu) отримано електродуговим сплавлянням компактних металів в атмосфері очищеного аргону з наступним відпалюванням у вакуумованих кварцових ампулах за 600 ºC впродовж двох місяців. Кристалічну структуру досліджено методом Х-променевої дифракції від порошкових зразків. Сполуки кристалізуються у структурному типі $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$ (просторова група *P4/mbm*, символ Пірсона *tP*86) з такими параметрами елементарної комірки: a = 12,016(1); c = 15,972(2) Å для $Gd_{26}Co_6In_{11}$; a = 11,882(2); c = 15,839(3) Å для $Ho_{26}Co_6In_{11}$; a = 11,6683(5); c = 15,6358(11) Å для $Tm_{26}Co_6In_{11}$; a = 11,655(3), c = 15,636(7) Å для $Lu_{26}Co_6In_{11}$. На відміну від прототипу та ізоструктурних сполук у системах Lu–(Rh, Ir, Pt)–In, де атоми перехідних металів та галію (індію) утворюють статистичні суміші, для досліджених сполук властиве впорядковане розташування атомів кобальту та індію.

Ключові слова: індій, кристалічна структура, метод порошку, тернарна сполука.

DOI: https://doi.org/10.30970/vch.6701.063

1. Вступ

У системах рідкісноземельних металів (РЗМ) із кобальтом та індієм утворюється велика кількість тернарних сполук різної стехіометрії та ступеня складності [1, 2]. Ці сполуки часто характеризуються цікавими фізичними властивостями. Зокрема, сполуки $CeCoIn_5$ та Ce_2CoIn_8 є важкоферміонними надпровідниками [3, 4], а сполуки $Gd_6Co_{2,2}In_{0,8}$ [5] та $РЗМ_{11}Co_4In_9$ (РЗМ = Tb, Dy, Ho, Er) [6] вирізняються складною магнітною поведінкою зі зниженням температури, змінюючи основний антиферомагнітний стан на феро- чи феримагнітний. Продовжуючи систематичні дослідження взаємодії індію з кобальтом і рідкісноземельними металами, зокрема систем важких РЗМ (Gd, Ho, Tm, Lu), ми виявили існування сполук складу $РЗМ_{26}Co_6In_{11}$, які належать до структурного типу $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$ [7]. Перші сполуки зі структурою цього типу серед тернарних індидів було виявлено в системах Lu–(Rh, Ir, Pt)–In [8], пізніше, нами [9, 10] та авторами [11], – у системі Tb–Co–In. Метою цієї статті є вивчення кристалічної структури сполук $РЗМ_{26}Co_6In_{11}$ (РЗМ = Gd, Ho, Tm, Lu) методом порошкової Х-променевої дифракції.

2. Матеріали та методика експерименту

Сплави складів $Gd_{60}Co_{15}In_{25}$, $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$, $Ho_{60}Co_{10}In_{30}$ і $Lu_{60}Co_{10}In_{30}$ масою близько 1 г виготовили з метою пошуку нових сполук. Зразки отримували шляхом

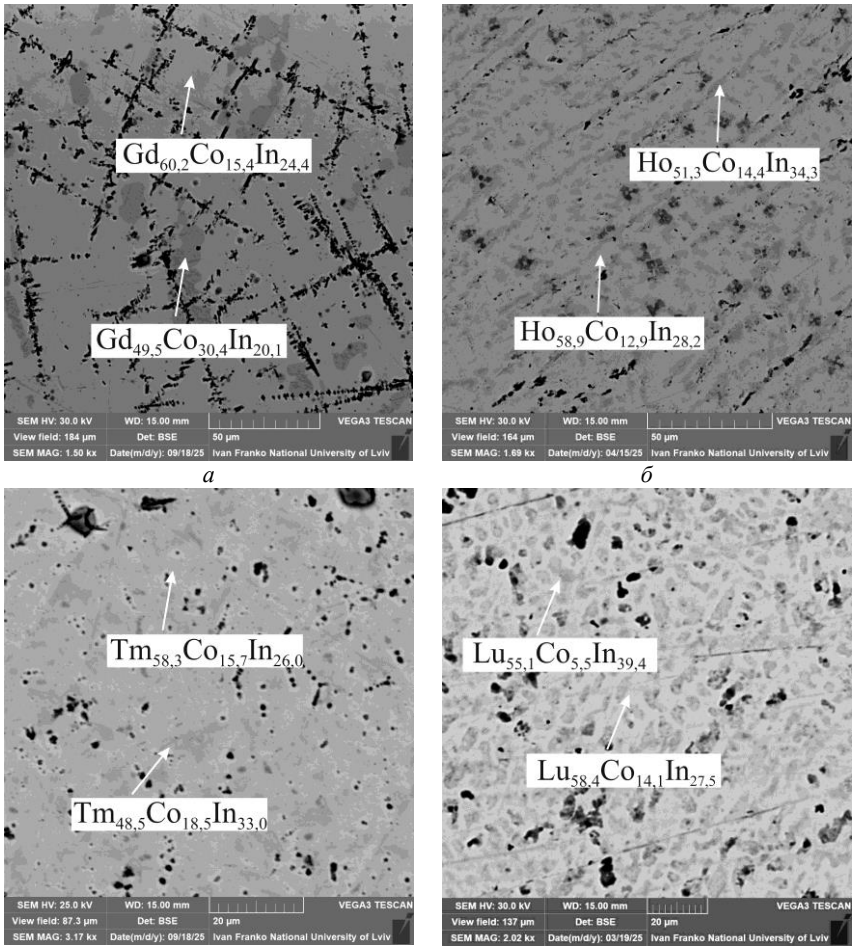
© Ничипорук Г., Димитриаді Д., Демченко П. та ін., 2026

електродугового сплавляння компактних РЗМ (із вмістом 0,999 мас. частки РЗМ), електролітичного кобальту (із вмістом 0,9992 мас. частки Co) та індію (із вмістом 0,9999 мас. частки In) в атмосфері очищеного аргону (гетер – губчастий титан) під тиском $0{,}5\times10^5$ Па. Для забезпечення гомогенізації сплави переплавляли двічі. Склад контролювали шляхом порівняння маси зразка після сплавляння з масою шихти. Гомогенізацію проводили у вакуумованих кварцових ампулах при 600 ºС впродовж двох місяців з наступним гартуванням у холодній воді без попереднього розбивання ампул. Сплави, як литі, так і відпалені, стійкі до дії довкілля протягом тривалого часу.

Фазовий аналіз виконували за дифрактограмами, отриманими на порошковому дифрактометрі (ДРОН-2.0М, Fe *K*α- випромінювання). Теоретичні рентгенограми отримували за допомогою програм PowderCell [12] і STOE WinXPOW [13]. Для уточнення кристалічної структури сполук (комплекс програм FullProf [14]) використовували масиви експериментальних даних, отриманих на дифрактометрі STOE Stadi P (Cu $K\alpha_1$- випромінювання). Мікроструктурний аналіз поверхонь зразків та кількісний і якісний EDX аналіз проводили на сканувальному електронному мікроскопі Tescan Vega 3 LMU, оснащеному детектором Oxford Instruments SDD X-Max^{N20}.

3. Результати досліджень та їх обговорення

Результати дослідження мікроструктури поверхні виготовлених зразків на сканувальному електронному мікроскопі Tescan Vega 3 LMU підтвердили склад шихти та вказали на їхній гетерофазний склад (рис. 1). За даними EDX-аналізу, гадолінієвий сплав (рис. 1, *а*) містить дві фази: світло-сіру $Gd_{60,2(5)}Co_{15,4(7)}In_{24,4(1,1)}$, що відповідає сполуці $Gd_{26}Co_6In_{11}$, і темно-сіру $Gd_{49,5(3)}Co_{30,4(4)}In_{20,1(2)}$, що відповідає невідомій сполуці приблизного складу $Gd_{50}Co_{30}In_{20}$. Мікроструктура поверхні сплаву з гольмієм (рис. 1, *б*) містить світло-сіру фазу складу $Ho_{58,9(1)}Co_{12,9(1)}In_{28,2(2)}$, що відповідає сполуці $Ho_{26}Co_6In_{11}$, і темно-сіру фазу складу $Ho_{51,3(1)}Co_{14,4(3)}In_{34,3(1)}$, що відповідає сполуці $Ho_{11}Co_4In_9$ зі структурою типу $Nd_{11}Pd_4In_9$ [15]. На мікроструктурі сплаву тулію (рис. 1, *в*) видно світло-сіру фазу складу $Tm_{58,3(7)}Co_{15,7(4)}In_{26,0(8)}$, що відповідає сполуці $Tm_{26}Co_6In_{11}$, і темно-сіру фазу складу $Tm_{48,5(7)}Co_{18,5(3)}In_{33,0(7)}$, що відповідає сполуці ~$Tm_{11}Co_4In_9$, яка має структуру типу $Nd_{11}Pd_4In_9$ [15]. Сплав лютецію (рис. 1, *г*) також є двофазовий: світло-сіра фаза складу $Lu_{58,4(7)}Co_{14,1(4)}In_{27,05(8)}$ відповідає сполуці $Lu_{26}Co_6In_{11}$, а темно-сіра фаза складу $Lu_{55,1(7)}Co_{5,5(3)}In_{39,4(7)}$ є твердим розчином кобальту у сполуці Lu_5In_4 (структурний тип Ti_5Ga_4) [16]. Варто зазначити, що отримані сплави є крихкими і на шліфах помітно раковини, а також кожен із них містить фазу приблизного складу $РЗМ_{60}Co_{15}In_{25}$.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Фотографії поверхонь мікрошліфів зразків $Gd_{60}Co_{15}In_{25}$ (*а*); $Ho_{60}Co_{10}In_{30}$ (*б*); $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ (*в*); $Lu_{60}Co_{10}In_{30}$ (*г*)

Fig. 1. Scanning electron micrographs of polished samples $Gd_{60}Co_{15}In_{25}$ (*a*); $Ho_{60}Co_{10}In_{30}$ (*b*); $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ (*c*); $Lu_{60}Co_{10}In_{30}$ (*d*)

Дифрактограми зразків, отримані на порошковому дифрактометрі (ДРОН-2.0М, Fe *K*α- випромінювання), є подібними до дифрактограми сполуки $Tb_{26}Co_6In_{11}$ [10, 11] зі структурою типу $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$ [7]. З метою розшифровки кристалічної структури сполук $РЗМ_{26}Co_6In_{11}$ для зразка складу $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ отримано масив дифракційних даних на порошковому дифрактометрі STOE Stadi P (Cu$K\alpha_1$- випромінювання) (рис. 2).

Уточнення кристалічної структури фазових складових (комплекс програм Fullprof) підтверджує правильність наших припущень – зразок містить сполуки $Tm_{26}Co_6In_{11}$ (СТ $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$) і $Tm_{11}Co_4In_9$ (СТ $Nd_{11}Pd_4In_9$). Деталі експерименту та результати уточнення кристалічної структури фаз у зразку $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ узагальнено в табл. 1.

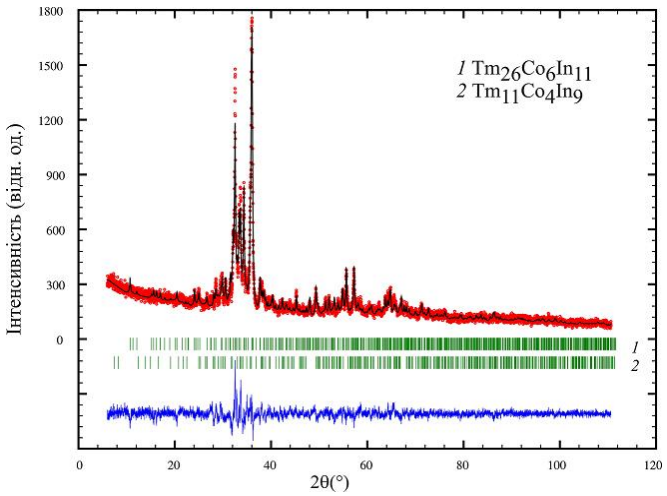


Рис. 2. Експериментальна (•), розрахована (–) та різницева (внизу) дифрактограми зразка $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ (дифрактометр STOE Stadi P, Cu $K\alpha_1$- випромінювання)
Fig. 2. Experimental (•), calculated (–) and difference (bottom) X-ray patterns of the sample $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ (diffractometer STOE Stadi P, Cu $K\alpha_1$- radiation)

Таблиця 1

Деталі експерименту та результати уточнення кристалічної структури фаз у зразку $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$

Table 1

Experimental details and results of crystal structure refinement of phases in sample $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$

Склад зразка	$Tm_{60}Co_{15}In_{25}$	
Склад сполуки	$Tm_{26}Co_6In_{11}$	$Tm_{11}Co_4In_9$
Вміст у зразку, %	78,4	21,6
Розрахована густина D_x, г/см^3	9,37	9,74
Структурний тип	$Sm_{26}Ga_6Co_{11}$	$Nd_{11}Pd_4In_9$
Просторова група, №	*P4/mbm*, 127	*Cmmm*, 65
Символ Пірсона	*tP*86	*oC*48
Дифрактометр	STOE Stadi P	
Випромінювання, Å	1,54060 (Cu $K\alpha_1$)	
Межі 2θ, °	6,000–110,625	
Крок, час знімання	0,015°, 2500 с	
Параметри комірки, Å	a = 11,6683(5); c = 15,6358(11)	a = 14,226(3); b = 21,352(5); c = 3,5118(5)
Об'єм комірки, Å^3	2128,8(2)	1066,7(4)
$B_{Overall}$, Å^2	0,808(8)	1,18(2)
Корекція на абсорбцію, μ_{Reff}	1,9	
Параметри профілю U; V; W	0,0297(1); 0,007(1); 0,0499(1)	
R_p; R_{wp}, $R_{exp.}$, %	7,62; 9,80; 7,34	
R_{Bragg}; R_F, %	9,84; 6,55	9,13; 6,99

У табл. 2 подано координати атомів у цих структурах. Проєкцію структури сполуки $Tm_{26}Co_6In_{11}$ і координаційні многогранники атомів наведено на рис. 3, а міжатомні віддалі подано у табл. 3.

Таблиця 2

Координатні параметри атомів у структурах сполук $Tm_{26}Co_6In_{11}$ і $Tm_{11}Co_4In_9$

Table 2

Parameters of the atoms for $Tm_{26}Co_6In_{11}$ and $Tm_{11}Co_4In_9$ structures

Атом	ПСТ	*x/a*	*y/b*	*z/c*
		$Tm_{26}Co_6In_{11}$		
Tm1	16*l*	0,08003(1)	0,19662(1)	0,12911(0)
Tm2	16*l*	0,20266(1)	0,07671(1)	0,31552(1)
Tm3	8*j*	0,08382(2)	0,22373(1)	1/2
Tm4	4*g*	0,17794(1)	0,67794(1)	0
Tm5	4*f*	0	1/2	0,39724(1)
Tm6	4*f*	0	1/2	0,17582(1)
Co1	8*k*	0,65562(2)	0,15562(2)	0,30094(2)
Co2	4*h*	0,15339(3)	0,65339(3)	1/2
In1	8*k*	0,19038(1)	0,69038(1)	0,16819(1)
In2	4*g*	0,59301(1)	0,09301(1)	0
In3	4*e*	0	0	0,41009(2)
In4	4*e*	0	0	0,23166(1)
In5	2*a*	0	0	0
		$Tm_{11}Co_4In_9$		
Tm1	8*p*	0,24496(2)	0,17118(1)	0
Tm2	4*i*	0	0,15731(2)	0
Tm3	4*i*	0	0,38857(1)	0
Tm4	4*g*	0,26825(2	0	0
Tm5	2*a*	0	0	0
Co	8*q*	0,35314(5)	0,10767(3)	1/2
In1	8*q*	0,09251(2)	0,26183(1)	1/2
In2	8*q*	0,14965(2)	0,07826(1)	1/2
In3	2*c*	1/2	0	1/2

У структурі сполуки $Tm_{26}Co_6In_{11}$ координаційні числа атомів РЗМ є в межах 13–15, атомів кобальту 10–11 та атомів індію 9–10. Міжатомні відстані (табл. 3) загалом узгоджуються з сумою відповідних атомних радіусів [17], проте деякі з них, зокрема Tm1–In1 (2,7487(2) Å) і Tm4–In1 (2,6377(2) Å), є суттєво скороченими, однак сумірними із відстанями у структурі $Lu_{26}Pt_{7,55}In_{9,45}$ (Lu4-Pt1/In1 δ = 2,781Å) [8]. Автори [7, 8] детально проаналізували особливості структури типу $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$ для сполук у системах РЗМ–Co–Ga та РЗМ–*T*–In (*T* = Co, Rh, Ir, Pt). На відміну від прототипу, де атоми Co та Ga утворюють статистичні суміші та сполуки $Lu_{26}Pt_{7,55}In_{9,45}$, де частина атомів Pt та In утворюють статистичні суміші, у структурах нових сполук атоми меншого розміру (Co, In) займають окремі правильні системи точок.

Параметри елементарної комірки ізоструктурних до типу $Sm_{26}Ga_6Co_{11}$ сполук (ДРОН-2.0М, Fe*K*α-випромінювання) узгоджуються з розмірами атомів РЗМ [17]: $Gd_{26}Co_6In_{11}$ (*a* = 12,016(1); *c* = 15,972(2) Å), $Ho_{26}Co_6In_{11}$ (*a* = 11,882(2); *c* = 15,839(3) Å) та $Lu_{26}Co_6In_{11}$ (*a* = 11,655(3); *c* = 15,636(7) Å).

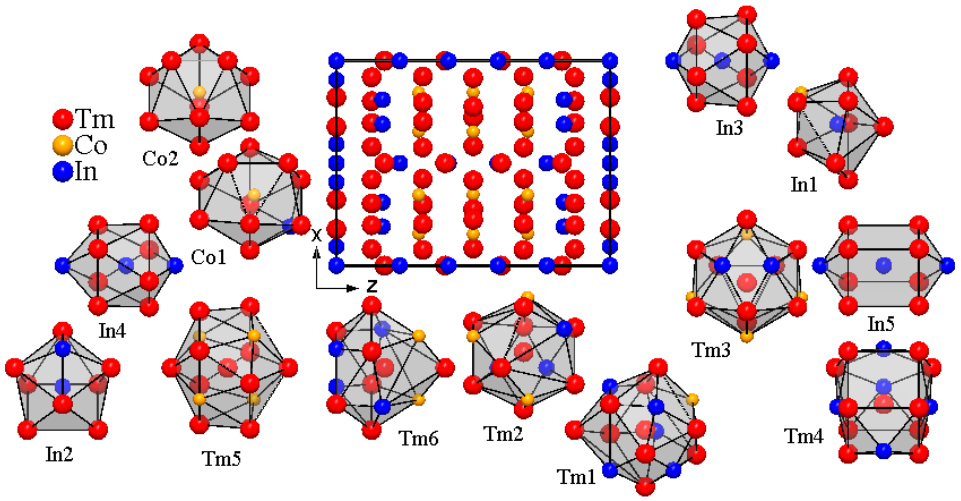


Рис. 3. Проєкція кристалічної структури сполуки $Tm_{26}Co_6In_{11}$ на площину *XZ* і координаційні многогранники атомів
Fig. 3. Projection of the $Tm_{26}Co_6In_{11}$ structure onto the *XZ* plane and coordination polyhedra of atoms

Таблиця 3

Міжатомні віддалі (δ) та координаційні числа атомів у структурі сполуки $Tm_{26}Co_6In_{11}$

Table 3

Interatomic distances (δ) and coordination numbers of atoms for $Tm_{26}Co_6In_{11}$ structure

Атом		δ, Å	КЧ	Атом		δ, Å	КЧ
1		*2*	*3*	*4*		*5*	*6*
Tm1	In1	2,7487(2)	15	Tm2	In4	2,8482(2)	14
	In4	2,9507(2)			In3	2,9290(2)	
	In2	3,1818(2)			In1	2,9366(2)	
	In5	3,1954(2)			Co1	3,1793(3)	
	Co1	3,3119(3)			Co1	3,1837(3)	
	Tm2	3,4416(2)			Tm1	3,4416(2)	
	In1	3,4738(2)			Tm3	3,4481(2)	
	Tm4	3,4783(2)			Co2	3,4558(3)	
	2Tm1	3,5030(2)			Tm1	3,5355(2)	
	Tm2	3,5355(2)			2Tm2	3,5757(2)	
	Tm1	3,6856(2)			Tm3	3,6312(2)	
	Tm6	3,7331(2)			Tm2	3,6407(2)	
	Tm4	3,9087(2)			Tm5	3,8041(2)	
	Tm1	4,0375(3)					

Закінчення табл. 2

1		*2*	*3*	*4*		*5*	*6*
Tm3	Co2	3,1172(4)	15	Tm5	2Co1	2,9769(3)	14
	2In3	3,1221(2)			2Co2	2,9980(3)	
	Co2	3,1742(4)			Tm5	3,2133(4)	
	Tm3	3,1758(3)			Tm6	3,4622(4)	
	2Tm2	3,4481(2)			4Tm3	3,7323(2)	
	2Co1	3,5173(4)		Tm6	2In1	3,1438(2)	13
	2Tm2	3,6312(2)			2In2	3,1485(3)	
	2Tm5	3,7323(2)			2Co1	3,2283(3)	
	2Tm3	3,9424(3)			Tm5	3,4622(4)	
Tm4	2In1	2,6377(2)	15		4Tm1	3,7331(2)	
	2In2	3,3132(3)			2Tm4	4,0223(2)	
	4Tm1	3,4782(2)					
	In2	3,7796(3)					
	4Tm1	3,9087(2)					
	2Tm6	4,0223(2)					
Co1	Tm5	2,9769(3)	11	In2	In2	3,0696(2	10
	2Tm2	3,1793(3)			2Tm6	3,1485(3)	
	2Tm2	3,1837(3)			4Tm1	3,1818(2)	
	Tm6	3,2283(3)			2Tm4	3,3132(3)	
	In1	3,2812(3)			Tm4	3,7796(3)	
	2Tm1	3,3119(3)		In3	In4	2,7899(4)	10
	2Tm3	3,5173(4)			In3	2,8117(4)	
Co2	2Tm5	2,9980(3)	10		4Tm2	2,9290(2)	
	2Tm3	3,1172(4)			4Tm3	3,1221(2)	
	2Tm3	3,1742(4)		In4	In3	2,7899(4)	10
	4Tm2	3,4558(3)			4Tm2	2,8482(2)	
In1	Tm4	2,6377(2)	9		4Tm1	2,9507(2)	
	2Tm1	2,7487(2)			In5	3,6222(3)	
	2Tm2	2,9366(2)		In5	8Tm1	3,1954(2)	10
	Tm6	3,1438(2)			2In4	3,6222(3)	
	Co1	3,2812(3)					
	2Tm1	3,4738(2)					

4. Висновки

Виявлено існування чотирьох сполук складу $РЗМ_{26}Co_6In_{11}$ (РЗМ = Gd, Ho, Tm, Lu) зі структурою типу $Sm_{26}Ga_6Co_{11}$, а також сполуки $Tm_{11}Co_4In_9$ (СТ $Nd_{11}Pd_4In_9$). Їхню кристалічну структуру досліджено методом Х-променевої дифракції від порошкових зразків. Для усіх цих сполук властиве впорядковане розташування атомів кобальту та індію.

5. Подяка

Автори вдячні за фінансову підтримку фонду Simons Foundation (SFI-PD-Ukraine-00014574).

1. *Kalychak Ya.* Composition and crystal structure of rare-earth–Co–In compounds // J. Alloys Compd. 1999. Vol. 291. P. 80–88. DOI: https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00290-X
2. *Kalychak Ya. M., Zaremba V. I., Pöttgen R., Lukachuk M., Hoffmann R.-D.* Rare Earth–Transition Metal–Indides // In: K. A. Gschneidner, Jr., J.-C. Bünzli, V. K. Pecharsky (Eds.). *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. Elsevier; Amsterdam, 2005. Vol. 34. P. 1–133. DOI: https://doi.org/10.1016/S0168-1273(04)34001-8
3. *Petrovic C., Pagliuso P. G., Hundley M. F., Movshovich R., Sarrao J. L., Thompson J. D., Fisk Z., Monthoux P.* Heavy-fermion superconductivity in $CeCoIn_5$ at 2.3 K // J. Phys.: Condens. Matter. 2001. Vol. 13. P. L337–L342. DOI: https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/17/103
4. *Chen G., Ohara S., Hedo M., Uwatoko Y., Sekamoto I.* Transport properties of the heavy-fermion superconductor Ce_2CoIn_8 // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. Vol. 15. P. S2175–S2178. DOI: https://doi.org/10.1088/0953-8984/15/28/346
5. *Canepa F., Napoletano M., Manfrinetti P., Merlo F.* $Gd_6Co_{2.2}In_{0.8}$: an intermetallic compound with complex magnetic behavior // J. Alloys Compd. 2002. Vol. 334. P. 34–39. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01774-1
6. *Baran S., Tyvanchuk Yu., Szytula A. C*rystal structure and magnetic properties of $R_{11}Co_4In_9$ (R = Tb, Dy, Ho, Er) compounds // Intermetallics. 2021. Vol. 130. P. 107065. DOI: http://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.107065
7. *Yarmolyuk Y. P., Grin Y., Olesh O. M.* Crystal structure of the compounds $R_{26}Ga_xCo_{17-x}$ (R = La, Ce, Pr, Nd, or Sm,) and $R_{26}Ga_xNi_{17-x}$ (R = Ce, Pr, Nd, or Sm) // Sov. Phys. Crystallogr. 1980. Vol. 25. P. 143–146.
8. *Gulay N. L., Kösters J., Kai Reimann M., Kalychak Ya. M., Pöttgen R.* $Lu_{26}T_{17-x}In_x$ (T = Rh, Ir, Pt) – first indium intermetallics with $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$ type structure // Z. Naturforsch. 2022. Vol. 77b. P. 735−741. DOI: https://doi.org/10.1515/znb-2022-0111
9. *Nychyporuk G. P., Dymytryadi D. G., Kalychak Ya. M.* Synthesis and crystal structure of $Tb_{26}Co_{6.4}In_{10.6}$ compound // Physics and chemistry of solids: status, achievements and prospects: materials VIII Scientific and practical conference. Lutsk, 18–19 October 2024. P. 73.
10. *Nychyporuk G., Dymytryadi D., Zaremba V., Delenko O., Kalychak Ya.* The system Tb–Co–In: phase equilibria and crystal structure of the compounds // Proc. Shevchenko Sci. Soc. Chem. Sci. 2025. Vol. LXXVIII. P. 194−205. DOI: 10.37827/ntsh.chem.2025.78.194
11. *Chen H., Yao J., Garchev A. V., Yapaskurt V. O., Morozkin A. V.* Tb–Co–In system at 870 K and magnetic ordering of Tb_2CoIn_8, $Tb_{23}Co_7In_{20}$, $Tb_{26}Co_5In_{12}$ and Tb_6Co_2In // J. Solid State Chemistry. 2025. Vol. 341. P. 125089. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.125089
12. *Kraus W., Nolze G.* Powder Cell For Windows. Berlin, 1999.
13. STOE WinXPOW, Version 1.2, STOE & CIE GmbH. Darmstadt, 2001.
14. *Rodriguez-Carvajal J.* Recent developments of the program FULLPROF // Commission on Powder Diffraction. IUCr Newsletter. 2001. Vol. 26. P. 12–19.

15. *Sojka L., Manyako M., Černý R., Ivanyk M., Belan B., Gladyshevskii R., Kalychak Ya.* $Nd_{11}Pd_4In_9$ compound – A new member of the homological series based on AlB_2 and CsCl type // Intermetallics. 2008. No. 5. P. 625–628. DOI: https://doi.org/10.1016/j.intermet.2008.01.001
16. *Palenzona A., Manfrinetti P., Palenzona R.* The phase diagram of the Lu–In system // J. Alloys Compd. 1998. Vol. 267. P. 154–157. DOI: https://doi.org/10.1016/S0925-8388(97)00558-6
17. *Emsley J.* The Elements: 2-nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1991. 251 p.

SYNTHESIS AND CRYSTAL STRUCTURES OF THE COMPOUNDS $R_{26}Co_6In_{11}$ (R = Gd, Ho, Tm, Lu)

G. Nychyporuk*, D. Dymytryadi, P. Demchenko, Ya. Kalychak

Ivan Franko National University of Lviv,
Kyryla i Mefodiya Str., 6, 79005 Lviv, Ukraine
**e-mail: halyna.nychyporuk@lnu.edu.ua*

$Gd_{26}Co_6In_{11}$, $Ho_{26}Co_6In_{11}$, $Tm_{26}Co_6In_{11}$, $Lu_{26}Co_6In_{11}$ and $Tm_{11}Co_4In_9$ compounds were synthesized by melting of compact metals in an arc-furnace on a water-cooled Cu-plate under an argon atmosphere. The purities of the starting materials were 99.9 % for rare-earth metals, 99.92 % for Co and 99.99 % for In. To ensure homogeneity, the ingots were arc-melted twice. The overall weight loss was less then 1 wt. %. The samples were then annealed at 870 K for two months in evacuated fused-silica tubes and quenched in cold water. Microstructures of polished samples and quantitative and qualitative analysis were carried out on a Tescan Vega 3 LMU scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments SDD X-Max^{N20} detector.

Crystal structures of $Tm_{26}Co_6In_{11}$ and $Tm_{11}Co_4In_9$ compounds have been refined using X-ray powder data (diffractometer STOE Stadi P, Cu$K\alpha_1$- radiation). $Tm_{26}Co_6In_{11}$ belong to $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$-type structure (space group *P4/mbm*, Pearson code *tP*86): a = 11.6683(5); c = 15.6358(11) Å, while $Tm_{11}Co_4In_9$ crystallize with $Nd_{11}Pd_4In_9$-type structure (space group *Cmmm*, Pearson code *oC*48): a = 14.226(3); b = 21.352(5); c = 3.5118(5) Å. In $Tm_{26}Co_6In_{11}$ structure the coordination numbers of rare earth atoms are in the range of 13–15, cobalt atoms 10–11, and indium atoms 9–10. The interatomic distances are generally consistent with the sum of the corresponding atomic radii. The value of unit cell parameters for the isostructural ($Sm_{26}Co_{11}Ga_6$-type structure) $Gd_{26}Co_6In_{11}$ (a = 12.016(1); c = 15.972(2) Å), $Ho_{26}Co_6In_{11}$ (a = 11.882(2); c = 15.839(3) Å) and $Lu_{26}Co_6In_{11}$ (a = 11.655(3), c = 15.636(7) Å) compounds are corresponds to the size of the atoms of rare earth elements. In the $RE_{26}Co_6In_{11}$ compounds, cobalt and indium atoms are arranged in an ordered manner. In contrast, in the prototype $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$ and the $Lu_{26}Pt_{7.55}In_{9.45}$ compound, smaller atoms Co/Ga or Pt/In form statistical mixtures.

Keywords: indium, crystal structure, powder data, ternary compound.

Стаття надійшла до редколегії 15.11.2025
Після доопрацювання 02.01.2026
Прийнята до друку 12.02.2026
Оприлюднена онлайн 29.05.2026