

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ВЫПЛАВКА ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ Ti–Si–Al–Zr–Sn

С.В. Ахонин¹, С.А. Фирстов², А.Ю. Северин¹, Н.Н. Кузьменко², В.А. Березос², Л.Д. Кулак²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины.

03142, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: rapid@ipms.kiev.ua

Проведены комплексные исследовательские работы по получению способом электронно-лучевой плавки слитков жаропрочного сплава титана системы Ti–Si–Al–Zr–Sn, подвергнутых горячей пластической деформации для получения прутков-полуфабрикатов. Усовершенствована схема шихтовки и определены технологические параметры электронно-лучевой плавки слитков в модернизированной электронно-лучевой установке УЭ-208М. Исследованы химический состав и структура полученных слитков титановых сплавов системы Ti–Si–Al–Zr–Sn и показано, что материал характеризуется достаточно высокой химической однородностью. Проведена горячая деформационная обработка слитков электронно-лучевой плавки и получены качественные прутки-полуфабрикаты жаропрочного сплава системы Ti–Si–Al–Zr–Sn. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: жаропрочный титановый сплав; слиток; электронно-лучевая плавка; технологические режимы; химический состав; структура; деформационная обработка

В настоящее время аэрокосмическая и авиационная техника нуждается в легких и прочных материалах, которые смогут дополнить традиционно используемые в данных областях жаропрочные сплавы на основе никеля, кобальта и железа. Жаропрочные сплавы на основе титана — один из путей решения этой задачи. Несмотря на то, что титановые сплавы имеют преимущество по удельной прочности по сравнению с традиционными жаропрочными материалами, с ростом температуры их прочность начинает существенно снижаться [1, 2]. Рабочие температуры современных промышленных титановых сплавов (BT18У, ИМИ 834, Ti-1100) не превышают 600 °С, что ограничивает их использование [3]. Поэтому проблема улучшения механических характеристик титановых сплавов при температурах превышающих 600 °С актуальна на данный момент и требует решения.

Дальнейшее повышение высокотемпературных механических свойств промышленных титановых сплавов за счет их твердорастворного упрочнения практически исчерпано, поэтому перспективным направлением для повышения этих свойств является упрочнение за счет интерметаллидных соединений в композиции с эвтектическими выделениями силицида $Ti_5(SiAl)_3$. Одним из направлений решения данной проблемы является создание титановых композитов на основе системы Ti–Si–Al–Zr с содержанием кремния, превышающим термодинамически стабильную величину в твердом растворе. Такие композиты имеют многофазную структуру, где упрочнение титановой матрицы тугоплавким соединением Ti_5Si_3 происходит естественным образом в процессе кристаллизации. Сплавы данной системы перспективны для создания нового клас-

са материалов с высоким уровнем жаропрочных и жаростойких характеристик [4–6]. В последнее время наряду с алюминием в качестве легирующих элементов применяют цирконий и олово. Эти элементы относятся к стабилизирующим α -фазу титана. Цирконий положительно влияет на свойства сплавов при высоких температурах, образует с титаном непрерывный ряд твердых растворов на основе α -титана и не участвует в упорядочении твердого раствора. Олово, особенно в сочетании с алюминием и цирконием, повышает жаропрочные свойства сплавов, но в отличие от циркония образует в сплаве упорядоченную фазу — Ti_3X . Растворимость олова в α -титане около 20 % [7]. При обычной температуре оно является довольно слабым упрочнителем, но существенно повышает жаропрочные свойства материала. Поэтому олово добавляют к жаропрочным титановым сплавам обычно в количестве 1...6 %. Также олово заметно повышает технологическую пластичность сплавов системы Ti–Al [3].

Главным фактором, влияющим на качество материалов, особенно обладающих низкой технологической пластичностью, является высокое качество исходного слитка. Обеспечить достойное качество получаемого слитка с равномерной, не грубой структурой и хорошей химической однородностью способен электронно-лучевой переплав [8].

Цель данной работы — определение оптимальных технологических параметров ведения плавки сплавов данной системы на модернизированном оборудовании, разработка схем шихтовки, исследование влияния комплексного легирования цирконием, кремнием и оловом на структуру и

свойства материала, а также получение деформированного прутка из этих сплавов.

Электронно-лучевая плавка является одним из наиболее эффективных способов современной специальной электрометаллургии и широко применяется для получения особо чистых ниобия, тантала, ванадия, циркония, титана и многих других металлов и их сплавов. На сегодняшний день в Украине для проведения фундаментальных научно-исследовательских работ по изучению металлургических процессов в вакууме, совершенствованию существующих и разработке новых технологических процессов используются модернизированные электронно-лучевые установки. Экспериментальные плавки данного исследования были проведены на многоцелевой модернизированной электронно-лучевой установке УЭ-208М [9].

С целью отработки технологических схем шихтовки и режимов плавки слитки сплавов системы Ti-Si-Al-Zr-Sn выплавляли в кристаллизатор диаметром 110 мм. В качестве исходных шихтовых материалов использовали технически чистый титан ВТ1-0, алюминий марки А0, кремний марки КР1, чистое олово в гранулах, а также йодидный цирконий. Для предотвращения растекания олова, уменьшения его потерь и обеспечения гарантированного равномерного химического состава конечного слитка была использована схема шихтовки, описанная в работе [10], а для расчетов шихтовых материалов применен предыдущий опыт выплавки

титановых сплавов, упрочненных силицидами [11]. Кремний понижает температуру плавления титана почти на 320 °С, поэтому испарение алюминия происходит в меньшей степени. Отмеченный эффект, по-видимому, связан с особенностями диаграммы фазовых равновесий системы Ti-Si [7].

На первой стадии подготовки шихты шихтовую заготовку формировали по схеме, предназначенной для многокомпонентных титановых сплавов. Затем к полученному слитку-заготовке аргоно-дуговой сваркой приваривали контейнер, изготовленные из листа титана марки ВТ1-0, которые заполняли гранулированным оловом, взвешенным согласно схеме шихтовки с учетом потерь на испарение. Для предотвращения рассыпания гранул олова в процессе плавки их сплавляли в монолитную заготовку с помощью газовой горелки (рис. 1, а). Затем к заготовке добавляли алюминий с учетом его потерь на испарение. Для предотвращения интенсивного испарения элементов с высокой упругостью пара при воздействии на шихту электронного луча полученный «пакет» накрывали листами титана ВТ1-0 (рис. 1, б). Выплавку слитка осуществляли в соответствии с рассчитанными мощностями и конфигурацией нагрева его торца в кристаллизаторе (рис. 1, в). В результате плавки получены слитки сплавов системы Ti-Si-Al-Zr-Sn диаметром 110 мм и длиной 500...600 мм (рис. 1, г).



Рис. 1. Подготовленная шихта (а, б), процесс плавки (в) и полученный слиток ЭЛП системы Ti-Si-Al-Zr-Sn в камере вытяжения (г)

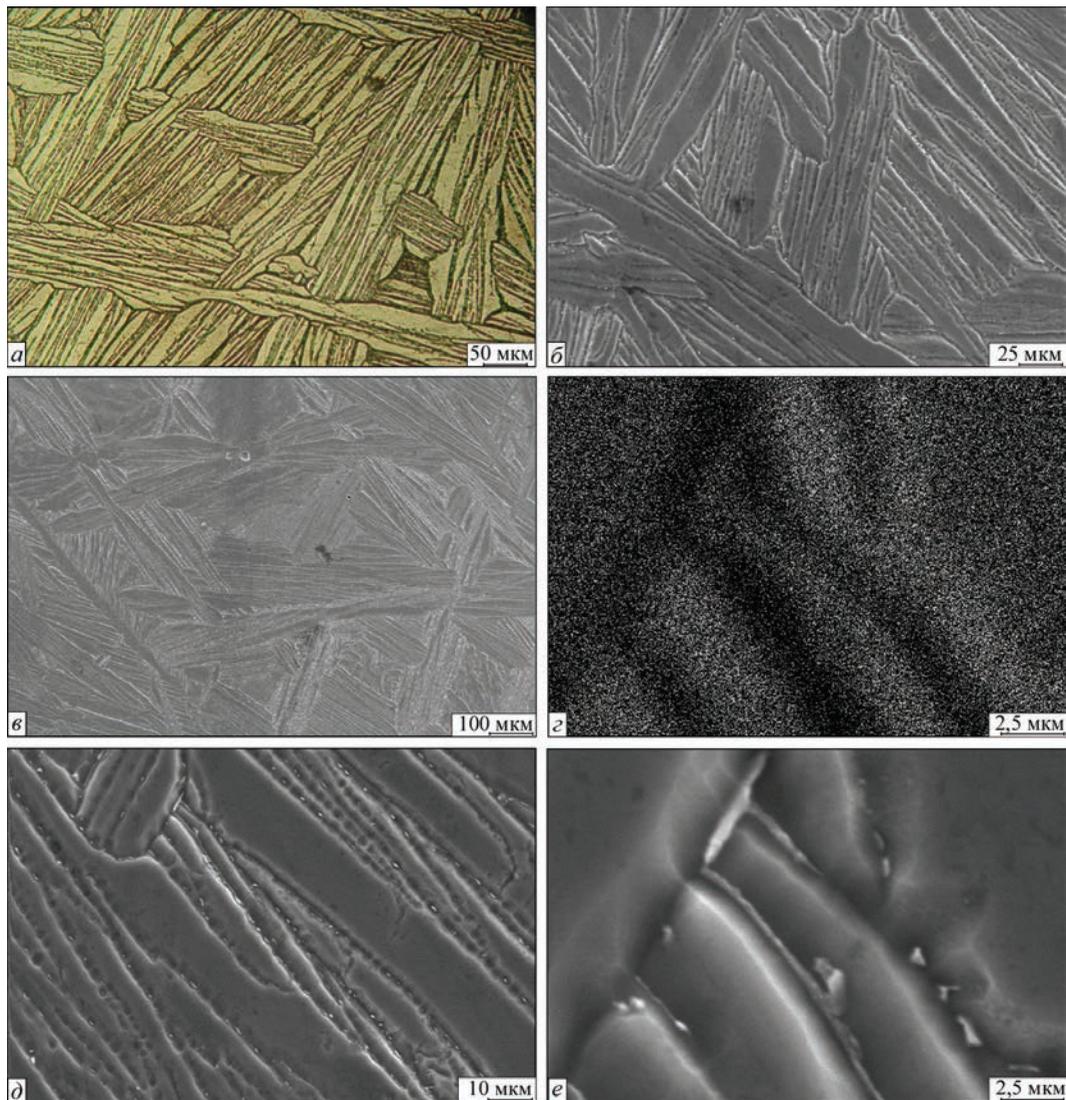


Рис. 2. Микроструктура литого сплава ЭЛП системы Ti–Al–Si–Zr (*a* — оптическая металлография; *б* — сканирующая электронная микроскопия) и распределение кремния в слитке (*в–е*)

Численные значения технологических параметров плавки для слитков системы Ti–Si–Al–Zr–Sn следующие:

диаметр слитка, мм	110
скорость плавки, кг/ч	30
высота одновременно заливаемых порций в кристаллизатор, мм	10
мощность кристаллизатора, кВт	20
мощность промежуточной емкости, кВт	90

Структуру полученных сплавов исследовали способами оптической (Jenaphot-2000) и сканирующей электронной (Superprobe-733) микроскопии. Во время охлаждения в сплавах системы Ti–Si–Al–Zr формируются α -фаза, а также интерметаллидные соединения, преимущественно на границах β -зерен, заполняя внутренний объем первичных зерен как хаотичными α -пластинами, так и собранными в пачки α -колониями. Поэтому микроструктура исследуемых литых сплавов представляет собой пакеты, состоящие из ламелей

пластинчатой α -фазы в пределах первичных β -зерен, имеющих различное кристаллографическое ориентирование (рис. 2). Размеры α -пластин колеблются от нескольких микрон до 30...50 мкм и



Рис. 3. Деформированный полуфабрикат, полученный из слитка ЭЛП системы Ti–Si–Al–Zr–Sn

Механические свойства литых и деформированных слитков ЭЛП системы Ti-Si-Al-Zr-Sn, полученные при различных температурах

Сплав	Температура испытания при растяжении					
	20 °С			700 °С		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Ti-Si-Al-Zr* (литой)	956...988	–	0	630...655	529...565	3,2...5,5
Ti-Si-Al-Zr* (деформированный)	1056...1102	–	0	530...575	529...535	5,7...6,4
Ti-Si-Al-Zr-Sn* (деформированный)	893...907	802...813	5,6...7,7	407...423	388...397	38...53

*Сплавы отличаются по содержанию Si и Zr.

расположены в пределах бывших β -зерен. Размер β -зерен составляет от 50 до 2000 мкм и более и зависит от скорости кристаллизации. Это свидетельствует о различной скорости охлаждения в каждой из зон слитка при его кристаллизации. Присутствуют также небольшие участки равноосных мелких α -зерен, расположенных, в основном, по границам первичных зерен или пакетов пластин, что свидетельствует о частичном прохождении рекристаллизационных процессов. Размеры пакетов

α -пластин и их толщина определяются скоростью охлаждения, а также количеством легирующих элементов, в частности кремния. По границам бывших β -зерен наблюдаются выделения грубых силицидов Ti_5Si_3 и целые силицидные слои, а по границам α -пластин — мелкие вторичные силициды. Грубые силициды и силицидные слои формируются при снижении растворимости кремния в β -фазе согласно диаграммы фазового равновесия системы Ti-Si [7] в результате ликвационных

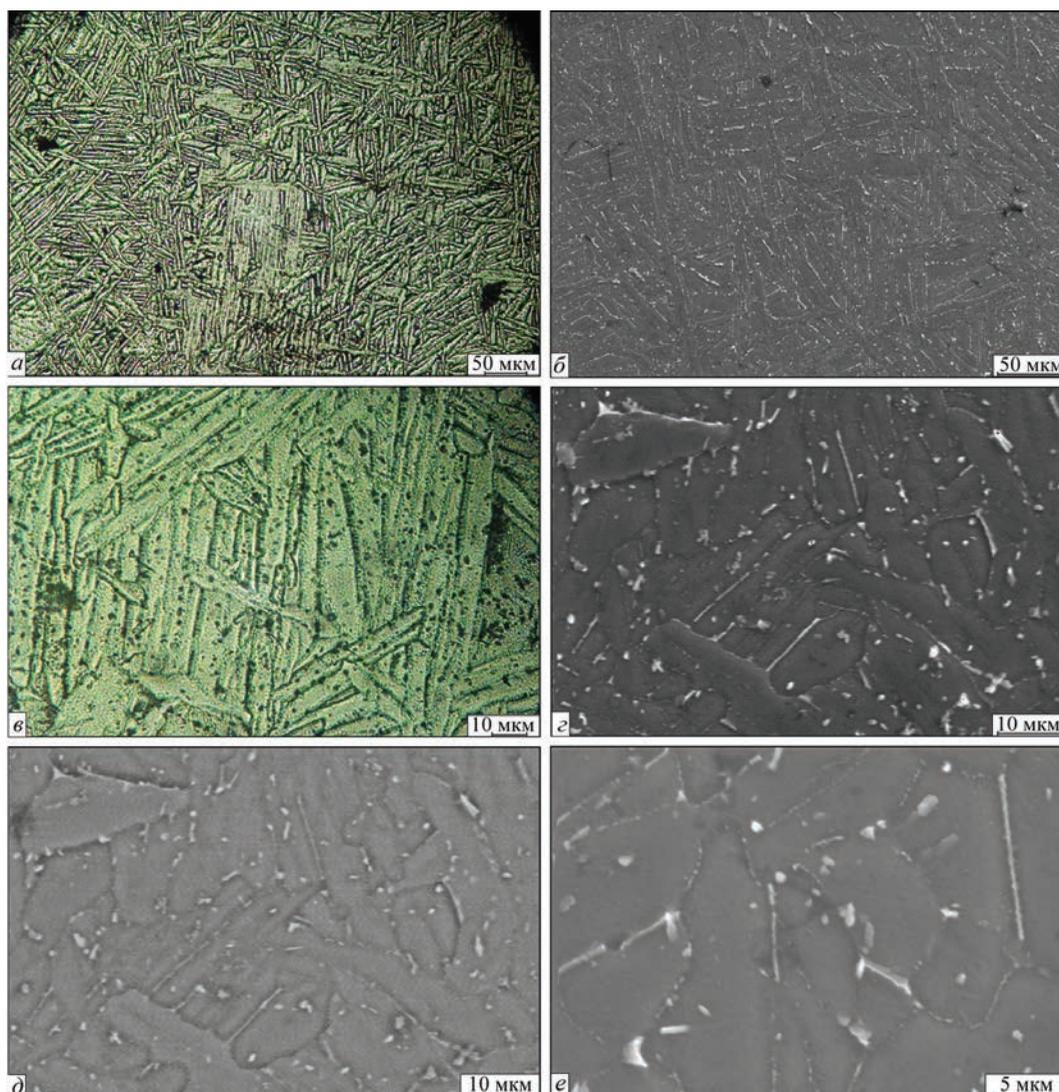


Рис. 4. Структура деформированного сплава ЭЛП системы Ti-Al-Si-Zr-Sn: а, в — оптическая металлография; б, г — сканирующая электронная микроскопия

процессов при затвердевании слитка, а мелкие силициды — по границам α -пластин в результате эвтектоидного превращения и дальнейшего снижения растворимости кремния в титановой α -матрице. Таким образом, на растворимость кремния в титане существенное влияние оказывают другие легирующие элементы. Исследование материала с помощью сканирующей электронной микроскопии показало достаточно равномерное распределение кремния по сечению слитка.

Для получения деловых прутков диаметром 50 мм предварительно механически обработанные слитки ЭЛП подвергли горячему переделу на прутки-заготовки диаметром 55 мм с помощью реверсивного двухвалкового прокатного стана 500/350 фирмы «Skoda». Прогретую до температуры 1150 °С с выдержкой 90 мин заготовку обкатывали вдоль оси слитка до диаметра 55 мм с промежуточными подогревами (рис. 3). Температура окончания прокатки составляла 900 °С и контролировалась визуально. Степень деформации слитка составила около 50 %.

После окончания деформационной обработки на стане полученный полуфабрикат помещали в печь при температуре 1100 °С с выдержкой около 20 мин, а затем производили ее правку на гидравлическом прессе П-457 для устранения неровностей, полученных при прокатке. Конечные размеры деформированного полуфабриката составили: диаметр 54...57 мм, длина около 1100 мм.

Из полученных прутков-полуфабрикатов вырезали образцы для изучения микроструктуры и механических свойств деформированного материала. Образцы сплава Ti–Si–Al–Zr–Sn после деформирования на плоских валках с промежуточными нагревами имели достаточно однородную структуру (рис. 4, а). Прокатку начинали в β -, а заканчивали в ($\alpha + \beta$)-областях, при этом деформировалась как β -фаза, так и α -фаза, которая уже образовалась. При промежуточных подогревах проходит незначительная рекристаллизация, в ходе которой происходит слияние отдельных однонаправленных α -пластин. Таким образом, в деформированном сплаве сформировалась структура, состоящая из примерно равного количества разнонаправленных пластин и участков массивной α -фазы (зародышей будущих равноосных α -зерен), на границах и внутри которых остались дисперсные выделения силицидов размерами 0,5...1,0 мкм (рис. 4, б–е). Разрушение этого сплава хрупко-вязкое при наличии значительного количества откольных фасеток, разделенных деформационными гребнями, проходящими по границам пакетов α -пластин или массивной α -фазы. В результате пластичность сплава системы Ti–Si–Al–Zr–Sn, содержащего олово как при 20 °С, так и 700 °С, выше, чем сплава Ti–Si–Al–Zr, но прочность несколько ниже (таблица).

Определение механических свойств при растяжении проводили при 20 и 700 °С на стандартных образцах с диаметром рабочей части 5 мм. Механические свойства сплавов ЭЛП системы Ti–Si–Al–Zr–Sn представлены в таблице.

Выводы

1. Проведенный комплекс работ позволил усовершенствовать процесс подготовки шихтовых материалов и определить технологические параметры электронно-лучевой плавки слитков жаропрочного титанового сплава системы Ti–Si–Al–Zr–Sn. Производительность процесса ЭЛП составляла 30 кг/ч, мощность электронно-лучевого нагрева в кристаллизаторе — 20 кВт.

2. Металл слитков жаропрочного титанового сплава системы Ti–Si–Al–Zr–Sn, полученных способом ЭЛП, характеризуется достаточной химической однородностью и отсутствием дефектов (пор, раковин, включений низкой и высокой плотности).

3. Установлена возможность получения качественных деформированных полуфабрикатов из слитка ЭЛП жаропрочного титанового сплава системы Ti–Si–Al–Zr–Sn.

4. После прокатки из β -области в сплаве системы Ti–Si–Al–Zr–Sn образуется мелкозернистая структура с пластинчато-игольчатым внутризерненным строением, обеспечивающим высокие прочностные и пластические свойства как при комнатной, так и при температурах 650...700 °С. Полученные способом электронно-лучевой плавки слитки сплава системы Ti–Si–Al–Zr–Sn можно рекомендовать для изготовления деформированных полуфабрикатов.

Список литературы

1. Солонина О.П., Глазунов С.Г. (1976) *Жаропрочные титановые сплавы*. Москва, Металлургия.
2. Анташов В.Г., Ночовная Н.А., Иванов В.И. (2002) Тенденция развития жаропрочных титановых сплавов для авиационного строительства. *Технология легких сплавов*, 4, 72–76.
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС–МАТИ.
4. Фирстов С.О. (2004) Нове покоління матеріалів на базі титану. *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій*. Панасюк В. В. (ред.). Львів, ФМІ НАН України, сс. 609–616.
5. Кузьменко М.М. (2008) Структура та механічні властивості литих сплавів системи Ti–Si. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 44(1), 45–48.
6. Фирстов С.А., Ткаченко С.В., Кузьменко Н.Н. (2009) *Титановые «чугуны» и титановые «стали»*. МиТОМ, 1, 14–20.
7. (2000) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Справочник. Лякишев Н.П. (ред.). Т. 3. Кн. 2. Москва, Машиностроение.
8. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.

9. Тихоновский А.Л., Тур А.А., Кравец А.Н. и др. (1992) Электронно-лучевая установка УЭ-208. *Проблемы специальной электротехнологии*, **1**, 71–74.
10. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. (2016) Особенности выплавки слитков титановых сплавов, легированных оловом, в электронно-лучевых установках. *Современная электротехнология*, **3**, 21–25.
11. Северин А.Ю., Тригуб Н.П., Жук Г.В. (2008) Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью жаропрочных титановых сплавов, упрочненных силицидами. *Там же*, **1**, 14–15.

References

1. Solonina, O.P., Glazunov, S.G. (1976) *Heat-resistant titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Antashov, V.G., Nochovnaya, N.A., Ivanov, V.I. (2002) Tendency of development of heat-resistant titanium alloys for aircraft engine building. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **4**, 72–76 [in Russian].
3. Piin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S., (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-Mati [in Russian].
4. Firstov, S.O. (2004) New generation of materials based on titanium. In: *Mechanics of material fracture and strength of*

- structures*. Ed. by V.V. Panasyuk. Lviv, PMI, 609–616 [in Russian].
5. Kuzmenko, M.M. (2008) Structure and mechanical properties of cast Ti–Si alloys. *Mater. Sci.*, **44**(1), 49–53.
6. Firstov, S.A., Tkachenko, S.V., Kuzmenko, N.N. (2009) Titanium «cast iron» and titanium «steels». *MiTom*, **1**, 14–20 [in Russian].
7. (2000) *State diagrams of binary metal system*: Refer. Book. Ed. by N.P. Lyakishev. Vol. 3, Book 2. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
9. Tikhonovsky, A.L., Tur, A.A., Kravets, A.N. et al. (1992) Electron beam installation UE-208. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 71–74 [in Russian].
10. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A. (2016) Peculiarities of melting of ingots of titanium alloys, alloyed with tin, in electron beam installation. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **3**, 21–25 [in Russian].
11. Severin, A.Yu., Trigub, N.P., Zhuk, G.V. (2008) Electron beam cold hearth remelting of high-temperature titanium alloys hardened by silicides. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 12–13.

ЭЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ВИПЛАВКА ЖАРОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ КОМПОЗИТИВ СИСТЕМИ Ti–Si–Al–Zr–Sn

С.В. Ахонін¹, С.О. Фірстов², А.Ю. Северин¹, М.М. Кузьменко², В.О. Березос¹, Л.Д. Кулак²

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

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3. E-mail: rapid@ipms.kiev.ua

Проведено комплексні дослідницькі роботи по отриманню способом електронно-променевої плавки зливків жароміцного сплаву титану системи Ti–Si–Al–Zr–Sn, які надалі були піддані гарячій пластичній деформації для отримання прутків-напівфабрикатів. Удосконалено схему шихтовки і визначено технологічні параметри електронно-променевої плавки зливків в модернізованій електронно-променевій установці UE-208M. Досліджено хімічний склад та структуру отриманих зливків титанових сплавів системи Ti–Si–Al–Zr–Sn та показано, що матеріал характеризується досить високою хімічною однорідністю. Проведено гарячу деформаційну обробку зливків електронно-променевої плавки та отримано якісні прутки-напівфабрикати жароміцного сплаву системи Ti–Si–Al–Zr–Sn. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: жароміцний титановий сплав; зливки; електронно-променева плавка; технологічні режими; хімічний склад; структура; деформаційна обробка

ELECTRON BEAM MELTING OF HEAT-RESISTANT TITANIUM COMPOSITES OF Ti–Si–Al–Zr–Sn SYSTEM

S.V. Akhonin¹, S.A. Firstov², A.Yu. Severin¹, N.N. Kuzmenko², V.A. Berezos¹, L.D. Kulak²

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

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

²I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine.

3 Krzhizhanovsky Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: rapid@ipms.kiev.ua

Integrated research works were carried out on producing ingots of heat-resistant titanium alloy of Ti–Si–Al–Zr–Sn system and subjecting to hot plastic deformation for manufacture of rods-semi-products. The scheme of charge calculation was improved and the technological parameters of electron beam melting of ingots in a modernized electron beam installation UE-208M were determined. Chemical composition and structure of produced ingots of titanium alloys of the Ti–Si–Al–Zr–Sn system were investigated and it was shown that the material is characterized by a rather high chemical homogeneity. Hot deformational treatment of ingots of the electron beam melting was performed and the quality rods-semi-products of heat-resistant alloy of Ti–Si–Al–Zr–Sn system were produced. Ref. 11, Tabl. 1, Fig. 4.

Key words: heat-resistant titanium alloy; ingot; electron beam melting; technological modes; chemical composition; structure; deformational treatment

Поступила в редакцію 15.01.2019