

УДК 544.344:536.7

М.А. Турчанін^{1*}, Т.Я. Великанова², К.Є. Корнієнко²

¹Донбаська державна машинобудівна академія,
вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, Донецька обл., Україна, 84313
E-mail: phch@dgma.donetsk.ua

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України,
вул. Крижановського, 3, м. Київ, Україна, 03142

ІНФОРМАЦІЯ ПРО ЩОРІЧНИЙ ЗВІТ УКРАЇНСЬКОЇ КОМІСІЇ З ДІАГРАМ СТАНУ ТА ТЕРМОДИНАМІКИ (2022 РІК)

Українська комісія з діаграм стану та термодинаміки вже протягом майже тридцяти років (з 1994 року) є членом Міжнародної комісії з діаграм стану (Alloy Phase Diagram International Commission, APDIC), яка загалом налічує 18 представників від 26 країн світу. Головними завданнями APDIC є обмін науковою інформацією та координація діяльності міжнародної наукової спільноти головним чином у галузі діаграм стану і термодинаміки фаз. В рамках щорічного звіту Української комісії на засіданні APDIC 27 травня 2022 року було представлено інформацію за результатами діяльності українських науковців у цій галузі у 2021 році. Її подано у вигляді таблиці, в якій зібрані дані про досліджені системи і одержані результати, і переліку посилань на видані роботи. Відповідну інформацію до Української комісії надали науковці Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка і Донбаської державної машинобудівної академії.

Ключові слова: APDIC, діаграма стану, термодинаміка фаз, щорічний звіт.

Вступ

Українська комісія з діаграм стану та термодинаміки вже протягом майже тридцяти років (з 1994 р.) є членом Міжнародної комісії з діаграм стану (Alloy Phase Diagram International Commission, APDIC), яка загалом налічує 18 представників від 26 країн світу. Голова APDIC — доктор Урсула Каттнер (Національний інститут стандартів і технології, NIST, Гейтерсбург, штат Меріленд, США). Головними завданнями APDIC є обмін науковою інформацією та координація діяльності міжнародної наукової спільноти, головним чином у галузі діаграм стану і термодинаміки фаз. Серед інтересів Комісії також кристалографія інтерметалідних фаз, термодинаміка та кінетика фазових перетворень, поєднання фундаментальних експериментальних та теоретичних досліджень з інженерним впровадженням матеріалів і багато інших тем. Члени Комісії самостійно виконують свої індивідуальні наукові програми та зустрічаються на засіданнях для обговорення нагальних питань узгодження своєї діяльності. Ці засідання

проводяться щорічно під час роботи Міжнародної конференції з комп'ютерного поєднання діаграм стану і термохімії (International Conference on Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, CALPHAD).

Чергове засідання APDIC відбулося 27 травня 2022 р. в рамках конференції CALPHAD XLIX, яка проходила з 22 по 27 травня 2022 р. у Стокгольмі (Швеція). Вперше після початку пандемії COVID-19 конференція проводилася у змішаному режимі — очної участі та онлайн. Так, у засіданні APDIC майже дві третини представників брали участь заочно. Україну представляли голова Української комісії з діаграм стану та термодинаміки професор Михайло Турчанін (Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Краматорськ) та професор Тамара Великанова (Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України (ІПМ НАНУ, м. Київ).

У цьому році у засіданні APDIC взяли участь 16 постійних членів. Представники російської федерації були відсторонені від участі в мітингу на знак засудження міжнародною спільнотою злочинного військового нападу на нашу країну. Учасники засідання висловили слова підтримки нашій державі та українським науковцям.

Результати діяльності у 2021 році

Інформацію для щорічного звіту Української комісії з діаграм стану та термодинаміки на засіданні APDIC за результатами діяльності у 2021 році надали науковці Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України, Київського національного університету імені Тараса Шевченка і Донбаської державної машинобудівної академії. Коротка інформація про результати досліджень представлена в таблиці.

В ІПМ НАНУ дослідження, пов'язані з вивчення діаграм стану, фазового складу сплавів і термодинаміки фаз, проводились у відділах фізичної хімії неорганічних матеріалів, фізико-хімії і технології тугоплавких оксидів та функціональної кераміки на основі рідкісних земель. Науковцями відділу фізичної хімії неорганічних матеріалів вивчались фазові рівноваги та фазові перетворення у потрійних системах із тугоплавкими боридами. Зокрема, в рамках CALPHAD-процедури з урахуванням результатів власних ключових експериментів та нових експериментальних даних, наведених у літературі, отримано термодинамічний опис потрійної системи B–Fe–Mo [1]; вивчено фазовий склад, структуру та властивості сплавів з області Ni–MoNi–Mo₂NiB₂–Ni₂B [2]. Досліджено фазовий склад та властивості ряду високоентропійних сплавів потрійної системи Mo–Nb–Ti, які є перспективними матеріалами для біомедичних застосувань, особливо в якості несучого імпланту [3, 4]. Базуючись на власних експериментальних даних, встановлено характер фазових рівноваг у потрійній системі, утвореній *p*-елементом IV групи оловом з *d*-металами титаном та цирконієм [5]. Також вивчено характер фазових рівноваг у цирконієвому куті потрійної системи Co–Ni–Zr та взаємодію її сплавів з воднем [6, 7]. Методом ізоперіболічної калориметрії визначено парціальні та інтегральні ентальпії змішування розплавів подвійних систем Gd–Sn [8, 9], In–Sr [10], Ni–Pr [11] та потрійної системи Gd–Ni–Sn [9].

У відділі фізико-хімії і технології тугоплавких оксидів вивчали структуру, фазовий склад та фізико-хімічні властивості нанопорошків високо-

Інформація про результати проведених досліджень

Система	Джерело	Одержаний результат
Ag–Au–Bi	[28]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Ag–Au–Sb	[29]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Ag–Ca–Ge	[21]	Ентальпії змішування розплавів при 1300–1550 К
Ag–Cu–In	[30]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Ag–Cu–P	[31]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Al–Ce–O–Y–Zr	[13, 14]	Фізико-хімічні властивості ультратонких порошків системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--CeO}_2$
Al–Cu–Eu	[20]	Ентальпії змішування розплавів при 1300–1450 К вздовж перерізів $x_{\text{Cu}}/x_{\text{Eu}} = 0,70/0,30, 0,50/0,50$ і $0,27/0,73$ (при $x_{\text{Al}} = 0\text{--}0,3$) та $x_{\text{Al}}/x_{\text{Eu}} = 0,20/0,80$ і $0,47/0,53$ (при $x_{\text{Zr}} = 0\text{--}0,3$)
Al–Fe–Ge	[18]	Формування ближнього порядку в розплавах
Al–Gd–Mn	[22]	Ентальпії змішування розплавів при 1650 К вздовж перерізів $x_{\text{Gd}}/x_{\text{Mn}} = 0,30/0,70$ і $0,65/0,35$ (при $x_{\text{Al}} = 0\text{--}0,3$), $x_{\text{Al}}/x_{\text{Mn}} = 0,80/0,20$ і $0,50/0,50$ (при $x_{\text{Gd}} = 0\text{--}0,3$) та $x_{\text{Al}}/x_{\text{Gd}} = 0,29/0,71$ (при $x_{\text{Mn}} = 0\text{--}0,26$)
Al–Ge–Ni	[18]	Формування ближнього порядку в розплавах
Al–Sn	[19]	Формування ближнього порядку в розплавах
B–Cr–Ni	[32]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
B–Fe–Mo	[2]	Діаграма стану системи за результатами термодинамічної оптимізації
B–Mo–Ni	[3]	Фазовий склад сплавів в області Ni–MoNi–Mo ₂ NiB ₂ –Ni ₂ B
Bi–Cu–Ni	[33]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Bi–In–Sb	[34]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Se–La–O–Sm	[16]	Ізотермічний розріз системи $\text{CeO}_2\text{--La}_2\text{O}_3\text{--Sm}_2\text{O}_3$ при 1250 °С
Ce–O–Y–Zr	[15]	Фізико-хімічні властивості ультратонких порошків системи $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--CeO}_2$
Co–Cr–Cu–Fe–Ni	[23]	Розрахунок термодинамічних властивостей рідких сплавів за допомогою моделі асоційованих розчинів
Co–Cu–Mn	[35]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Co–Ni–Zr	[7, 8]	Фазовий склад сплавів в області Zr–ZrCo–ZrNi, взаємодія з воднем
Cu–Eu	[20]	Ентальпії змішування розплавів при 1300–1450 К
Cu–Hf–Ni–Ti	[24]	Розрахунок термодинамічних властивостей рідких сплавів за допомогою моделі асоційованих розчинів і прогноз концентраційної області їх аморфізації
Cu–Hf–Ni–Ti–Zr	[25]	Розрахунок термодинамічних властивостей рідких сплавів за допомогою моделі асоційованих розчинів і прогноз концентраційної області їх аморфізації

Система	Джерело	Одержаний результат
Cu–In–Sn	[36]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Cu–Mn–Ni	[37]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Cu–P–Sn	[38]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Cu–Ti–Zr	[39]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Fe–Hf–Ni	[26]	Ентальпії змішування розплавів вздовж перерізів $x_{Fe}/x_{Ni} = 0,50/0,50$ при $x_{Hf} = 0–0,45$ та $x_{Fe}/x_{Ni} = 0,25/0,75$ при $x_{Hf} = 0–0,46$ при 1873 К і прогноз концентраційної області їх аморфізації
Fe–Ni–Ti	[26]	Ентальпії змішування розплавів вздовж перерізів $x_{Fe}/x_{Ni} = 0,50/0,50$ при $x_{Ti} = 0–0,15$, 1873 К і прогноз концентраційної області їх аморфізації
Fe–Ni–Zr	[26]	Ентальпії змішування розплавів вздовж перерізів $x_{Fe}/x_{Ni} = 0,50/0,50$ при $x_{Zr} = 0–0,45$, 1873 К і прогноз концентраційної області їх аморфізації
Gd–Ni–Sn	[10]	Ентальпії змішування розплавів вздовж перерізів $x_{Sn}/x_{Ni} = 0,68/0,32$ при 1873 ± 5 К, $x_{Gd} = 0–0,25$
Gd–Sn	[9, 10]	Ентальпії змішування розплавів при 1873, 1640 і 1510 К
Hf–Ni–Ti	[24]	Ентальпії змішування розплавів вздовж перерізів $x_{Hf}/x_{Ni} = 3$ при $x_{Ti} = 0–0,64$ та $x_{Ni}/x_{Ti} = 3$ при $x_{Hf} = 0–0,57$ при 1873 К і прогноз концентраційної області їх аморфізації
In–Ni–Sn	[40]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
In–Sr	[11]	Ентальпії змішування розплавів при 1070–1270 К
La–Lu–O–Yb	[17]	Ізотермічний розріз системи La_2O_3 – Lu_2O_3 – Yb_2O_3 при 1600 °С
Mo–Nb–Ti	[4, 5]	Фазовий склад та властивості сплавів
Ni–Pd–Si	[41]	Критичний огляд літературних даних щодо характеру фазових рівноваг та термодинамічних властивостей
Ni–Pr	[12]	Ентальпії змішування розплавів при 1600 ± 5 К при $x_{Ni} = 0–0,6$
Sn–Ti–Zr	[6]	Фазовий склад

температурних оксидних систем, які включають оксиди алюмінію, цирконію та рідкісноземельних металів: Al–Ce–O–Y–Zr [12, 13] та Ce–O–Y–Zr [14]. У відділі функціональної кераміки на основі рідкісних земель проводилися фундаментальні дослідження фазових рівноваг в системах оксидів вищої вогнетривкості (з температурою плавлення вище за 2000 °С) — Ce–La–O–Sm [15] та La–Lu–O–Yb [16].

В КНУ на кафедрі фізичної хімії досліджено вплив складу на формування ближнього порядку у розплавах потрібних систем Al–Fe–Ge і Al–Ge–Ni [17] та подвійної системи Al–Sn у широких концентраційних областях [18]. Спільно з науковцями відділу фізичної хімії неорганічних матеріалів ІПМ НАНУ методом ізоперіболічної калориметрії визначено

парціальні та інтегральні ентальпії змішування розплавів подвійної системи Cu–Eu [19] та потрійних систем Al–Cu–Eu [19], Ag–Ca–Ge [20] і Al–Gd–Mn [21].

В Лабораторії фізико-хімічних властивостей металевих розплавів досліджувались системи перехідних металів. В рамках CALPHAD-методу була розроблена база даних [22] для розрахунку термодинамічних функцій змішування розплавів Co–Cr–Cu–Fe–Ni, важливих для одержання високоентропійних сплавів, і зроблені висновки про величини надлишкового і конфігураційного внесків в енергію Гіббса змішування багатокомпонентних фаз. Парціальні й інтегральні ентальпії змішування розплавів систем Hf–Ni–Ti [23], Fe–Hf–Ni, Fe–Ni–Ti та Fe–Ni–Zr [25] були вивчені методом високотемпературної калориметрії при 1873 К. Термодинамічні функції змішування розплавів систем і параметри міжатомного упорядкування в розплавах Hf–Ni–Ti, Cu–Hf–Ni–Ti [23] і Cu–Hf–Ni–Ti–Zr [25] були розраховані в широкому температурному інтервалі в рамках моделі асоційованого розчину і з використанням розробленої бази термодинамічних даних для багатокомпонентних розплавів аморфоутворюючих систем. Також для розплавів зазначених вище систем були прогнозовані карти концентраційних областей аморфізації.

Науковці України демонструють традиційно високу активність у співпраці з багаторічним партнером Materials Science International Services GmbH (MSI) (Міжнародною службою з матеріалознавства, Штуттгарт, Німеччина). Спільними зусиллями підготовлено двадцятий випуск довідника Ternary Alloys — “Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications”, опублікованого у 2021 році видавництвом MSI [26]. Кандидат хімічних наук Лія Древаль (ДДМА) спільно з видавництвом MSI безпосередньо працювала над підготовкою довідника в якості асоційованого редактора та автора оглядів (разом з Павлом Агравалом, Анатолієм Бондаром, Тамарою Великановою, Оленою Семеновою, Оксаною Тимошенко, Михайлом Турчаніним та Юлією Фартушною). Усього за участю українських науковців у двадцятому випуску довідника опубліковано критичні огляди для 14 систем: Ag–Au–Bi [27], Ag–Au–Sb [28], Ag–Cu–In [29], Ag–Cu–P [30], B–Cr–Ni [31], Bi–Cu–Ni [32], Bi–In–Sb [33], Co–Cu–Mn [34], Cu–In–Sn [35], Cu–Mn–Ni [36], Cu–P–Sn [37], Cu–Ti–Zr [38], In–Ni–Sn [39] та Ni–Pd–Si [40].

Протягом 2021 року відбулися захисти трьох дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук за спеціальністю “фізична хімія”: Юлії Фартушної “Фазові рівноваги, структура і властивості сплавів систем титану і заліза з *d*-металами, *p*-елементами і РЗМ” [41], Павла Агравала “Термодинаміка і фазові перетворення в багатокомпонентних аморфоутворюючих системах перехідних металів” [42] та Оксани Корнієнко “Фазові рівноваги в системах оксидів *d*-елементів IV групи та оксидів лантанодів” [43]. Ці кваліфікаційні роботи узагальнюють великий обсяг нової наукової інформації щодо фазових рівноваг, фазових перетворень і термодинаміки для широких класів систем і є вагомим внеском у сучасне матеріалознавство.

Проведення наступного засідання APDIC планується тридцятого червня 2023 року у Бостоні (США).

M.A. Turchanin, T.Ya. Velikanova, K.Ye. Korniyenko

INFORMATION ON THE ANNUAL REPORT
OF THE UKRAINIAN PHASE DIAGRAMS
AND THERMODYNAMICS COMMISSION (2022)

The Ukrainian Phase Diagrams and Thermodynamics Commission has been a member of the Alloy Phase Diagram International Commission (APDIC) for almost thirty years (since 1994). APDIC unites 18 member organizations involving 26 countries. The main tasks of APDIC are the exchange of scientific information and coordination of the activities of the international scientific community, mainly in the field of state diagrams and phase thermodynamics. The annual report of the Ukrainian Commission on the results of the activities of Ukrainian scientists in this field in 2021 was presented at the APDIC meeting on May 27, 2022. This information is presented in a table, collecting data on the systems studied and the result obtained and containing a list of references to published papers. Scientists from the Frantsevich Institute for Problems of Materials Science (National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv), Taras Shevchenko National University of Kyiv (Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv) and Donbas State Engineering Academy (Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk) provided relevant information to the Ukrainian Commission.

Keywords: APDIC, phase diagram, thermodynamics of phases, annual report.

Список літератури

1. *Open letter from academic community* [Електронний ресурс]. 2022. Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1VhV_VMYK1rJPcgbZr1UX8rQcx8D7c048/view.
2. Witusiewicz V., Bondar A., Hecht U., Stryzhyboroda O., Utkin S., Kublii V. Thermodynamic re-modelling of the ternary B–Fe–Mo system based on novel experimental data. *J. Alloys Compd.* 2021. Vol. 845. P. 157173. DOI:10.1016/j.jallcom.2020.157173.
3. Kublii V., Utkin S., Bondar A., Remez M. Properties of phases and alloys of the Mo–Ni–B system in the Ni–MoNi–Mo₂NiB₂–Ni₂B region. *Mater. Sci.* 2021. Vol. 56, No. 6. P. 862–869. DOI:10.1007/s11003-021-00505-6.
4. Myslyvchenko O., Bondar A., Tereshchenko O., Poliakov I. Formation of a new Wadsley–Roth phase during oxidation of Ti–Nb–Mo alloys. *Materialia*. 2021. Vol. 20. P. 101213. DOI:10.1016/j.mtla.2021.101213.
5. Myslyvchenko O., Bondar A., Tsyganenko N., Petyukh V., Lugovskyi Yu., Gorban V. Influence of heat treatment on the microstructure and physico-mechanical properties of titanium alloys of the Ti–Nb–Mo system. *Mater. Sci.* 2021. Vol. 56, No. 4. P. 481–490. DOI:10.1007/s11003-021-00454-0.
6. Fartushna I., Meleshevich K., Koval A., Tikhonova I., Tedenac J.C., Bulanova M. Phase equilibria in the Ti–Zr–Sn system. *J. Phase Equilibria Diffusion*. 2022. Vol. 43, No. 1. P. 78–97. DOI:10.1007/s11669-022-00940-1.
7. Semenova O., Petyukh V., Fomichov O. The Co–Ni–Zr phase diagram in the Zr–ZrCo–ZrNi region. I. Phase equilibria in the Zr–ZrCo–ZrNi system at subsolidus temperature, 900 °C, and 800 °C. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 59, No. 9–10. P. 564–575. DOI:10.1007/s11106-021-00186-5.
8. Semenova O., Petyukh V., Fomichov O., Khomko T. The Co–Ni–Zr phase diagram in the Zr–ZrCo–ZrNi region. II. Liquidus surface of the phase diagram. Interaction of alloys with hydrogen. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 59, No. 11–12. P. 695–702. DOI:10.1007/s11106-021-00204-6.
9. Sudavtsova V., Shevchenko M., Kudin V., Romanova L., Ivanov M. Thermodynamic properties and phase equilibria in Gd–Sn Alloys. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 59, No. 3–4. P. 225–236. DOI:10.1007/s11106-021-00231-3.
10. Sudavtsova V., Shevchenko M., Kudin V., Podoprigora N., Kozorezov A., Romanova L., Ivanov M. Thermodynamic properties of Gd–Sn and Gd–Sn–Ni melt systems. *Russian J. Physical Chemistry A*. 2021. Vol. 95, No. 2. P. 237–243. DOI:10.1134/S0036024421020254.

11. Sudavtsova V., Shevchenko M., Kudin V., Dudnik A., Romanova L. Thermodynamic properties and phase equilibria in In–Sr alloys. *Russian J. Physical Chemistry A*. 2021. Vol. 95, No. 10. P. 1981–1989. DOI:10.1134/S0036024421100253.
12. Kudin V., Romanova L., Shevchenko M., Sudavtsova V. Phase equilibria and thermodynamics of Ni–Pr alloys. *Russian J. Physical Chemistry A*. 2021. Vol. 95, No. 7. P. 1295–1301. DOI:10.1134/S0036024421070153.
13. Smyrnova-Zamkova M., Ruban O., Holovchuk M., Mosina T., Khomenko O., Dudnik E. The influence of the ZrO_2 solid solution amount on the physicochemical properties of Al_2O_3 – ZrO_2 – Y_2O_3 – CeO_2 powders. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 60, No. 3–4. P. 129–141. DOI:10.1007/s11106-021-00222-4.
14. Smyrnova-Zamkova M., Dudnik E., Bykov O., Ruban O., Khomenko O. Changes in the properties of ultrafine Al_2O_3 – ZrO_2 – Y_2O_3 – CeO_2 powders after heat treatment in the range 400–1450 °C. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 60, No. 9–10. P. 519–530. DOI:10.1007/s11106-022-00265-1.
15. Marek I., Dudnik O., Korniy S., Red'ko V., Danilenko M., Ruban O. Effect of heat treatment in the temperature range 400–1300 °C on the properties of nanocrystalline ZrO_2 – Y_2O_3 – CeO_2 powders. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 60, No. 7–8. P. 385–395. DOI:10.1007/s11106-021-00251-z.
16. Kornienko O., Andrievskaya O., Bykov O., Urbanovich V., Yushkevych S., Spasonova L. Interaction of cerium, lanthanum, and samarium oxides at 1250°C. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 60, No. 1–2. P. 97–104. DOI:10.1007/s11106-021-00219-z.
17. Chudinovych O., Bykov O., Samelyuk A. Interaction of lanthanum, lutetium, and ytterbium oxides at 1600 °C. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 60, No 5–6. P. 337–345. DOI:10.1007/s11106-021-00248-8.
18. Roik O., Yakovenko O., Kazimirov V., Sokolskii V., Golovataya N. Comparative analysis of the short-range order in Al–Ge–Ni and Al–Ge–Fe melts. *Phys. Chem. Liquids*. 2021. Vol. 59, No. 6. P. 938–955. DOI:10.1080/00319104.2021.1888093.
19. Roik O.S., Yakovenko O.M., Kazimirov V.P., Sokol'skii V.E., Golovataya N.V., Kashirina Ya.O. Structure of liquid Al–Sn alloys. *J. Molec. Liquids*. 2021. Vol. 330. P. 115570. DOI:10.1016/j.molliq.2021.115570.
20. Ivanov M., Usenko N., Kotova N. Enthalpies of mixing in binary Cu–Eu and ternary Al–Cu–Eu liquid alloys. *Int. J. Mater. Research*. 2021. Vol. 111, No. 4. P. 273–282. DOI:10.3139/146.111895.
21. Ivanov M., Kotova N., Usenko N. The enthalpies of mixing of ternary liquid Ag–Ca–Ge alloys. *French–Ukrainian J. Chemistry*. 2021. Vol. 9, No. 1. P. 51–62. DOI:10.17721/fujcV9I1P51-62.
22. Ivanov M., Usenko N., Kotova N. Enthalpies of mixing in ternary Al–Gd–Mn liquid alloys. *Int. J. Mater. Research*. 2021. Vol. 112, No. 9. P. 735–742. DOI:10.1515/ijmr-2021-8299.
23. Agraval P., Dreval L., Turchanin M., Vodopyanova A. Temperature–composition dependence of thermodynamic mixing functions of Co–Cr–Cu–Fe–Ni melts. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 60, No. 11–12. P. 703–714. DOI:10.1007/s11106-021-00205-5.
24. Turchanin M., Agraval P., Dreval L., Vodopyanova A. Calorimetric investigation of the mixing enthalpy of liquid Hf–Ni–Ti alloys and thermodynamic properties and chemical ordering in quaternary liquid Cu–Hf–Ni–Ti alloys. *J. Phase Equilibria Diffusion*. 2020. Vol. 41, No. 4. P. 469–490. DOI:10.1007/s11669-020-00806-4.
25. Turchanin M., Agraval P., Dreval L., Vodopyanova A. Thermodynamics and chemical ordering of liquid Cu–Hf–Ni–Ti–Zr alloys. *J. Phase Equilibria Diffusion*. 2021. Vol. 42, No. 5. P. 623–646. DOI:10.1007/s11669-021-00898-6.
26. Turchanin M., Dreval L., Agraval P., Korsun V., Vodopyanova A. Interaction of components in glass-forming melts of iron and nickel with titanium, zirconium, and hafnium. I. Mixing enthalpies of liquid alloys. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*. 2021. Vol. 60, No. 9–10. P. 617–625. DOI:10.1007/s11106-022-00274-0.
27. Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology — *New Series. Group IV: Physical Chemistry. Ternary Alloys: A Comprehensive Compendium of Evaluated Constitutional Data and Phase Diagrams*. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications; ed. by A. Watson, A. Kroupa; асоційовані редактори Л. Древаль, О. Довбенко, С. Ільєнко. 554 p.

28. Dreval L. Silver–Gold–Bismuth. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 1–8.
29. Dreval L. Silver–Gold–Antimony. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 18–25.
30. Dreval L., Watson A. Silver–Copper–Indium. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 48–59.
31. Kubashewski O., Semenova O. Silver–Copper–Phosphorus. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 73–81.
32. Bondar A., Tymoshenko O. Boron–Chromium–Nickel. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 193–107.
33. Fartushna I., Khvan A. Bismuth–Copper–Nickel. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 208–218.
34. Velikanova T., Turchanin M., Lukas H.L. Bismuth–Indium–Antimony. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 219–239.
35. Rokhlin L., Lysova E., Bocharov N., Iljenko S., Bondar A. Cobalt–Copper–Manganese. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 272–285.
36. Velikanova T., Turchanin M., Fabrichnaya O., Huang D., Wang Y., Xu L., Xia D. Copper–Indium–Tin. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 314–341.
37. Watson A., Wagner S., Lysova E., Rokhlin L., Dreval L. Copper–Manganese–Nickel. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 342–360.
38. Dreval L., Dovbenko O., Rogl P. Copper–Phosphorus–Tin. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 415–434.
39. Velikanova T., Turchanin M., Agraval P. Copper–Titanium–Zirconium. Stuttgart: Materials Science International. 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 463–502.
40. Dreval L., Watson A. Indium–Nickel–Tin. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 503–513.
41. Semenova O. Nickel–Palladium–Silicon. Stuttgart: Materials Science International, 2021. Vol. 20. *Selected Systems for Lead-free Soldering and Brazing Applications*. P. 526–533.
42. Фартушна Ю.В. Фазові рівноваги, структура і властивості сплавів систем титану і заліза з d-металами, р-елементами і РЗМ. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук за спеціальністю 02.00.04 – фізична хімія. К.: Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, 2021. 518 с.
43. Агравал П.Г. Термодинаміка і фазові перетворення в багатокомпонентних аморфоутворюючих системах перехідних металів. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук за спеціальністю 02.00.04 – фізична хімія. Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ. К.: Ін-т пробл. матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, 2021. 452 с.
44. Корнієнко О.А. Фазові рівноваги в системах оксидів d-елементів IV групи та оксидів лантанойдів. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора хімічних наук за спеціальністю 02.00.04 – фізична хімія. К.: Ін-т пробл. матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, 2021. 461 с.

Стаття надійшла 10.07.2022