

УДК 546.3-663.730.682

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

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

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

Тернарні сполуки складу $P3M_{26}Co_6In_{11}$ ($P3M = Gd, Ho, Tm, Lu$) отримано електродуговим сплавленням компактних металів в атмосфері очищеного аргону з наступним відпалюванням у вакуумованих кварцових ампулах за $600\text{ }^\circ\text{C}$ впродовж двох місяців. Кристалічну структуру досліджено методом X-променевої дифракції від порошкових зразків. Сполуки кристалізуються у структурному типі $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$ (просторова група $P4/mbm$, символ Пірсона $iP86$) 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 ($P3M$) 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 $P3M_{11}Co_4In_9$ ($P3M = Tb, Dy, Ho, Er$) [6] вирізняються складною магнітною поведінкою зі зниженням температури, змінюючи основний антиферромагнітний стан на феро- чи феримагнітний. Продовжуючи систематичні дослідження взаємодії індію з кобальтом і рідкісноземельними металами, зокрема систем важких $P3M$ (Gd, Ho, Tm, Lu), ми виявили існування сполук складу $P3M_{26}Co_6In_{11}$, які належать до структурного типу $Sm_{26}Co_{11}Ga_6$ [7]. Перші сполуки зі структурою цього типу серед тернарних індідів 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 $P3M_{26}Co_6In_{11}$ ($P3M = Gd, Ho, Tm, Lu$) методом порошкової X-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

електродугового сплавлення 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 $0,5 \times 10^5$ Па. Для забезпечення гомогенізації сплави переплавляли двічі. Склад контролювали шляхом порівняння маси зразка після сплавлення з масою шихти. Гомогенізацію проводили у вакуумованих кварцових ампулах при 600 °C впродовж двох місяців з наступним гартуванням у холодній воді без попереднього розбивання ампул. Сплави, як литі, так і відпалені, стійкі до дії доквілля протягом тривалого часу.

Фазовий аналіз виконували за дифрактограмами, отриманими на порошковому дифрактометрі (ДРОН-2.0М, Fe $K\alpha$ - 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 $\sim Tm_{11}Co_4In_9$, 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 $PZM_{60}Co_{15}In_{25}$.

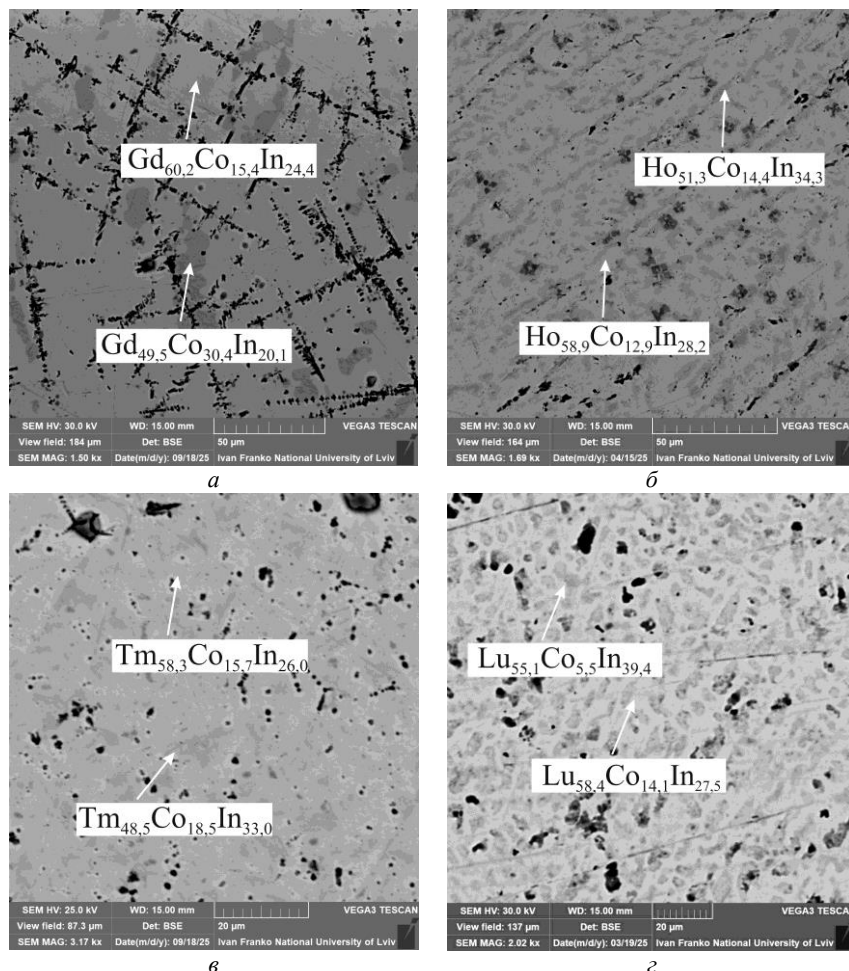


Рис. 1. Фотографії поверхонь мікрошліфів зразків $Gd_{60}Co_{15}In_{25}$ (*a*);
 $Ho_{60}Co_{10}In_{30}$ (*б*); $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ (*в*); $Lu_{60}Co_{10}In_{30}$ (*г*)
Fig. 1. Scanning electron micrographs of polished samples $Gd_{60}Co_{15}In_{25}$ (*a*);
 $Ho_{60}Co_{10}In_{30}$ (*b*); $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ (*c*); $Lu_{60}Co_{10}In_{30}$ (*d*)

Дифрактограми зразків, отримані на порошковому дифрактометрі (ДРОН-2.0М, Fe $K\alpha$ - 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 ($CuK\alpha_1$ - 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.

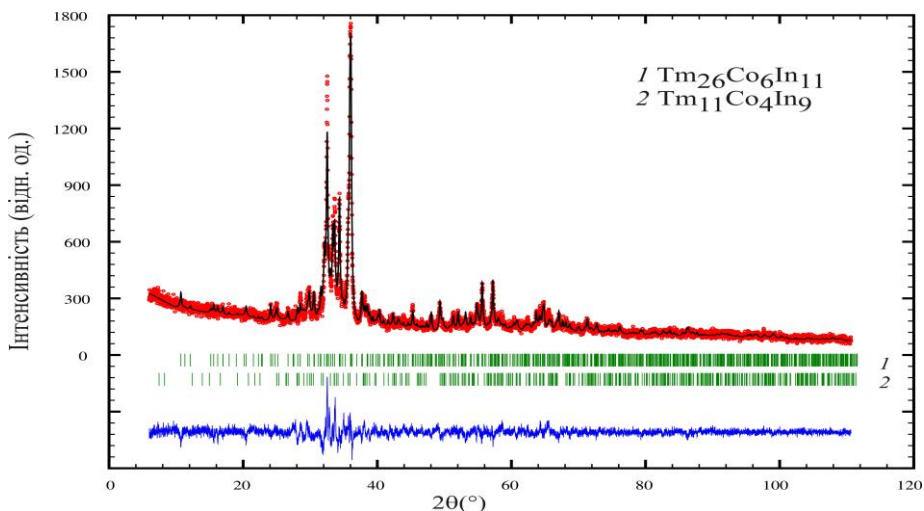


Рис. 2. Експериментальна (•), розрахована (–) та різницєва (внизу) дифрактограми зразка $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ (дифрактометр STOE Stadi P, Cu $K\alpha_1$ - випромінювання)
Fig. 2. Experimental (•), calculated (–) and difference (bottom) X-ray patterns of the sample $Tm_{60}Co_{15}In_{25}$ (diffractometer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

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

Таблиця 1

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

Table 1

	$Tm_{60}Co_{15}In_{25}$	
	$Tm_{26}Co_6In_{11}$	$Tm_{11}Co_4In_9$
Склад зразка		
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	$tP86$	$oC48$
Дифрактометр	STOE Stadi P	
Випромінювання, Å	1,54060 (Cu $K\alpha_1$)	
Межі 2θ , °	6,000–110,625	
Крок, час знімання	0,015°, 2500 c	
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_{Ref}	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. Проекцію 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
<i>Tm₂₆Co₆In₁₁</i>				
Tm1	16l	0,08003(1)	0,19662(1)	0,12911(0)
Tm2	16l	0,20266(1)	0,07671(1)	0,31552(1)
Tm3	8j	0,08382(2)	0,22373(1)	1/2
Tm4	4g	0,17794(1)	0,67794(1)	0
Tm5	4f	0	1/2	0,39724(1)
Tm6	4f	0	1/2	0,17582(1)
Co1	8k	0,65562(2)	0,15562(2)	0,30094(2)
Co2	4h	0,15339(3)	0,65339(3)	1/2
In1	8k	0,19038(1)	0,69038(1)	0,16819(1)
In2	4g	0,59301(1)	0,09301(1)	0
In3	4e	0	0	0,41009(2)
In4	4e	0	0	0,23166(1)
In5	2a	0	0	0
<i>Tm₁₁Co₄In₉</i>				
Tm1	8p	0,24496(2)	0,17118(1)	0
Tm2	4i	0	0,15731(2)	0
Tm3	4i	0	0,38857(1)	0
Tm4	4g	0,26825(2)	0	0
Tm5	2a	0	0	0
Co	8q	0,35314(5)	0,10767(3)	1/2
In1	8q	0,09251(2)	0,26183(1)	1/2
In2	8q	0,14965(2)	0,07826(1)	1/2
In3	2c	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 $Lu_{26}Pt_{7,55}In_{9,45}$ (Lu_4-Pt_1/In_1 $\delta = 2,781$ Å) [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, FeK 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).

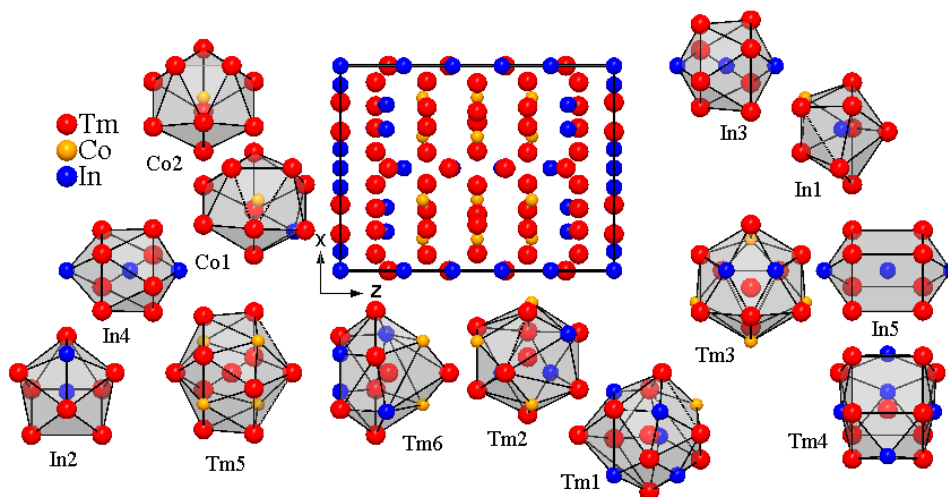


Рис. 3. Проекція кристалічної структури сполуки $Tm_{26}Co_6In_{11}$ на площину XZ і координаційні многогранники атомів

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	15	Tm2	In4	14
	In4			In3	
	In2			In1	
	In5			Co1	
	Co1			Co1	
	Tm2			Tm1	
	In1			Tm3	
	Tm4			Co2	
	2Tm1			Tm1	
	Tm2			2Tm2	
	Tm1			Tm3	
	Tm6			Tm2	
	Tm4			Tm5	
	Tm1				

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)		
					4Tm1	3,7331(2)		
Tm4	2In1	2,6377(2)	15	2Tm4	4,0223(2)			
	2In2	3,3132(3)						
	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)		
					4Tm2	2,9290(2)		
Co2	2Tm5	2,9980(3)	10	4Tm3	3,1221(2)			
	2Tm3	3,1172(4)						
	2Tm3	3,1742(4)						
	4Tm2	3,4558(3)						
In1	Tm4	2,6377(2)	9	In4	In3	2,7899(4)	10	
	2Tm1	2,7487(2)			4Tm2	2,8482(2)		
	2Tm2	2,9366(2)			4Tm1	2,9507(2)		
	Tm6	3,1438(2)			In5	3,6222(3)		
	Co1	3,2812(3)			In5	8Tm1		3,1954(2)
	2Tm1	3,4738(2)		2In4		3,6222(3)		

4. Висновки

Виявлено існування чотирьох сполук складу $P3M_{26}Co_6In_{11}$ ($P3M = Gd, Ho, Tm, Lu$) зі структурою типу $Sm_{26}Ga_6Co_{11}$, а також сполуки $Tm_{11}Co_4In_9$ ($CT Nd_{11}Pd_4In_9$). Їхню кристалічну структуру досліджено методом X-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](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](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 CeCoIn₅ 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 Ce₂CoIn₈ // *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.* Gd₆Co_{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](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01774-1)
6. *Baran S., Tyvanchuk Yu., Szytula A.* Crystal structure and magnetic properties of R₁₁Co₄In₉ (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 R₂₆Ga_xCo_{17-x} (R = La, Ce, Pr, Nd, or Sm,) and R₂₆Ga_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.* Lu₂₆T_{17-x}In_x (T = Rh, Ir, Pt) – first indium intermetallics with Sm₂₆Co₁₁Ga₆ type structure // *Z. Naturforsch.* 2022. Vol. 77b. P. 735–741.
DOI: <https://doi.org/10.1515/znb-2022-0111>
9. *Nychporuk G. P., Dymytryadi D. G., Kalychak Ya. M.* Synthesis and crystal structure of Tb₂₆Co_{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. *Nychporuk 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](https://doi.org/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 Tb₂CoIn₈, Tb₂₃Co₇In₂₀, Tb₂₆Co₅In₁₂ and Tb₆Co₂In // *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.* Nd₁₁Pd₄In₉ compound – A new member of the homological series based on AlB₂ 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](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 R₂₆Co₆In₁₁ (R = Gd, Ho, Tm, Lu)

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

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

Gd₂₆Co₆In₁₁, Ho₂₆Co₆In₁₁, Tm₂₆Co₆In₁₁, Lu₂₆Co₆In₁₁ and Tm₁₁Co₄In₉ 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 than 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 Tm₂₆Co₆In₁₁ and Tm₁₁Co₄In₉ compounds have been refined using X-ray powder data (diffractometer STOE Stadi P, CuK α 1- radiation). Tm₂₆Co₆In₁₁ belong to Sm₂₆Co₁₁Ga₆-type structure (space group *P4/mbm*, Pearson code *tP86*): $a = 11.6683(5)$; $c = 15.6358(11)$ Å, while Tm₁₁Co₄In₉ crystallize with Nd₁₁Pd₄In₉-type structure (space group *Cmmm*, Pearson code *oC48*): $a = 14.226(3)$; $b = 21.352(5)$; $c = 3.5118(5)$ Å. In Tm₂₆Co₆In₁₁ 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 (Sm₂₆Co₁₁Ga₆-type structure) Gd₂₆Co₆In₁₁ ($a = 12.016(1)$; $c = 15.972(2)$ Å), Ho₂₆Co₆In₁₁ ($a = 11.882(2)$; $c = 15.839(3)$ Å) and Lu₂₆Co₆In₁₁ ($a = 11.655(3)$, $c = 15.636(7)$ Å) compounds are corresponds to the size of the atoms of rare earth elements. In the RE₂₆Co₆In₁₁ compounds, cobalt and indium atoms are arranged in an ordered manner. In contrast, in the prototype Sm₂₆Co₁₁Ga₆ and the Lu₂₆Pt_{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