

## ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ

PACSnumbers: 61.72.Cc, 61.72.Mm, 64.70.kd, 66.30.Fq, 66.30.Ny, 81.30.Mh, 81.40.Cd

### Загальна кінетика комірчастого розпаду твердих розчинів свинець–олово

С. П. Ворона, В. Ф. Мазанко, М. І. Савчук, К. М. Храновська,  
І. О. Шматко, О. А. Шматко

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Акад. Вернадського, 36,  
03680, МСП, Київ, Україна*

Загальну кінетику комірчастого розпаду твердих розчинів Pb–Sn з вмістом 5,15, 7,60, 10,03, 12,38, 14,73, 19,22, 23,55, 27,70 та 29,05 ат.% Sn досліджено за температури 293 К методами оптичної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу та резистометрії. Процес старіння стопів Pb–Sn відбувається в дві стадії — первинної та вторинної комірчастих реакцій. Внаслідок первинної комірчастої реакції утворюється тонкоплатівчаста структура (комірки), що складається з послідовно розташованих платівок олова та збідненого твердого розчину на основі свинцю. Первинна платівчаста структура надалі розпадається в ході вторинної комірчастої реакції або переривчастого огрубіння. Вторинна комірчаста реакція відбувається за значно нижчої швидкості, ніж первинна комірчаста реакція, утворюючи платівчасту структуру нижчої дисперсності. Міряння параметра ґратниці свідчить, що концентрація збідненого твердого розчину в первинних комірках істотно вища за рівноважну, тоді як його концентрація у вторинних комірках наближається до рівноважної. Представлення експериментальних ізотермічних резистограм у координатах  $d\rho/d\lg\tau - \lg\tau$  ( $\rho$  — електроопір,  $\tau$  — час старіння стопу) уможливило точне визначення часових інтервалів перебігу первинної та вторинної комірчастих реакцій, їхніх швидкісних параметрів.

The general kinetics of the cellular precipitation from the Pb–Sn solid solutions containing 5.15, 7.60, 10.03, 12.38, 14.73, 19.22, 23.55, 27.70 or 29.05 at.% Sn is investigated at the temperature of 293 K by light microscopy, X-ray diffraction, and electrical resistance measurements. Ageing process in Pb–Sn alloys passes in two stages—primary and secondary cellular reactions. Primary cellular reaction results in a fine lamellar structure (cells) consisting of alternating tin lamellae and depleted lead-based solid solution. Then, the primary cellular structure is decomposed by means of the secondary cellular reaction or the interrupted coarsening. The secondary cellular reaction occurs at a much slower rate than the primary cellular reaction and

results in a much coarser lamellar structure. Lattice-parameter measurements show the depleted lead-based solid solution in the primary cells having a composition far from equilibrium, while that in the product of secondary cellular reaction is close to equilibrium one. Representation of the initial experimental isothermal electrical resistivity plots for Pb–Sn ageing within the  $d\rho/d\lg\tau - \lg\tau$  coordinates (where  $\rho$  is electrical resistivity of alloy,  $\tau$  is its ageing time) makes it possible to determine precise time intervals of primary and secondary cellular reactions and their rate parameters.

Общая кинетика ячеистого распада твёрдых растворов Pb–Sn, содержащих 5,15, 7,60, 10,03, 12,38, 14,73, 19,22, 23,55, 27,70 и 29,05 ат.% Sn, исследована при температуре 293 К методами оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа и резистометрии. Процесс старения сплавов Pb–Sn протекает в две фазы — первичной и вторичной ячеистых реакций. В результате первичной ячеистой реакции образуется тонкопластинчатая структура (ячейки), состоящая из последовательно расположенных пластинок олова и обеднённого твёрдого раствора на основе свинца. Первичная пластинчатая структура в дальнейшем распадается в ходе вторичной ячеистой реакции или прерывистого огрубения. Вторичная ячеистая реакция протекает со значительно меньшей скоростью, чем первичная ячеистая реакция, образуя структуру более низкой дисперсности. Измерение параметра решётки свидетельствует о том, что концентрация обеднённого твёрдого раствора в первичных ячейках существенно выше равновесной, тогда как его концентрация во вторичных ячейках приближается к равновесной. Представление экспериментальных изотермических резистограмм в координатах  $d\rho/d\lg\tau - \lg\tau$  ( $\rho$  — электросопротивление,  $\tau$  — время старения сплава) даёт возможность точного определения временных интервалов протекания первичной и вторичной ячеистых реакций, их скоростных параметров.

**Ключові слова:** твердий розчин, старіння, комірчастий розпад, первинна і вторинна реакції.

*(Отримано 29 квітня 2014 р.; остаточн. варіант — 12 грудня 2014 р.)*

## 1. ВСТУП

Розвиток науки та техніки потребує створення нових матеріалів з поліпшеним комплексом фізико-механічних властивостей. Зокрема, одним з фізичних явищ, що використовується в практиці термічного оброблення металевих стопів, яке спричиняє поліпшення цих властивостей, є розпад пересичених твердих розчинів.

Розпад пересичених твердих розчинів за комірчастим механізмом виявлено в багатьох металевих системах [1]. Даний процес контролюється, окрім ступеня пересичення твердого розчину, рухливістю висококутових меж зерен, що являють собою фронт комірчатої реакції [2]. Евтектоїдоподібні колонії або комірочки (продукт комірчастого розпаду) утворюються на даних межах. Вони склада-

ються з почергово розташованих пластинок збідненого (стосовно початкового пересичення) твердого розчину та фази випадання, торці яких постачаються дефіцитними атомами внаслідок їхньої дифузії рухомою межею зерна. У ході свого зростання в ізотермічному режимі колонії–комірки поступово заповнюють весь об'єм вихідного зерна, у тіло якого вони проростають.

Механізм старіння стопів Pb–Sn досліджено Лариковим [3–6] і Тарнбаллом [7, 8]. Pb–Sn є однією з небагатьох металевих систем, де розпад відбувається лише за комірчастим механізмом [1], внаслідок чого дана система являється доволі зручним об'єктом досліджень.

В [9–12] було встановлено, що комірчастий розпад в стопах свинець–олово протікає в дві стадії — первинної та вторинної комірчастих реакції. Авторами [13–20] виявлено подібну стадійність у низці інших стопів. Рушійною силою вторинної реакції або комірчастого огрубіння (коалесценції) первинної дисперсної структури є залишкове пересичення збідненого твердого розчину, успадковане після первинної реакції. Зазвичай концентрація цього розчину ( $c_c$ ) помітно перевищує рівноважну концентрацію ( $c_l$ ) за даної температури старіння. Позаяк згадане пересичення є нижчим вихідного пересичення загартованого твердого розчину, вторинні комірки, зародкування яких відбувається на стиках зрослих первинних комірок, мають нижчу дисперсність, а, отже, більшу міжплатівкову відстань  $l$  і ростуть значно повільніше первинних.

Існують певні експериментальні труднощі щодо окремого визначення параметрів кінетики первинної та вторинної комірчастих реакцій. Тому в [21–25] виконано дослідження з цього питання на підставі структурного аналізу та математичного опрацювання залежностей електроопору стопів свинець–олово від часу їхнього старіння в ізотермічному режимі.

Метою даної роботи є розмежування первинної і вторинної комірчастих реакцій практично для всього концентраційного інтервалу існування пересичених твердих розчинів олова в свинцю. Позаяк точне визначення часових інтервалів протікання первинної і вторинної комірчастих реакцій необхідне для коректного визначення кінетичних параметрів цих реакцій (швидкості зародкування і зростання комірок) на основі теорії зерномежових процесів Дж. Кана [26]. Наявність даних параметрів потрібна врешті для встановлення ефективних технологічних режимів циклічної термообробки стопів, що старіють за комірчастим механізмом з метою подрібнення їх зеренної структури [27].

## 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Загальну кінетику комірчастого розпаду в стопах Pb–Sn з 5,15

(3,00), 7,60 (4,50), 10,03 (6,00), 12,38 (7,50), 14,73 (9,00), 19,22 (12,00), 23,55 (15,00), 27,70 (18) та 29,05 (19) ат. (мас.) % Sn, зістарених за температури 293 К, досліджено методами оптичної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, резистометрії. Мікроструктуру зразків для оптичної мікроскопії виявляли обробленням у реактиві з 50%  $C_3H_5(OH)_3$ , 25%  $CH_3COOH$  та 25%  $HNO_3$ . Рентгенівські дані одержано у  $FeK_{\alpha}$ -випромінненні.

Для опрацювання ізотермічних резистограм досліджуваних стопів будемо проводити числове диференціювання функції  $y(x)$ , заданої аналітично або табульованої, шляхом її заміни інтерполяційним поліномом  $P(x)$ , похідні якого  $d^n P(x)/dx^n \approx d^n y(x)/dx^n$  одержуються аналітично з відповідних співвідношень. Для табульованих функцій, заданих з випадковою похибкою, точність числового диференціювання може бути заниженою.

Числове диференціювання за рівномірно розташованими трьома вузлами з інтерполяцією реалізується співвідношенням:

$$y'(x_0 + ph)^3 = \frac{1}{h} [(p - 0,5)y_{-1} - 2py_0 + (p + 0,5)y_1],$$

де  $p = (x - x_0)/2h$ ,  $h$  — крок приросту  $x$ .

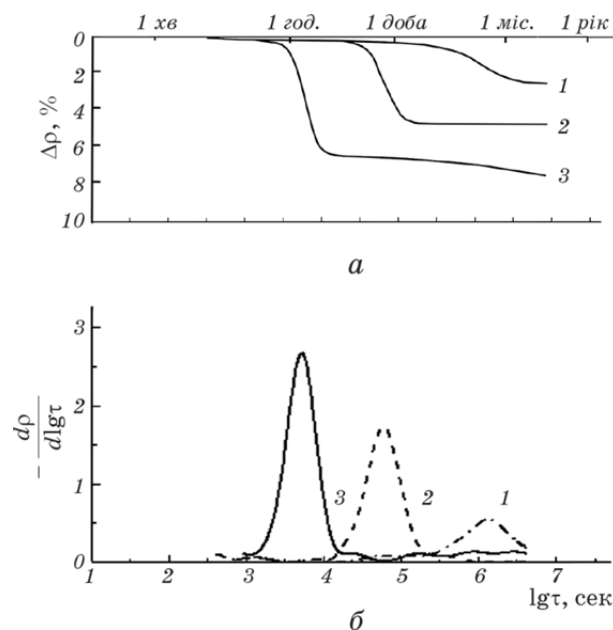
Взагалі ж формули числового диференціювання для вузлів  $y(x)$  значно простіші наведеного співвідношення, позаяк  $P$  у вузлах набуває фіксованих значень. Високоточними є формули для центрального вузла ( $P = 0$ ):

$$y' = (y_1 - y_{-1})/2h, \quad (1)$$

$$y'' = (y_1 - 2y_0 + y_{-1})/h^2. \quad (2)$$

Ці співвідношення є зручними для числового диференціювання табульованих функцій в точці  $x = x_0$ . Саме за ними було опрацьовано ізотермічні резистограми досліджуваних стопів. Дані залежності їхнього електроопору від часу старіння об'єднано в чотири групи з огляду на істотну різницю в швидкості процесу розпаду, що зростає з підвищенням пересичення твердого розчину, та з метою оптимізації математичного аналізу резистограм.

До першої групи залучено стопи з вмістом олова до 10,03 ат.%, що старіють з невисокими швидкостями. Відповідні резистограми (рис. 1, а) графічно поділено на рівновіддалені вузли з наступним визначенням величин функції для конкретних вузлів у мм. В подальшому ці величини елементарним трансформуванням перетворено на абсолютні значення, за якими, з використанням співвідношення (1), побудовано залежності  $y'-x$  (рис. 1, б), що являють собою криві з чітко вираженими піками, які відповідають часові максимальної швидкості реакції.



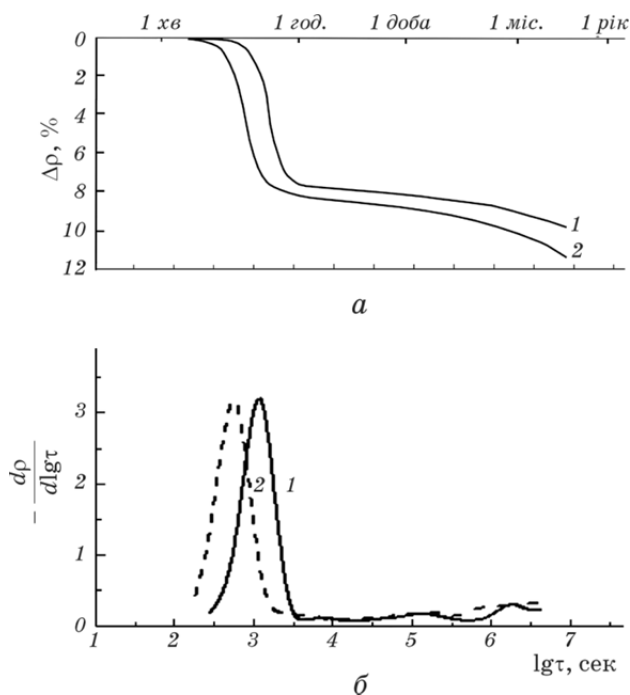
**Рис. 1.** Залежності  $\Delta\rho$ - $\lg t$  (а) і  $d\rho/d\lg t$ - $\lg t$  (б) для стопів з вмістом олова 5,15 (1), 7,60 (2) та 10,03 (3) ат. %.

Друга група складається зі стопів з 12,38 та 14,73 ат. % Sn (рис. 2, а), швидкість старіння яких є істотно вищою порівняно з попередньою групою. Результат математичного оброблення (рис. 2, б) дає можливість встановити факт початку вторинної реакції, яка стартує ще до закінчення первинної. Відзначено зсув максимуму швидкості реакції.

У третій групі наведено експериментальні дані для стопів з 19,22 і 23,55 ат. % Sn (рис. 3, а), що старіють ще швидше за попередні. Після їхнього оброблення (рис. 3, б) чітко виявляються перша та друга стадії комірчастої реакції. І в цих стопах вторинна реакція також починається до закінчення первинної.

Нарешті, для четвертої групи стопів з 27,70 та 29,05 ат. % Sn (рис. 4, а) маємо надзвичайно високу швидкість старіння. При цьому вторинна реакція починається через деякий проміжок часу після закінчення первинної, і на відміну від стопів третьої групи відзначається нижчою швидкістю (рис. 4, б).

Висновок про згаданий вище перебіг зазначених реакцій можна підтвердити, проаналізувавши залежність максимальної швидкості первинної реакції (перша похідна) від концентрації олова (рис. 5). Практично горизонтальна ділянка на графіку саме відповідає стопам другої та третьої груп, в яких вторинна реакція активно розвивається ще до закінчення первинної. Таким чином, швидкість

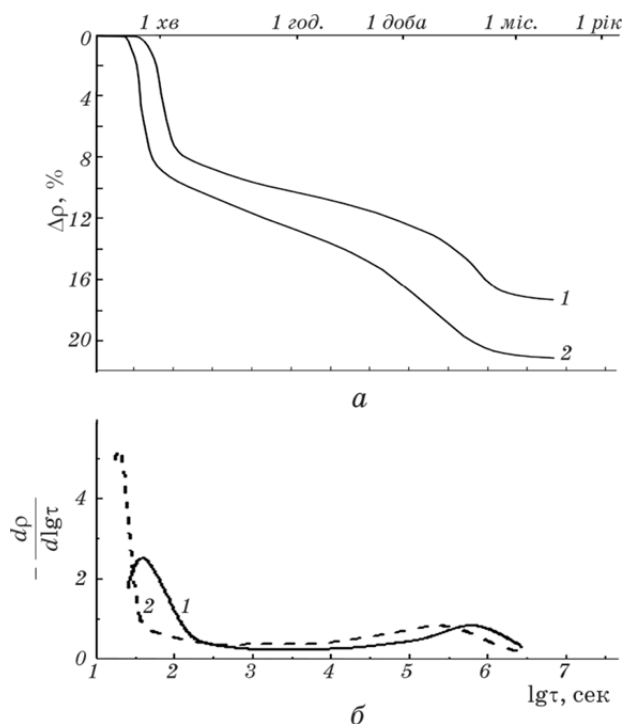


**Рис. 2.** Залежності  $\Delta\rho$ - $\lg\tau$  (а) і  $d\rho/d\lg\tau$ - $\lg\tau$  (б) для стопів з вмістом олова 12,38 (1) та 14,73 (2) ат. %.

первинної реакції є практично сталою для стопів, в яких вторинна реакція активізується ще до закінчення первинної. У тих же випадках, коли конкуренція між первинною та вторинною реакціями неістотна, спостерігається рівномірне зростання швидкості первинної реакції.

Із залежностей, наведених на рис. 1, б і 2, б, просто визначається час завершення первинної комірчастої реакції для стопів першої групи і первинної реакції для стопів першої та другої груп, а з рис. 3, б та 4, б — первинної та вторинної реакцій для стопів третьої та четвертої групи. Ці часові параметри є потрібними для одержання даних щодо зміни перетвореного об'єму стопів у ході їхнього ізо-термічного старіння для визначення кінетичних параметрів (швидкості зародкування та росту комірок) комірчастого розпаду за теорією Дж. Кана [26]. Високоточне визначення часових параметрів одержимо за другою похідною нашої функції, яка обертається на нуль в момент початку та завершення аналізованого процесу.

Крім того, зазначимо, що дані, наведені на рис. 5, задовільно корелюють з результатами низки досліджень об'ємної частки фази випадання (олова) в ході первинної комірчастої реакції [28]. Встановлено, що в стопах свинцю, які містять близько 12–17 ат. % Sn,



**Рис. 3.** Залежності  $\Delta\rho$ - $\lg t$  (а) і  $d\rho/d\lg t$ - $\lg t$  (б) для стопів з вмістом олова 19,22 (1) та 23,55 (2) ат. %.

ця частка або ступінь вичерпання початкового пересичення твердого розчину складає  $\approx 57$ – $65\%$ . Доволі високий ступінь залишкового пересичення являє собою рушійну силу порівняно інтенсивної вторинної комірчастої реакції. За нижчої та вищої вихідної концентрації ( $c_0$ ) олова в досліджуваних стопах частка вичерпання  $c_0$  зростає, відповідно послаблюючи стимул до розвитку вторинної реакції.

Цю ситуацію певною мірою можна пов'язати із залежністю рухливості межі зерна (фронту комірчастої реакції)  $M \propto s\lambda D_b/l^2$ . Тут  $D_b$  — коефіцієнт дифузії атомів розчиненого елемента рухомою межею зерна,  $s$  — сегрегаційний фактор,  $\lambda$  — товщина межі зерна ( $\approx 0,5$  нм), а  $l$  — міжплатівкова відстань у комірці. З рисунка 6, де надано концентраційні залежності  $s\lambda D_b$  і  $l$ , видно, що за  $c_0 < 12$  ат. % Sn визначальний внесок у зростання  $M$  має зміна  $l$ , величина якої спадає зі зростанням  $c_0$ . За значень  $c_0 > 17$  ат. % Sn серед факторів, що контролюють прискорення руху фронту комірчастої реакції, починає превалювати зростання  $D_b$ . Отже рівновага в конкуренції двох зазначених кінетичних параметрів комірчастої реакції визначає певну сталість швидкості процесу в концентраційному інтервалі 12–17 ат. % Sn, яка ілюструється чітким «плато» на залежності

ті зазначеної швидкості від  $c_0$  (рис. 5).

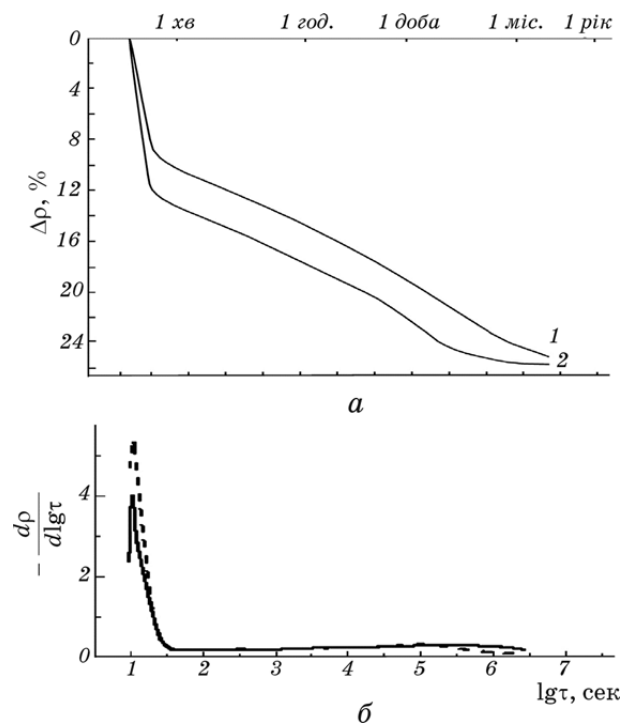


Рис. 4. Залежності  $\Delta\rho$ – $\lg\tau$  (а) і  $d\rho/d\lg\tau$ – $\lg\tau$  (б) для стопів з вмістом олова 27,70 (1) та 29,05 (2) ат.%. .

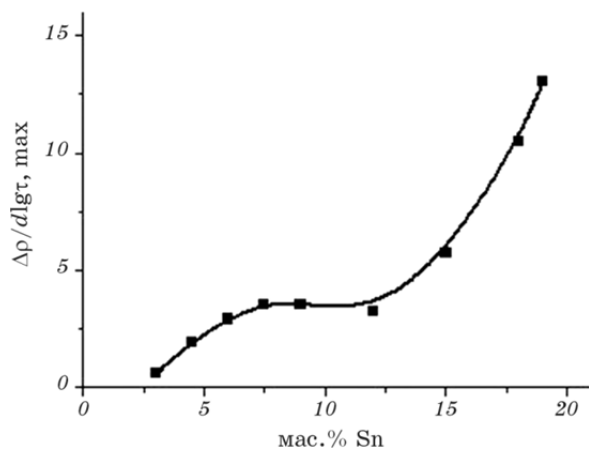


Рис. 5. Залежність максимальної швидкості первинної реакції в стопах свинець–олово від вмісту олова.



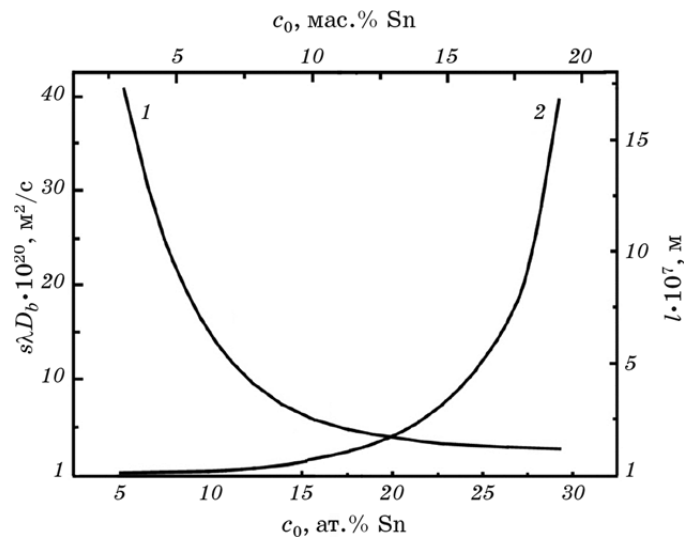


Рис. 6. Концентраційні залежності  $l$  (1) і  $s\lambda D_b$  (2) [18].

### 3. ВИСНОВКИ

1. Обчисленням першої похідної експериментальних ізотермічних резистограм підтверджено стадійність комірчастого розпаду в усьому концентраційному інтервалі гомогенних твердих розчинів системи Pb–Sn.

2. Концентраційна залежність максимальної швидкості первинної комірчастої реакції визначається конкуренцією сегрегаційного фактора та рухливості меж зерен, що є фронтом даної реакції.

### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Л. Н. Лариков, О. А. Шматко, *Ячеистый распад пересыщенных твёрдых растворов* (Киев: Наукова думка: 1976).
2. А. А. Безпалый, В. Ф. Мазанко, М. І. Савчук, І. О. Шматко, О. А. Шматко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **34**, № 9: 1265 (2012).
3. Л. Н. Лариков, *Доклады Болгарской Академии Наук*, **9**, № 3: 53 (1956).
4. Л. Н. Лариков, *Доклады Болгарской Академии Наук*, **9**, № 4: 65 (1956).
5. Л. Н. Лариков, *Доклады Болгарской Академии Наук*, **10**, № 1: 65 (1957).
6. Л. Н. Лариков, *Доклады Болгарской Академии Наук*, **10**, № 1: 69 (1957).
7. K. N. Tu and D. Turnbull, *Acta Met.*, **15**, No. 2: 369 (1967).
8. K. N. Tu and D. Turnbull, *Acta Met.*, **15**, No. 8: 1317 (1967).
9. G. Borelius and L. E. Larsson, *The Materials of Symposium Organized by the Institute of Metals and Held at the Royal Institution (London, November 9, 1955)*.
10. D. Turnbull and H. N. Treafis, *Acta Met.*, **3**, No. 1: 43 (1955).

11. R. Nodzato, *J. Jap. Inst. Metals*, **19**, No. 12: 740 (1955).
12. R. Nodzato, *J. Jap. Inst. Metals*, **20**, No. 6: 351 (1956).
13. Р. Ватанабе, *Бюллетень японского института металлов*, **6**, № 6: 435 (1967).
14. H. Borchers, W. Scharfenberger, and R. Steege, *Metall*, **22**, No. 5: 405 (1968).
15. R. A. Fournell, *Acta Met.*, **27**, No. 7: 1135 (1979).
16. R. A. Fournell, *Acta Met.*, **27**, No. 7: 1147 (1979).
17. Н. Ф. Воронина, Л. Н. Лариков, А. Павловски, О. А. Шматко, *Металлофизика*, **8**, № 4: 31 (1986).
18. A. Pawłowski, O. A. Shmatko, and P. Zięba, *Mater. Sci. Technol.*, **8**, No. 8: 716 (1992).
19. N. F. Voronina, P. Zięba, A. Pawłowski, and O. A. Shmatko, *Met. Phys. Adv. Technol.*, **18**, No. 4: 391 (1999).
20. P. Zięba, *Polish Academy of Sciences, Institute of Metallurgy and Materials Science* (Cracow: 2001), p. 105.
21. Ю. М. Коваль, А. М. Безуглий, М. І. Дідик, Н. В. Зайцева, О. А. Шматко, *Доповіді НАН України*, № 2: 102 (2004).
22. О. В. Баланович, Т. С. Гаценко, М. І. Савчук, І. О. Шматко, О. А. Шматко, *Металлофиз. новейшие технол.* (в печати).
23. Ю. М. Коваль, В. Ф. Мазанко, І. О. Шматко, О. А. Шматко, *Доповіді НАН України*, № 2: 71 (2013).
24. В. Ф. Мазанко, М. І. Савчук, Е. Н. Храновская, И. О. Шматко, О. А. Шматко, *Тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (22–24 травня 2013)* (Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського: 2013), с. 179.
25. М. І. Савчук, И. О. Шматко, О. А. Шматко, *VI Международная научная конференция «Функциональная база наноэлектроники» (30 сентября–4 октября 2013 г., Алушта–Харьков)* (Харьковский национальный университет радиоэлектроники: 2013).
26. J. W. Sahn, *Acta Met.*, **4**, No. 5: 449 (1956).
27. Ю. О. Бондаренко, О. В. Титаренко, О. А. Шматко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **30**, № 3: 397 (2008).
28. Ю. О. Бондаренко, Н. Ф. Воронина, Ю. О. Ляшенко, О. А. Шматко, *Науковий вісник Ужгородського університету. Сер. Фізика*, **21**: 17 (2007).

## REFERENCES

1. L. N. Larikov and O. A. Shmatko, *Yacheistyuy Raspad Peresyshchennykh Tverdykh Rastvorov [Cellular Precipitation of Supersaturated Solid Solutions]* (Kiev: Naukova Dumka: 1976) (in Russian).
2. A. A. Bezpaluy, V. F. Mazanko, M. I. Savchuk, I. O. Shmatko, and O. A. Shmatko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **34**, No. 9: 1265 (2012) (in Ukrainian).
3. L. N. Larikov, *Doklady Bolgarskoy Akademii Nauk [Reports of Bulgarian Academy of Sciences]*, **9**, No. 3: 53 (1956) (in Russian).
4. L. N. Larikov, *Doklady Bolgarskoy Akademii Nauk [Reports of Bulgarian Academy of Sciences]*, **9**, No. 4: 65 (1956) (in Russian).

5. L. N. Larikov, *Doklady Bolgarskoy Akademii Nauk [Reports of Bulgarian Academy of Sciences]*, **10**, No. 1: 65 (1957) (in Russian).
6. L. N. Larikov, *Doklady Bolgarskoy Akademii Nauk [Reports of Bulgarian Academy of Sciences]*, **10**, No. 1: 69 (1957) (in Russian).
7. K. N. Tu and D. Turnbull, *Acta Met.*, **15**, No. 2: 369 (1967).
8. K. N. Tu and D. Turnbull, *Acta Met.*, **15**, No. 8: 1317 (1967).
9. G. Borelius and L. E. Larsson, *The Materials of Symposium Organized by the Institute of Metals and Held at the Royal Institution (London, November 9, 1955)*.
10. D. Turnbull and H. N. Treafis, *Acta Met.*, **3**, No. 1: 43 (1955).
11. R. Nodzato, *J. Jap. Inst. Metals*, **19**, No. 12: 740 (1955).
12. R. Nodzato, *J. Jap. Inst. Metals*, **20**, No. 6: 351 (1956).
13. R. Watanabe, *Byulleten' Yaponskogo Instituta Metallov [Bulletin of the Japanese Institute of Metals]*, **6**, No. 6: 435 (1967) (Russian translation).
14. H. Borchers, W. Scharfenberger, and R. Steege, *Metall*, **22**, No. 5: 405 (1968).
15. R. A. Fournell, *Acta Met.*, **27**, No. 7: 1135 (1979).
16. R. A. Fournell, *Acta Met.*, **27**, No. 7: 1147 (1979).
17. N. F. Voronina, L. N. Larikov, A. Pawlowski, O. A. Shmatko, *Metallofizika*, **8**, No. 4: 31 (1986) (in Russian).
18. A. Pawlowski, O. A. Shmatko, and P. Zięba, *Mater. Sci. Technol.*, **8**, No. 8: 716 (1992).
19. N. F. Voronina, P. Zięba, A. Pawlowski, and O. A. Shmatko, *Met. Phys. Adv. Technol.*, **18**, No. 4: 391 (1999).
20. P. Zięba, *Polish Academy of Sciences, Institute of Metallurgy and Materials Science* (Cracow: 2001), p. 105.
21. Yu. M. Koval, A. M. Bezuhlyy, M. I. Didyk, N. V. Zaytseva, and O. A. Shmatko, *Dopovidi NANU*, No. 2: 102 (2004) (in Ukrainian).
22. O. V. Balanovich, T. S. Gatsenko, M. I. Savchuk, I. O. Shmatko, and O. A. Shmatko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* (to be published).
23. Yu. M. Koval, V. F. Mazanko, I. O. Shmatko, and O. A. Shmatko, *Dopovidi NANU*, No. 2: 71 (2013) (in Ukrainian).
24. V. F. Mazanko, M. I. Savchuk, E. N. Khranovskaya, I. O. Shmatko, and O. A. Shmatko, *Proc. of II Int. Sci. and Tech. Conf. 'Napivprovidnykovi Materialy, Informatsiyi Tekhnolohiyi ta Fotovol'tayika' (May 22–24, 2013)* (Kremenchuk: Kremenchuts'kyi Natsional'nyy Universytet Imeni Mykhayla Ostrohrads'koho: 2013), p. 179 (in Russian).
25. M. I. Savchuk, I. O. Shmatko, and O. A. Shmatko, *VI Int. Sci. Conf. «Funktional'naya Baza Nanoelektroniki» (September 30–October 4, 2013, Alushta–Kharkov)* (Khar'kovskiy Natsional'nyy Universitet Radioelektroniki: 2013) (in Russian).
26. J. W. Cahn, *Acta Met.*, **4**, No. 5: 449 (1956).
27. Yu. O. Bondarenko, O. V. Tytarenko, and O. A. Shmatko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **30**, No. 3: 397 (2008) (in Ukrainian).
28. Yu. O. Bondarenko, N. F. Voronina, Yu. O. Lyashenko, and O. A. Shmatko, *Naukovyy Visnyk Uzhgorods'kogo Universytetu. Ser. Fizyka*, **21**: 17 (2007) (in Ukrainian).