

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУР ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ЖАРОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ ЛЕГУВАННЯ Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn

А.Ю. Северин<sup>1</sup>, В.Ю. Білоус<sup>1</sup>, Л.М. Радченко<sup>1</sup>, В.А. Костін<sup>1</sup>,  
І.І. Алексеєнко<sup>1</sup>, Л.Т. Єремєєва<sup>1</sup>, М.М. Кузьменко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: tim.severin72@gmail.com

<sup>2</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

03142, м. Київ, вул. Омеляна Пріцака, 3. E-mail: stsc.rapid@gmail.com

З метою визначення кінетики фазових перетворень отримано розрахункову CCT-діаграму (continuous-cooling-transformation diagram) для титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn. Проведено дослідження структур та мікротвердості загартованих з різних температур зразків жароміцного титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn. Доведено, що використання розрахункових методів моделювання структурно-фазових перетворень для жароміцних титанових сплавів дозволяє отримати результати, які є близькі до експериментальних. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* жароміцний титановий сплав, термодинамічне моделювання, фазове перетворення, деформаційна обробка, температура, структура, фаза, мікротвердість

**Вступ.** Ефективним способом підвищення комплексу фізико-механічних властивостей напівфабрикатів і виробів з титанових сплавів разом з легуванням і термічною обробкою є термомеханічна обробка (ТДО). Відомо, що титанові сплави, деформовані у  $\beta$ -області, мають пластинчасту мікроструктуру і демонструють вищу стійкість до високотемпературної повзучості і ударну в'язкість. Однак ця перевага досягається за рахунок нижчої пластичності і термічної стабільності, що призводить до  $\beta$ -крихкості та структурної спадковості. При  $(\alpha+\beta)$ -деформуванні матеріал зазвичай нагрівають і обробляють на 30...50 °C нижче температури  $\beta$ -переходу [1, 2]. Тому, при виборі оптимального термомеханічного режиму деформування необхідно визначити середні значення допустимих ступенів одноразового деформування литих заготовок при різних температурах на основні структурні складові матеріалу. Задача встановлення оптимальних термомеханічних параметрів процесу деформування полягає у виборі початкової і кінцевої температури та визначенні максимально допустимого ступеня деформування в заданому температурному інтервалі. Але вкрай

важливо знати температуру поліморфного перетворення  $\alpha\leftrightarrow\beta$ -титану, яка в багатокомпонентних титанових сплавах змінюється в залежності від складу та концентрації легуючих елементів [3].

**Матеріали і методика експериментів.** Для проведення дослідів використовували зливки електронно-променевої плавки (ЕПП) діаметром 110 мм [4], хімічний склад яких представлено в таблиці.

Дослідний литий сплав системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn відноситься до псевдо- $\alpha$ -сплаву, основні структурні складові якого є пластинчастою  $\alpha$ -фазою та невеликою кількістю залишкової  $\beta$ -фази [4]. Але кінцева структура титанових псевдо- $\alpha$ -сплавів формується в процесі гарячої деформаційної обробки і тип структури не зазнає суттєвих змін під час наступної термічної обробки.

Для того, щоб отримати значення фізичних характеристик нового титанового сплаву можливе використання комп'ютерних моделей для розрахунку теплофізичних і фізичних властивостей багатокомпонентних сплавів при затвердінні і охолодженні. Одним з основних методів отримання таких даних є термодинамічне моделювання за

Хімічний склад сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn, мас. %

Al	Zr	Si	Mo	Nb	Sn	Ti
6,2...6,9	5,0...5,5	0,5...0,85	0,5...0,8	0,5...0,8	1,5...2,5	Основа

А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>, В.Ю. Білоус — <https://orcid.org/0000-0002-0082-8030>,

Л.М. Радченко — <https://orcid.org/0000-0002-4235-2413>, В.А. Костін — <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>,

І.І. Алексеєнко — <https://orcid.org/0000-0002-2595-1684>, М.М. Кузьменко — <https://orcid.org/0000-0001-8108-7088>

© А.Ю. Северин, В.Ю. Білоус, Л.М. Радченко, В.А. Костін, І.І. Алексеєнко, Л.Т. Єремєєва, М.М. Кузьменко, 2025

методикою CALPHAD на підставі теорії багатокомпонентних сплавів [5].

CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) — це методологія та підхід у галузі матеріалознавства, яка використовується для моделювання, прогнозування та розуміння фазових діаграм матеріалів. Основна мета CALPHAD полягає в розв’язанні складних проблем фазових рівноважностей і фазових переходів, що допомагає вирішувати питання з проектування та оптимізації матеріалів. Основні аспекти CALPHAD включають [6]: термодинамічні моделі — CALPHAD використовує термодинамічні моделі для опису енергії різних фаз і фазових переходів в матеріалах. Ці моделі базуються на експериментальних даних та теоретичних розрахунках; фазові діаграми — CALPHAD дозволяє побудувати фазові діаграми матеріалів, які відображають, які фази присутні при різних комбінаціях температури, тиску та складу; бази даних — CALPHAD використовує термодинамічні бази даних, які містять інформацію про стандартні термодинамічні величини різних фаз та фазових переходів; прогнозування властивостей матеріалів — CALPHAD дозволяє прогнозувати властивості матеріалів, такі як твердість, теплопровідність, магнітні властивості та інші, на основі фазових діаграм і термодинамічних моделей; застосування в металургії — CALPHAD широко використовується в металургії для розробки нових сплавів та оптимізації процесів легування; застосування в матеріалознавстві — CALPHAD використовується для дослідження та розробки нових матеріалів з певними властивостями; системи з багатьма компонентами — CALPHAD дозволяє розробляти фазові діаграми для систем з багатьма компонентами, що є особливо важливим для складних матеріалів; подальші дослідження — CALPHAD постійно розвивається і нові методи та бази даних постійно додаються для вдосконалення прогнозування фазових діаграм та властивостей матеріалів.

Із застосуванням методу CALPHAD на нерівноважні процеси була використана модель SG, яка дає хороші результати для багатокомпонентних сплавів, що утворюються в процесі затвердіння, і яка дозволяє отримати залежність багатьох параметрів від їх складу і температури.

Властивості окремих фаз в багатокомпонентних системах, таких як молярний об’єм, теплопровідність, щільність, виражаються функціями, аналогічними тим, які використовуються для моделювання термодинамічних функцій в надлишкових багатокомпонентних сплавах. Після того, як властивості окремих фаз були визначені, властивість кінцевого сплаву розраховується з викорис-

танням добре зарекомендованих моделей суміші [7]. Такі моделі, які спочатку були розроблені для двофазних систем, були розширені на багатокомпонентні структури. Великі бази даних відповідних параметрів в даний час існують для більшості основних сталей і сплавів, алюмінієвих і титанових сплавів [8].

В ході роботи було проведено комп’ютерне моделювання фазових перетворень жароміцного титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn [9]. Для оцінки зміни ймовірного фазового складу металу було побудовано розрахункову CCT-діаграму (continuous-cooling-transformation-diagram) для цього сплаву (рис. 1).

На діаграмі (рис. 1) позначені температури початку перетворення  $\beta \rightarrow \alpha$  ( $\sim 1015$  °C) для швидкостей охолодження  $100 \dots 10$  °C/c та кінця  $\beta \rightarrow \alpha$  ( $820 \dots 750$  °C) для цих же швидкостей.

Для підтвердження розрахункової температури поліморфного перетворення жароміцного титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn було проведено дослідження твердофазних перетворень за допомогою диференціального сканувального колориметра DSC 404 F3 Pegasus, який працював у режимі ДТА (рис. 2). Зразки нагрівали та охолоджували зі швидкістю 20 K/хв до температури 1200 °C. Також для додаткового уточнення температур фазових перетворень було проведено загартування зразків з їх подальшим металографічним аналізом. Серію зразків сплаву нагрівали до температур від 800 до 1075 °C з шагом 25 °C, витримували в печі для повного протікання дифузійних процесів і загартували в воду для фіксації фазового складу. Зміна морфології структури і фазового складу зразка (рис. 2) дозволила встановити приблизну температуру поліморфного перетворення матеріалу. На загартованих зразках додатково проведено вимірювання мікротвердості на приладі LECO M-400 з навантаженням 0,1 кг. Зміна твердо-

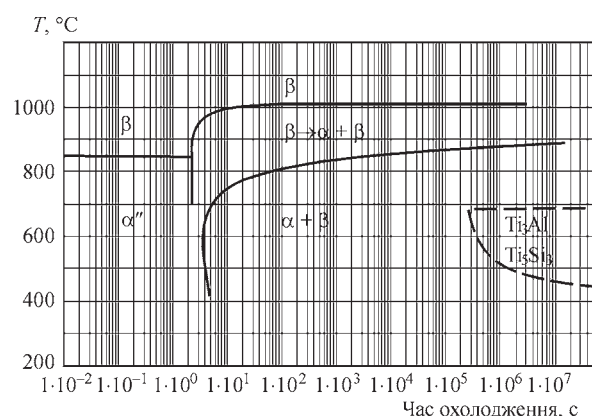


Рис. 1. Розрахункова CCT-діаграма жароміцного титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn

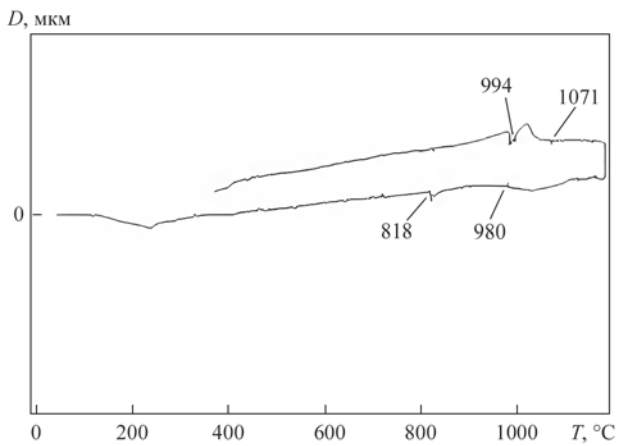


Рис. 2. Ділатограма сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn

сті матеріалу теж опосередковано доводить зміну його структури та фазового складу (рис. 3).

Сформована при загартуванні з температур двофазної ( $\alpha+\beta$ )-області мікроструктура складається з первинної  $\alpha$ -фази пластинчастої морфології та  $\alpha'$ -мартенситу. Можливо наявність дисперсійного зміцнення за рахунок дисперсійного  $\alpha'$ -мартенситу призводить до деякого підвищення твердості матеріалу в інтервалі температур 825...1000 °C. Загартування з однофазної області призводить до отримання  $\alpha'$ -мартенситу та незначної кількості залишкової  $\beta$ -фази. Підвищення твердості після температури 1000 °C може бути пояснено розчиненням інтерметалідної  $\alpha$ -фази та подальшим виділенням її в процесі загартування. Значне зростання твердості матеріалу зразків, загартованих з температури

вищої за 1050 °C пояснюється розчиненням силіцидів в  $\beta$ -фазі при цих температурах (рис. 4, а) [10], а при швидкому охолодженні випадінням силіцидів по об'єму зразка (рис. 4, б).

Співставлення розрахункової діаграми (рис. 1) та проведених експериментів показало досить невелику розбіжність у температурах перетворень. Так, згідно діаграми, у діапазоні швидкостей охолодження 10...100 °C/c, розрахований початок перетворення починається при температурах 780...850 °C, а закінчується при температурі ~1015 °C, що близько до експериментальних даних. Так, дилатометричний аналіз демонструє температуру переходу з  $\alpha$ - у ( $\alpha+\beta$ )-область близько 818 °C, що підтверджується зміною структури в загартованих зразках в діапазоні температур 800...825 °C. Перетворення ( $\alpha+\beta$ ) $\rightarrow\beta$  протікає в діапазоні температур 994...1025 °C, що також підтверджується зміною морфології структури в діапазоні 1000...1025 °C. Таким чином, використання розрахункових методів моделювання структурно-фазових перетворень для жароміцних титанових сплавів дозволяє отримати достатньо близькі до експериментальних результати, що дозволяє виключити операції ДТА і пробних загартувань та оптимізувати їх структурно-фазовий склад та підвищити механічні властивості.

Згідно з даними, які отримані за розрахунковою ССТ-діаграмою жароміцного титанового сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn і доведено експериментально, було проведено гарячу деформаційну обробку зі ступенем деформуван-

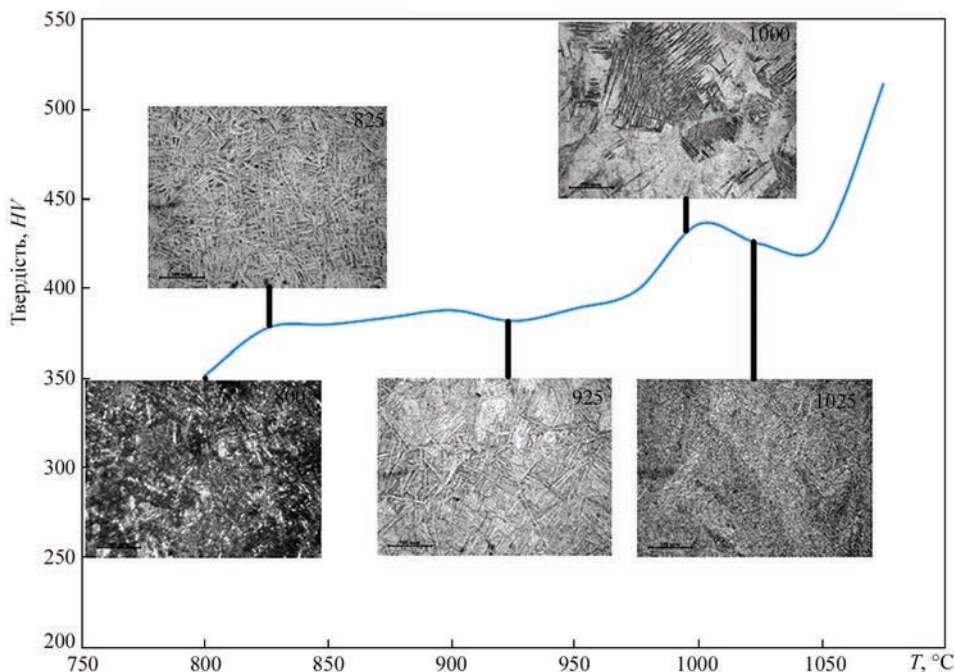


Рис. 3. Мікротвердість зразків та отримані структури після загартування з різних температур для сплаву системи легування Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn

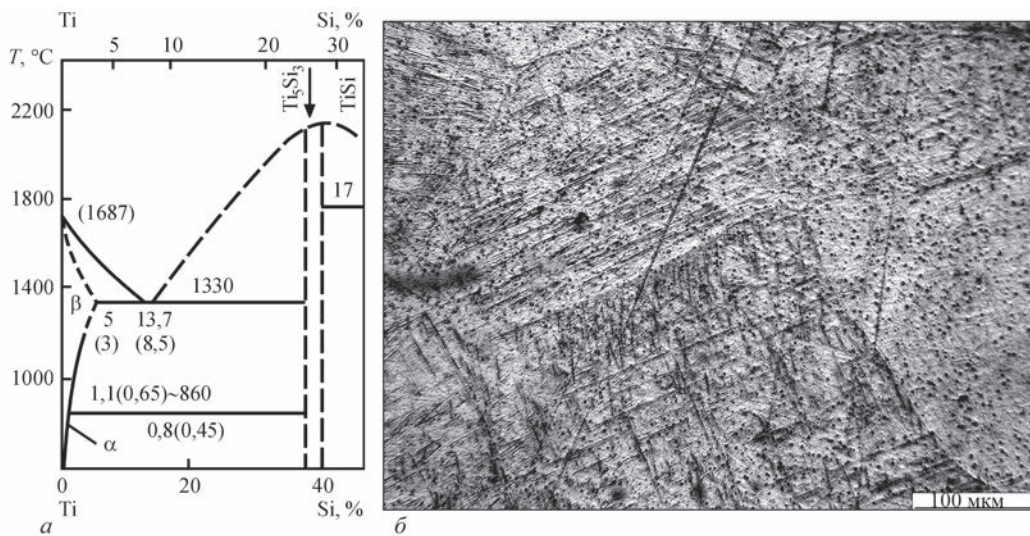


Рис. 4. Діаграма стану системи Ti-Si і структура, отримана після загартування сплаву системи легування Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn з температури 1050 °C

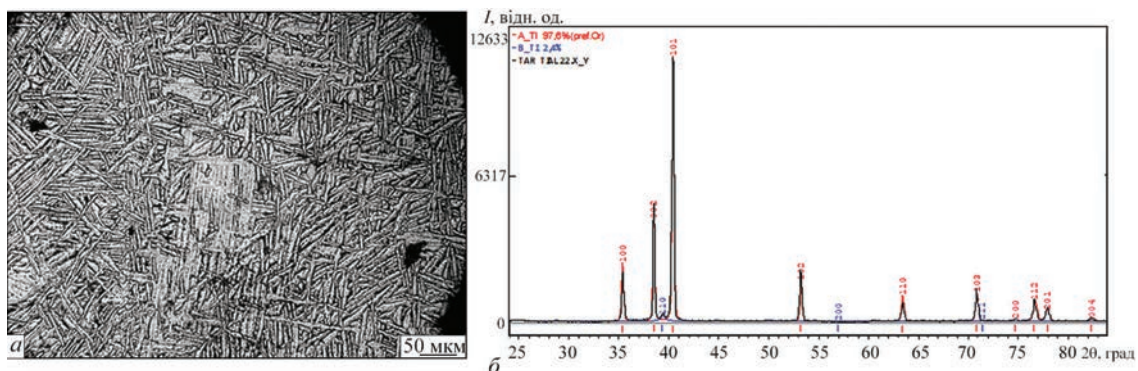


Рис. 5. Мікроструктура (а) і рентгенограма (б) вихідного металу жароміцного псевдо-β-титанового сплаву системи легування Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn

ня ~50 % з температури області існування β-фази (~1050 °C) зливка ЕПП [11]. Отримано деформовані напівфабрикати у вигляді прутків діаметром 55 мм, мікроструктура та фазовий склад яких представлено на рис. 5.

Мікроструктура зразка з деформованого прутка нагадує тип кошикового плетива з пакетів α-пластин (рис. 5, а). Силіцидні прошарки у вигляді переривчастих смуг розташовані між α-пластинами. Середній розмір зерна складає 50...70 мкм. Проведені методом рентгеноструктурного аналізу дослідження підтвердили, що псевдо-α-жароміцний титановий сплав є двофазним сплавом та складається з β-фази титану (β-Ti) у кількості 2,4 % (параметри ґратки:  $a = 2,9400$ ,  $c = 4,670$ ), α-фази титану (α-Ti) в кількості 97,6 % (параметри ґратки:  $a = 3,2225$ ) (рис. 5, б).

## Висновки

1. Побудовано розрахункову ССТ-діаграму жароміцного титанового сплаву системи легування Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn, що дозволило визначи-

ти температуру фазового α↔β-перетворення для проведення подальшої деформаційної обробки.

2. Проведено експериментальні загартування з різних температур серії зразків жароміцного титанового сплаву системи легування Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn, які доводять, що використання розрахункових методів моделювання структурно-фазових перетворень для жароміцних титанових сплавів дозволяє отримати результати, які є близькі до експериментальних.

3. Встановлено залежність мікротвердості металу від температури загартування зразків. Мікротвердість металу зразків, загартованих з (α+β)-області вища, ніж з α-області за рахунок збільшення кількості дисперсної α'-фази, яка має високу міцність та низьку пластичність. Мікротвердість металу зразків, загартованих з β-області на ~10 % вища за рахунок розчинення силіцидів та подальшого їх випадіння при загартуванні.

4. Проведено гарячу деформаційну обробку зливка ЕПП діаметром 110 мм з температури області існування β-фази та отримано дефор-

мовані напівфабрикати у вигляді прутків діаметром 55 мм. Досліджено його мікроструктуру та фазовий склад. Мікроструктура деформованого прутка нагадує тип кошикового плетива з пакетів  $\alpha$ -пластин, а силіцидні прошарки розташовані між  $\alpha$ -пластинами. В структурі присутня залишкова  $\beta$ -фаза у кількості 2,4 %.

### Список літератури/References

1. Hsueh-Chuan Hsu, Shih-Ching Wu, Shih-Kuang Hsu et al. (2014) Structure and mechanical properties of as-cast Ti–Si alloys. *Intermetallics*, 47(4), 11–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.12.004>
2. Shevchenko, O.M., Kulak, L.D., Kuzmenko, M.M. et al. (2023) The influence of the deformation and heat treatment on the structure and heat-resistance of Ti–Al–Zr–Si alloys. *Material Sci.*, 59(1), 40–48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00741-y>
3. Solonina, O.R., Glazunov, S.P. (1976) *Heat-resistant titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Akhonin, S.V., Berezos, V.O., Pikulin, O.M. et al. (2022) Producing high-temperature titanium alloys of Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system by electron beam melting. *Suchasna Elektrometallurhiya*, 2, 3–9 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.01>
5. Fan, Z., Tsakiroopoulos, P., Miodownik, A.P. (1994) A generalized law of mixtures. *J. of Mater. Sci.*, 29, 141–150. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00356585>
6. Lukas, H.L., Fries, S.G., Sundman, B. (2007) *Computational thermodynamics: The CALPHAD method*. U.K., Cambridge University Press.
7. Khina, B., Goranskiy, G.G. (2017) Thermodynamics of multi-component amorphous alloys: Theories and experiment comparison. *Adv. Materials and Technologies*, 1, 036–043. DOI: <https://doi.org/10.17277/amt.2017.01.pp.036-043>
8. Dinsdale, A.T. (1991) SGTE data for pure elements. *Calphad*, 15(4), 317–425. DOI: [https://doi.org/10.1016/0364-5916\(91\)90030-N](https://doi.org/10.1016/0364-5916(91)90030-N)
9. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Selin, R.V., Kostin, V.A. (2021) Influence of TIG welding thermal cycle on temperature distribution and phase transformation in low-cost titanium alloy. In: *Proc. of IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci.*, 688, 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/688/1/012012>
10. Lyakisheva, N.P. (2000) *State diagram of binary metallic systems*: Refer. Book. Vol. 2, Book 2. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
11. Akhonin, S.V., Severyn, A.Yu., Berezos, V.O. et al. (2024) Influence of deformation processing modes on the structure and mechanical properties of a high-temperature titanium alloy of the Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system. *Metallophysics and Advanced Technologies*, 46(7), 705–715. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.46.07.0705>

## STUDY OF THE TEMPERATURES OF PHASE TRANSFORMATION

### OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOY OF Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn ALLOYING SYSTEM

A.Yu. Severyn<sup>1</sup>, V.Yu. Bilous<sup>1</sup>, L.M. Radchenko<sup>1</sup>, V.A. Kostin<sup>1</sup>, I.I. Alekseenko<sup>1</sup>, L.T. Yeremeyeva<sup>1</sup>, M.M. Kuzmenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: [tim.severin72@gmail.com](mailto:tim.severin72@gmail.com)

<sup>2</sup>Frantsevych Institute for Materials Science Problems of the NAS of Ukraine.

3 Omelian Pritsak Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: [stsc.rapid@gmail.com](mailto:stsc.rapid@gmail.com)

Calculated CCD-diagram (continuous-cooling-transformation diagram) was derived for titanium alloy of Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system to determine the phase transformation kinetics. The structures and microhardness of samples of heat-resistant titanium alloy of Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system, quenched from different temperatures, were studied. It was proved that application of computational methods of modeling the structure-phase transformations for heat-resistant titanium alloys allows obtaining results close to the experimental values. 11 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

*Keywords: heat-resistant titanium alloy, thermodynamic modeling, phase transformation, deformation processing, temperature, structure, phase, microhardness*

Отримано 20.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 30.01.2025

Прийнято 21.02.2025



## ДОРОГІ НАУКОВИЦІ!

Щиро вітаємо з Міжнародним днем жінок і дівчат у науці\* (англ. International Day of Women and Girls in Science)! Нехай ваш розум завжди прагне до відкриттів, ваші ідеї змінюють світ, а ваші досягнення надихають нові покоління дослідниць. Ваша наполегливість, допитливість і талант роблять науку кращою та відкривають нові горизонти. Бажаємо нескінченного натхнення, цікавих експериментів і блискучих перемог!

\*Пам'ятна дата, відзначається 11 лютого за підтримки ЮНЕСКО та спеціальної структури ООН із питань гендерної рівності та розширення прав і можливостей жінок, маючи на меті сприяння повноцінному та рівному доступу жінок і дівчат до участі в науці.