

СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЖАРОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn ПІСЛЯ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ

С.В. Ахонін¹, А.Ю. Северин¹, О.М. Пікулін¹, М.М. Кузьменко², Л.Д. Кулак², О.М. Шевченко²

¹ІЗЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

03142, м. Київ, вул. Академіка Кржижановського, 3. E-mail: rapid@materials.kiev.ua

Досліджено структуру та механічні властивості жароміцного титанового сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn після гарячої деформаційної обробки за різними режимами. Встановлено, що деформаційна обробка металу, яка проведена у верхній частині області існування ($\alpha+\beta$)-фаз, забезпечує підвищення пластичності матеріалу в порівнянні з литим майже в 30 разів та забезпечує високі показники міцності як при кімнатній, так і при робочій температурі 600 °С. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: жароміцний титановий сплав; електронно-променева плавка; силіциди; механічні властивості; зливки; хімічний склад; деформаційна обробка; структура; фаза

Вступ. Сучасна авіаційна техніка потребує матеріали, що можуть доповнити або повністю замінити традиційно використовувані в цій області жароміцні сплави на основі нікелю, кобальту та заліза. Жароміцні сплави на основі титану — один із шляхів заміни цих сплавів. Наразі робочі температури промислових титанових сплавів не перевищують 600 °С, що дуже обмежує їх використання. Тому проблема поліпшення механічних властивостей титанових сплавів при температурах вищих за 600 °С є дуже актуальною на теперішній час. Один із напрямків підвищення робочих температур — створення титанових композитів на основі системи Ti–Si–Al–Zr–Sn з досить високим вмістом кремнію, що перевищує термодинамічно стабільну величину у твердому розчині. В таких сплавах зміцнення титанової матриці відбувається у процесі кристалізації завдяки утворенню нового класу матеріалів із високим рівнем жароміцних та жаростійких характеристик.

Матеріали та методика досліджень. Попередні дослідження показали, що електронно-променева плавка (ЕПП) дозволяє отримувати якісні зливки жароміцних титанових сплавів системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn, які характеризуються достатньою хімічною однорідністю та відсутністю дефектів ли-

того походження (пор, раковин, включень низької та високої щільності) [1, 2]. Для забезпечення високих фізико-механічних характеристик експериментальних титанових сплавів при кімнатній та підвищених температурах було проведено комплексне легування з метою зміцнення твердого розчину за рахунок α -фази та дисперсних частинок вторинної фази, зокрема силіцидами [3–5]. Середній хімічний склад по довжині отриманого експериментального сплаву наведено в табл. 1.

Дослідний сплав системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn відноситься до псевдо- α -сплавів, що складаються з пластинчастої α -фази та невеликої кількості залишкової β -фази [6].

Як відомо, кінцева структура титанових псевдо- α -сплавів формується в процесі гарячої деформації і тип структури не зазнає суттєвих змін під час термічної обробки. Одержану мікроструктуру сплавів поділяють на три типи в залежності від температурної області, де проходить їх деформація: рівновісного (деформація на початку $\alpha+\beta$ -області), кошикового плетива або пластинчастого (деформація в α -області), голчастого (деформація у β -області) [7, 8]. Тому були проведені роботи по деформуванню дослідного сплаву при різних температурах, тобто в різних областях існування фаз,

Таблиця 1. Середній хімічний склад сплаву Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn, мас. %

Плавка	Al	Zr	Si	Mo	Nb	Sn	Ti
815...208	6,4...6,8	5,1...5,4	0,74...0,76	0,55...0,75	0,5...0,6	1,8...2,5	Основа

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,
О.М. Пікулін — <https://orcid.org/0000-0001-6327-3448>, М.М. Кузьменко — <https://orcid.org/0000-0001-8108-7088>,
Л.Д. Кулак — <https://orcid.org/0000-0001-7861-0931>, О.М. Шевченко — <https://orcid.org/0000-0001-6726-7269>



Рис. 1. Напівфабрикат із жароміцного сплаву ЕПП після деформаційної обробки

для отримання оптимальної структури матеріалу і відповідно його механічних властивостей.

Для отримання пластин завтовшки 32...40 мм попередньо механічно оброблені зливки ЕПП піддавали гарячому переділу за допомогою реверсивного прокатного двовалкового стану 500/350 фірми «Skoda». Нагрів литих зливок під прокатку відбувався у електропечі опору до температури 1050 °С (в області існування β -фази) [9]. Прокатку здійснювали за декілька проходів з проміжним нагріванням заготовки в процесі деформування і закінчували в температурному інтервалі 980...850 °С, що відповідав або $\alpha+\beta$ -області, або вже α -області. Сумарне обтиснення заготовок складало близько 70 %. Зразок напівфабрикату, отриманого після деформування, представлено на рис. 1.

З отриманих деформованих напівфабрикатів вирізали зразки для вивчення мікроструктури та механічних властивостей матеріалу при різних температурах (рис. 2). Металографічні дослідження проводили методом скануючої електронної мікроскопії і виконували на растровому мікроаналізаторі JEOL

Superprobe-733. Механічні вимірювання на розтяг проводили на автоматизованій випробувальній машині UTM-100 виробництва ДП «СКТБ ІПМіц НАН України» відповідно до ГОСТ, ДСТУ та ISO на вимірювання та паспорту цієї машини.

Встановлено, що деформаційна обробка за різними режимами жароміцного сплаву системи Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn досить суттєво змінює морфологію мікроструктури. Процес прокатки всіх трьох зразків був однаковий, тому різниця структурних параметрів обумовлена температурами кінця деформування — в $\alpha+\beta$ - або α -області.

В попередніх роботах встановлено, що мікроструктура литого сплаву представляє собою пакети пластинчастої α -фази у межах первинних β -зерен, що мають різне кристалографічне орієнтування. Середній розмір зерна литих сплавів складає приблизно 300...500 мкм (рис. 3, а) [6].

У мікроструктурі деформованого сплаву по режиму 1 (тобто у верхній частині області існування ($\alpha+\beta$ -фази) α -фаза присутня як у пластинчастій, так і в глобулярній формі. Середній розмір зерна складає 20...40 мкм (рис. 3, б-д). Так як прокатку починали в області існування β -фази, а закінчували у ($\alpha+\beta$ -області, то деформується як β -фаза, так і α -фаза, яка вже утворилася. Деформацію α -фази супроводжує глобулізація — поділ α -пластин на окремі частинки-глобулі, що відбувається під час деформування у $\alpha+\beta$ -області. В процесі деформації форма α -пластин змінюється так, що вони прагнуть розташуватися вздовж напрямку течії металу, вигинаються, утворюючи волокнисту структуру. В кінцевій структурі разом з пер-

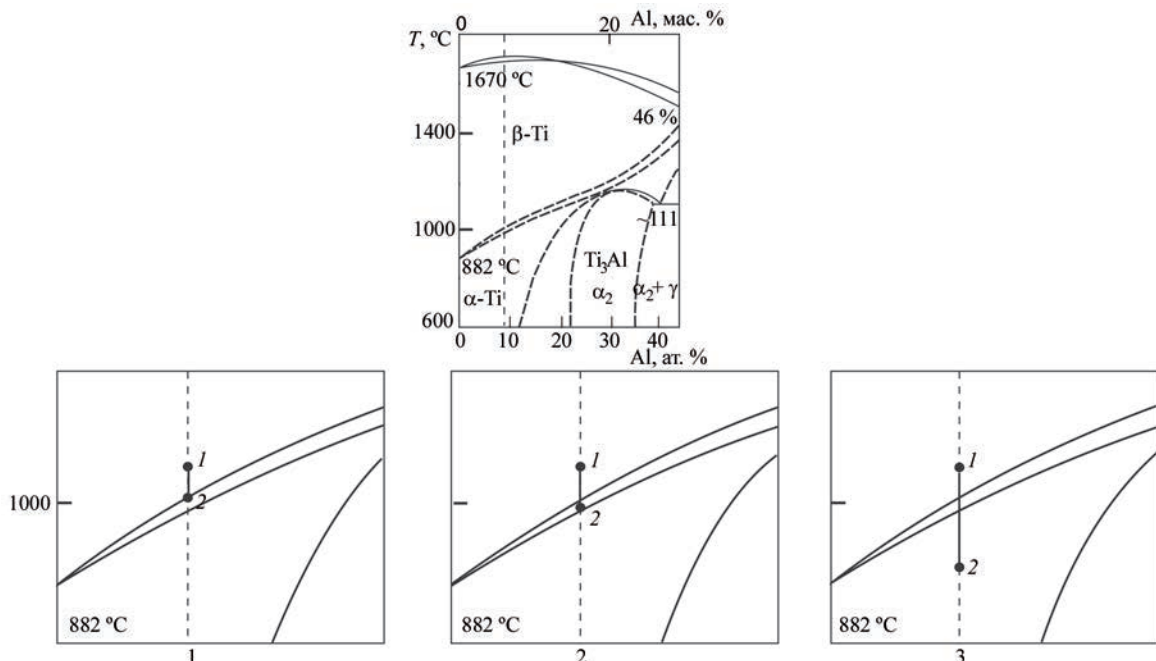


Рис. 2. Температурні режими (1, 2, 3) проведення деформаційної обробки жароміцного сплаву системи Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn. 1 — початок ДО; 2 — кінець ДО

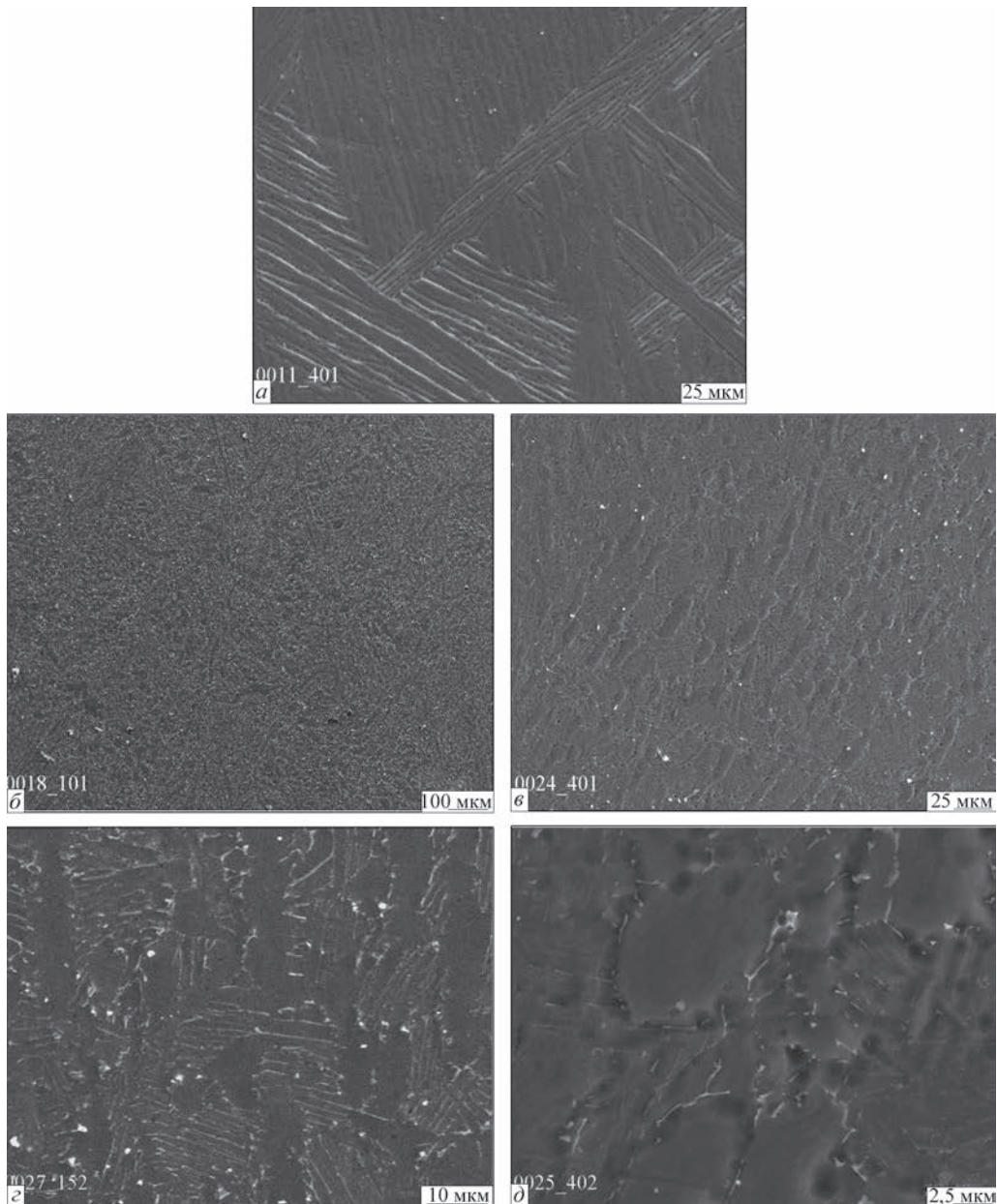


Рис. 3. Структура литого (а) та деформованого по режиму 1 (б–д) сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn

винною α -фазою спостерігається також виділення вторинної α -фази. У тих ділянках, де відбулося $\alpha \rightarrow \beta$ -перетворення при охолодженні після прокатки формується тонкопластинчаста α -фаза. В результаті утворюється змішана глобулярно-пластинчаста структура з різним співвідношенням цих двох морфологічних типів α -фази. Силіцидів у структурі досить багато, але вони дисперсні і розподілені між α -пластинами та у вигляді окремих виділень по границях і в середині зерен α -фази (рис. 3, д). Частково зерниста α -структура, змішана з пластинчастою і рівномірними дисперсними силіцидами, що сформувалась після деформаційної обробки по режиму 1, повинна забезпечувати оптимальне співвідношення показників міцності та пластичності [8].

У мікроструктурі деформованого сплаву по режиму 2, тобто на початку $\alpha + \beta$ -області, спостерігається кінцева стадія процесу розділення α -пластин на глобулі, форма та поздовжні розміри яких можуть бути досить різними, та формується структура, яка близька до рівновісної (рис. 4, а). Середній розмір зерна складає 10...20 мкм (рис. 4, б). Силіциди спостерігаються у вигляді більш грубих прошарків на границях і стиках зерен, а також дисперсних і коагульованих виділень у самих α -зернах розмірами 1...3 мкм (рис. 4, в, г). Згідно літературних даних така структура повинна дещо знижувати пластичність матеріалу [8].

Мікроструктура зразка, деформованого за режимом 3, тобто в області існування α -фази, більше нагадує тип кошикового плетива з пакетів

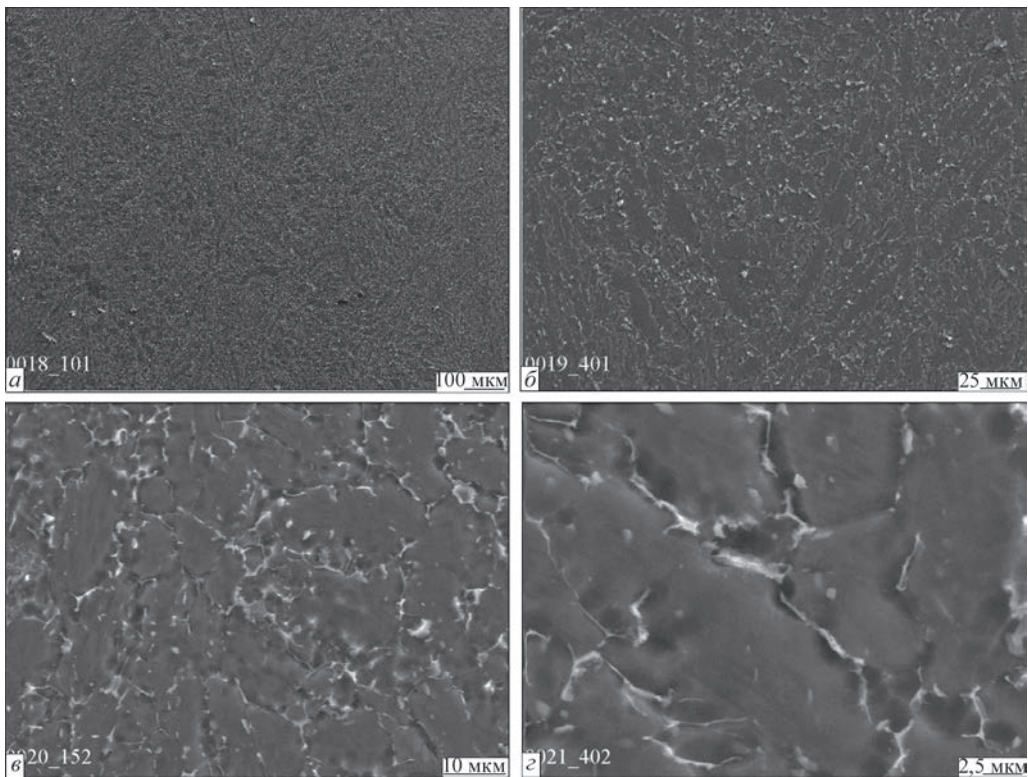


Рис. 4. Структура деформованого по режиму 2 сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn

α -пластин (рис. 5, а). Середній розмір зерна складає 20...40 мкм (рис. 5, б, в). Зазвичай вихідною структурою при деформації в однофазному α -стані є структура кошикового плетива або пластинчаста, для якої характерне спільне орієнтування α -пластин у межах колонії. В нашому випадку

розорієнтація між сусідніми пластинами не перевищує 1° , що визначає можливість деформації цілої пачки паралельних α -пластин як одного цілого зерна. При проміжних нагрівах проходить рекристалізація, в ході якої спостерігається злиття окремих α -пластин у пакети, які однаково орієнто-

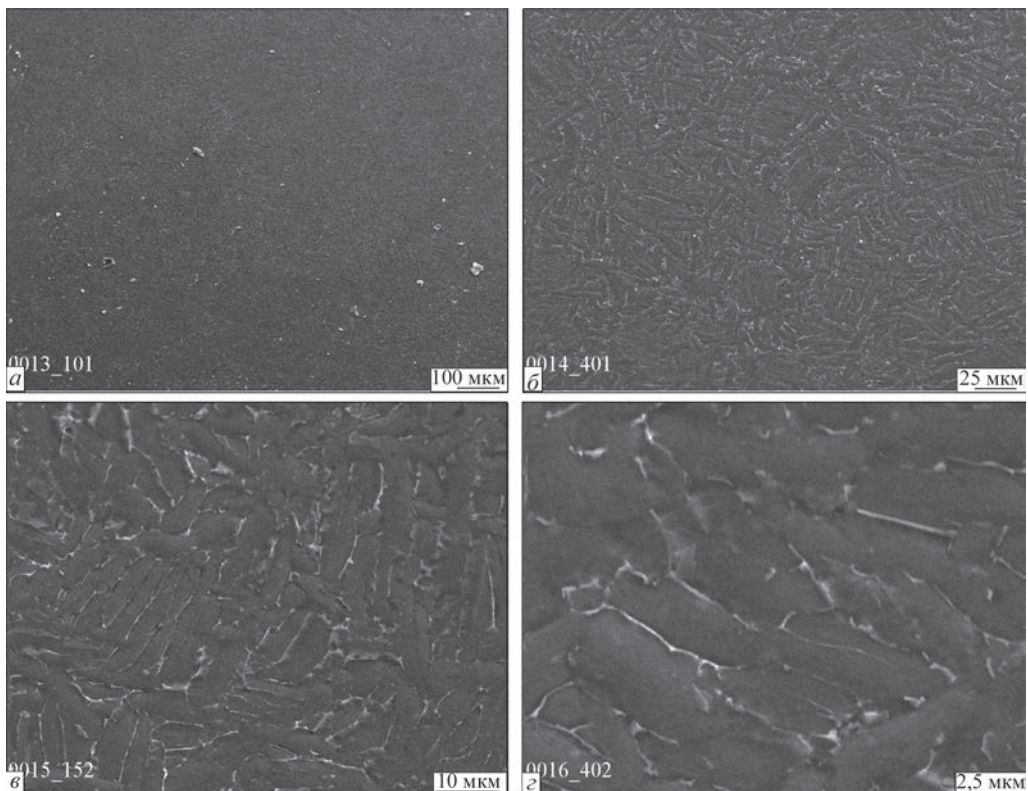


Рис. 5. Структура деформованого по режиму 3 сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn

Таблиця 2. Механічні властивості литого та деформованого сплавів при різних температурах, °С

Стан металу	20			550			600		
	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	МПа			МПа			МПа		
Литий	1045...1067	1022...1043	0,35...0,40	758...764	590...603	2,2...2,7	652...696	554...586	3,9...4,1
Деформований	1101...1169	1052...1107	7,7...10,4	761...778	609...619	10,9...13,2	744...765	552...575	11,5...14,6

вані. Ширина цих пластин складає від 2 до 5 мкм, а між ними розташовані тонкі силіцидні прошарки у вигляді переривчастих смуг (рис. 5, в, з). Згідно літературних даних такий вид структури призводить до зниження міцностних та пластичних характеристик матеріалу [8].

В експерименті були проведені дослідження механічних властивостей при кімнатній та підвищених температурах литого та деформованого сплаву за режимом 1, що забезпечив формування оптимального типу мікроструктури. Так як в подальшому прогнозується використання даної групи сплавів при робочих температурах до 600 °С, то для випробувань при підвищених температурах вирішено зупинитися на величині 600 °С. Дані механічних випробувань наведено в табл. 2.

Аналіз результатів механічних випробувань показав, що повністю пластинчаста структура литого матеріалу хоч і має тенденцію до підвищення межі плинності досліджуваного матеріалу, проте при кімнатній температурі не забезпечує навіть мінімальну технологічну пластичність. Деформаційна обробка, що проведена у верхній частині ($\alpha+\beta$)-області, дозволила збільшити міцність і, найголовніше, суттєво підвищити пластичність матеріалу, при цьому незначне середнє зниження межі плинності матеріалу мало місце як при кімнатній температурі, так і при 600 °С при короткотривалих випробуваннях. Подальші довготривалі високотемпературні випробування, в тому числі і на повзучість, дозволять більш повно і якісно оцінити здатність досліджуваного матеріалу працювати в реальних виробках та вибрати область його застосування.

Висновки

1. Мікроструктура зразків жароміцного сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn в стані після деформаційної обробки з верхньої частини області існування ($\alpha+\beta$)-фаз змішана, глобулярно-пластинчаста, з різним співвідношенням цих двох морфологічних типів α -фази. Дисперсні силіциди розподілені між α -пластинами та у вигляді окремих виділень по границях і в середині зерен α -фази.

2. Мікроструктура зразків жароміцного сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn в стані після деформаційної обробки з нижньої частини області існування ($\alpha+\beta$)-фаз близька до рівновісної. Силіциди

спостерігаються у вигляді більш грубих прошарків на границях зерен і у вигляді дисперсних та коагульованих виділень округлої форми у α -зернах.

3. Мікроструктура зразків жароміцного сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn в стані після деформаційної обробки з α -області відноситься до типу кошикового плетива і складається з пакетів α -пластин. Силіцидні прошарки у вигляді переривчастих смуг розташовані між α -пластинами.

4. Деформаційна обробка металу, що проведена у верхній частині області існування ($\alpha+\beta$)-фаз, забезпечує підвищення пластичності матеріалу при кімнатній температурі в порівнянні з литим майже в 25 разів (з 0,38 до 9,00 %) та забезпечує високі показники міцності як при кімнатній (1135 МПа), так і при робочих температурах до 600 °С (755 МПа).

Список літератури

1. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
2. Ахонин С.В., Фирстов С.А., Северин А.Ю. и др. (2019) Электронно-лучевая выплавка жаропрочных титановых композитов системы Ti–Si–Al–Zr–Sn. *Современная электрометаллургия*, 2, 7–12. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.02.02>
3. Wu T., Beaven P, Wagner R. (1990) The $Ti_3(Al, Si)-Ti_5(Si, Al)_3$ eutectic reaction in the Ti–Al–Si system. *Scripta Metallurgica*, 24, 207–212.
4. Шевченко О.М., Кулак Л.Д., Кузьменко М.М., Фирстов С.О. (2020) Вплив легування цирконієм на структуру та твердість загартованого литого біосумісного стопу Ti–18Nb–1Si. *Металофізика і новітні технології*, 42(2), 237–249.
5. Фирстов С.О., Кулак Л.Д., Кузьменко М.М., Шевченко О.М. (2018) Сплави системи Ti–Al–Zr–Si для експлуатації за високих температур. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 54(6), 30–35.
6. Firstov S.O., Kulak L.D., Kuzmenko M.M., Shevchenko O.M. (2019) Alloys of the Ti–Al–Zr–Si system intended for operation at high temperatures. *Materials Sci.*, 54(6), 783–788.
7. Ахонин С.В., Березос В.О., Пікулін О.М. та ін. (2022) Отримання жароміцних титанових сплавів системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn способом електронно-променевої плавки. *Сучасна електрометаллургія*, 2, 3–9. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.01>
8. Солонина О.П., Глазунов С.Г. (1976) *Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы*. Москва, Металлургия.
9. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.

10. (2000) *Діаграми стану подвійних металічних систем*. Справочник. Т. 3. Кн. 2. Москва, Машиностроєння, сс. 330–332.

References

1. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.B., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Akhonin, S.V., Firstov, S.A., Severin, A.Yu. et al. (2019) Electron beam melting of heat-resistant titanium composites of Ti–Si–Al–Zr–Sn system. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 7–12 [in Ukrainian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.02.02>
3. Wu, T., Beaven, P., Wagner, R. (1990) The $Ti_3(Al, Si)-Ti_5(Si, Al)_3$ eutectic reaction in the Ti–Al–Si system. *Scripta Metallurgica*, **24**, 207–212.
4. Shevchenko, O.M., Kulak, L.D., Kuzmenko, M.M., Firstov, S.O. (2020) Influence of zirconium alloying on structure and hardness of hardened cast biocompatible alloy Ti–18Nb–1Si. *Metaloфізика і Novitni Tekhnologii*, **42(2)**, 237–249 [in Ukrainian].
5. Firstov, S.O., Kulak, L.D., Kuzmenko, M.M., Shevchenko, O.M. (2018) Alloys of Ti–Al–Zr–Si system for operation at high temperatures. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **54(6)**, 30–35 [in Ukrainian].
6. Firstov, S.O., Kulak, L.D., Kuzmenko, M.M., Shevchenko, O.M. (2019) Alloys of the Ti–Al–Zr–Si system intended for operation at high temperatures. *Materials Sci.*, **54(6)**, 783–788.
7. 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 Elektrometal.*, **2**, 3–9 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.01>
8. Solonina, O.P., Glazunov, S.G. (1976) *Titanium alloys. Heat-resistant titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
9. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
10. (2000) *State diagrams of binary metal systems*: Refer. Book, Vol. 3, Book 2. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE TITANIUM ALLOY OF Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn SYSTEM AFTER DEFORMATION TREATMENT

S.V. Akhonin¹, A.Yu. Severin¹, O.M. Pikulin¹, M.M. Kuzmenko², L.D. Kulak², O.M. Shevchenko²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Frantsevych Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine.

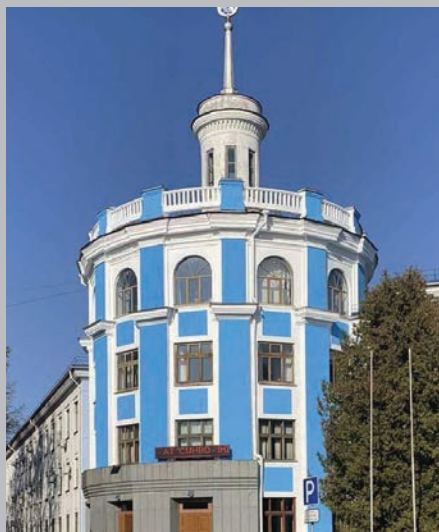
3 Acad. Krzhyzhanovskiy Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: rapid@materials.kiev.ua

The structure and mechanical properties of high-temperature titanium alloy of Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system after hot deformation treatment by various modes were studied. It was found that metal deformation treatment performed in the upper part of the region of ($\alpha+\beta$)-phase existence, ensures an increase of material ductility by almost 30 times, compared with lithium, and high strength values, both at room and at working temperature of 600 °C. Ref. 10, Tabl. 2, Fig. 5.

Key words: high-temperature titanium alloy; electron beam melting; silicides; mechanical properties; ingot; chemical composition; deformation treatment; structure; phase

Надійшла до редакції 06.09.2022

Співпраця ІЕЗ та «СМНВО-Інжиніринг»



У жовтні цього року директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України академік І.В. Кривцун з колегами відвідали акціонерне товариство «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – Інжиніринг». У рамках візиту вони провели нараду з генеральним директором підприємства В.М. Лук'яненком, ознайомились з діяльністю «СМНВО-Інжиніринг» та визначили перспективні напрямки співробітництва відповідно до нових викликів часу і потреб промисловості України. За результатами зустрічі була підписана генеральна угода про науково-технічне довгострокове співробітництво в галузі енергетичного, нафтохімічного та атомного машинобудування, зварювання, металургії й розробки нових матеріалів, в т.ч. електродів для зварювання. В рамках угоди передбачається також спільна участь ІЕЗ та «СМНВО-Інжиніринг» в національних та міжнародних промислових виставках та співробітництво по актуалізації контенту журналів «Автоматичне зварювання» і «The Paton Welding Journal» відповідно до вимог часу.