

УДК 669.295

*Н.А. Ночовная¹, А.А. Ширяев¹, Д.А. Дзунович¹, П.В. Панин¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КРУПНОГАБАРИТНОГО ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО СЛИТКА ИЗ НОВОГО ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ПСЕВДО- β -ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT47**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-6-6

Исследован химический состав крупногабаритного опытно-промышленного слитка массой 1,5 тонны из высоколегированного высокопрочного псевдо- β -титанового сплава VT47, изготовленного по технологии тройного вакуумно-дугового переплава в условиях ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

Проведен сравнительный анализ результатов исследований лабораторных слитков массой 30 кг, изготовленных в опытном производстве ФГУП «ВИАМ», и крупногабаритного слитка с целью оценки влияния размерного фактора на характеристики качества слитков из сплава VT47.

На основе анализа предложены возможные пути дальнейшего повышения металлургического качества крупногабаритных промышленных слитков из сплава VT47.

Ключевые слова: *псевдо- β -титановые сплавы, сплав VT47, слитки крупногабаритные, промышленное производство, химический состав, вакуумно-дуговая плавка.*

*N.A. Nochovnaya¹, A.A. Shiryaev¹, D.A. Dzunovich¹, P.V. Panin¹***STUDY OF CHEMICAL COMPOSITION OF LARGE-DIMENSIONED EXPERIMENTAL-INDUSTRIAL INGOT FROM A NEW HIGH-ALLOYED METASTABLE β -TITANIUM ALLOY VT47**

Chemical composition studies have been carried out for a large-dimensioned experimental-industrial 1,5 tons ingot from high-alloyed high-strength metastable β -titanium alloy VT47, the ingot having been obtained by threefold vacuum-arc remelting in PSC «VSMPO-AVISMA Corporation».

A comparative analysis has been completed for the results of 30 kg laboratory ingots investigation (obtained by VIAM experimental production) and those for the large-dimensioned ingot in order to evaluate the scale factor influence on quality characteristics of VT47 ingots.

The possible ways of further metallurgical quality increase have been proposed for large-dimensioned industrial ingots from VT47 alloy.

Keywords: *metastable β -titanium alloys, VT47 alloy, large-dimensioned ingots, industrial production, chemical composition, vacuum-arc melting.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Известно, что наибольший интерес среди высоколегированных титановых сплавов для практического применения в качестве высокопрочных конструкционных материалов представляют умеренно легированные псевдо- β -сплавы с термически нестабильной β -фазой [1, 2]. Сплавы данной группы могут быть существенно упрочнены путем проведения термической обработки до уровня прочностных характеристик, практически не уступающих аналогичным значениям многих высокопрочных ($\alpha+\beta$)-сплавов.

Благодаря высокой технологической пластичности в закаленном состоянии и способности к «самозакаливанию» при термической обработке в вакуумных печах псевдо- β -сплавы представляются одними из наиболее перспективных материалов для изготовления сложнопрофильных листовых штамповарных, паяных и гофрированных конструкций, а также высокопрочной проволоки.

Помимо вышеуказанных преимуществ для большинства псевдо- β -титановых сплавов характерны некоторые недостатки. В первую очередь к ним относится возможность образования ликвационных зон при выплавке слитков и, как следствие, формирование зон с химической и структурной неоднородностью при изготовлении деформированных полуфабрикатов.

В связи с этим исследования процессов кристаллизации слитка, плавления и распределения в нем исходных шихтовых компонентов, а также химического состава и градиентов концентраций основных легирующих элементов и примесей в слитках представляют большой практический интерес [3, 4]. Значительный интерес представляют также исследования по влиянию масштабного фактора (массогабаритных характеристик слитков) на ликвационные процессы.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 9.2. «Материалы на основе титана с регламентированной β -структурой» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5, 6].

Материалы и методы

Исследования проведены на крупногабаритном опытно-промышленном слитке из сплава VT47, легированного РЗМ (иттрием) [7], диаметром 770 мм и массой 1550 кг, полученном путем тройного вакуумно-дугового переплава в условиях промышленного производства ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА»¹ по технологии, серийно применяемой для выплавки сплавов типа Ti-10-2-3. Отличительная особенность данной технологии от традиционной заключается в существенном снижении силы тока дуги и дугового зазора при последнем переплаве, что позволяет снизить ликвацию легирующих элементов по слитку.

Для изготовления слитка из сплава VT47 (шихтовый состав, % (по массе): Ti-2,7Al-2Mo-10V-4Cr-1,2Fe-1,2Sn-1Zr-0,09O-0,08Y [8]) в качестве шихтовых материалов использовали: титан губчатый марки ТГ90, лигатуры Al-Sn, Al-Y, ВнАл-Ж (Д1); в чистом виде – хром, цирконий, железо и ванадий. Долегиrowание сплава кислородом для достижения заданных прочностных свойств осуществляли путем введения рутила.

Технологический процесс изготовления крупногабаритного слитка заключался в подготовке шихтовых материалов, прессовании расходуемого электрода диаметром 495 мм, последовательном проведении первого, второго и третьего переплавов в медные водоохлаждаемые кристаллизаторы диаметрами 590, 705 и 770 мм соответственно.

После выплавки от слитка отобрали образцы (верхний темплет и стружка по образующей) для проведения контрольного химического анализа и исследования распределения легирующих элементов по его сечению.

Исследования химического состава проводили атомно-эмиссионным методом и рентгенофлуоресцентным спектральным анализом.

¹ Выплавка крупногабаритного опытно-промышленного слитка осуществлена при технологическом сопровождении Н.Ю. Таренковой.

Результаты и обсуждение

Известно, что для многих высоколегированных титановых сплавов или сплавов, содержащих в своем составе элементы, склонные к ликвации (например, железо), существует проблема образования в процессе вакуумно-дуговой выплавки слитков дефектов литейного происхождения – в частности ликвационных неоднородностей [9].

В наибольшей степени склонны к ликвации эвтектоидообразующие β -стабилизаторы (Fe и в меньшей степени Cr). Уже при относительно небольших концентрациях Fe (как в сплаве Ti-10V-2Fe-3Al) проблема образования химических неоднородностей, обогащенных Fe и обедненных Al, в слитках является актуальной. Преимущественное легирование некоторыми легирующими элементами, относящимися к группе изоморфных β -стабилизаторов (Mo) или нейтральных упрочнителей (Zr), также может привести к формированию химических неоднородностей при выплавке слитков, в особенности крупногабаритных.

Влияние размерного фактора при изготовлении слитков в значительной степени оказывает влияние на уровень их качества, химической и структурной однородности. В частности, увеличение диаметра слитка и сопутствующее повышение силы тока плавления увеличивает степень как зональной, так и внутридendrитной ликвации даже на относительно малолегированных сплавах (типа BT3-1) [10]. Повышение степени легирования титановых сплавов в большинстве случаев приводит к усилению ликвационных явлений и повышению склонности к образованию химических и структурных неоднородностей в выплавленных слитках.

Вышеотмеченные дефекты могут приводить к существенному отличию физико-механических свойств различных зон полуфабрикатов при деформации, что в результате может привести к разнотекстурности как в макро-, так и в микромасштабе, т. е. в пределах отдельных зерен. Даже корректно выбранные режимы термомеханической и термической обработок не могут в полной мере уменьшить уровень макроликвации и обеспечить достаточно однородную структуру и механические свойства материала.

В связи с вышеизложенным вопросы выплавки высококачественных крупногабаритных слитков из высоколегированных сплавов в условиях промышленного производства занимают одно из первых мест в перечне актуальных проблем материаловедения титана и сплавов на его основе.

В рамках научно-исследовательской работы по разработке химического состава нового высокопрочного высокотехнологичного псевдо- β -титанового сплава, легированного РЗМ (иттрием), и технологий изготовления листов из него в ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» выплавлен опытно-промышленный слиток. Результаты контрольного анализа содержания основных легирующих элементов и примесей внедрения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты контроля химического состава крупногабаритного слитка из сплава BT47*

Химический состав	Содержание легирующих элементов, % (по массе)									Содержание примесей, % (по массе)				
	Ti	Al	Mo	V	Cr	Fe	Sn	Zr	Y	O	N	C	H	Σ прочих примесей
По ТУ	Основа	2,20–3,00	1,60–2,40	9,10–10,60	3,50–4,40	0,90–1,55	0,70–1,30	0,80–1,50	0,04–0,08	≤0,150	≤0,050	≤0,100	≤0,015	≤0,100
Расчетный	Основа	2,70	2,00	10,0	4,00	1,20	1,20	1,00	0,080	0,09	–	–	–	–
Фактический	Основа	2,62	2,11	9,78	3,85	1,10	1,25	1,00	0,046	0,10	0,007	–	–	–

* Сплав BT47 защищен патентом РФ.

Исходя из результатов химического анализа видно, что фактический химический состав по основным легирующим элементам и кислороду хорошо соответствует шихтовому (расчетному) составу и требованиям ТУ. Как показали более ранние исследования, проведенные на лабораторных плавках во ФГУП «ВИАМ», в процессе вакуумно-дугового переплава происходит испарение иттрия или его соединений из расплава жидкого металла, что в результате приводит к уменьшению фактического содержания иттрия в готовом слитке. Для опытно-промышленного слитка потеря иттрия по сравнению с расчетным составом составила 42,5% (отн.), т. е. $\sim 0,03\%$ (по массе), что превышает аналогичные показатели, полученные на лабораторных плавках (25–30% (отн.)). Такую закономерность можно объяснить увеличенной площадью ванны жидкого металла, большими зазорами между электродом и кристаллизатором, а также длительностью процесса плавления крупногабаритного слитка. Можно предположить, что такие высокие значения потерь по иттрию могут быть также обусловлены низкой температурой плавления алюминий-иттриевой лигатуры, которая применялась при шихтовке как лабораторных, так и опытно-промышленного слитков.

Таким образом, при шихтовке крупногабаритных слитков требуются еще большие, чем для лабораторных, корректировки по иттрию (в сторону увеличения содержания иттрия в расчетном составе). Возможно, что применение опытных иттрийсодержащих лигатур на основе титана с более высокой температурой плавления позволит снизить потери иттрия в процессе выплавки слитков.

В процессе отработки опытной технологии выплавки лабораторных слитков проведены всесторонние исследования распределения основных легирующих элементов сплава по сечению слитка. С целью проведения аналогичного исследования химического состава крупногабаритного слитка отобраны восемь проб в виде стружки по образующей слитка для исследования атомно-эмиссионным методом и шесть проб в виде цилиндрических образцов из верхнего темплета слитка вдоль радиального направления. Схема отбора проб представлена на рисунке.

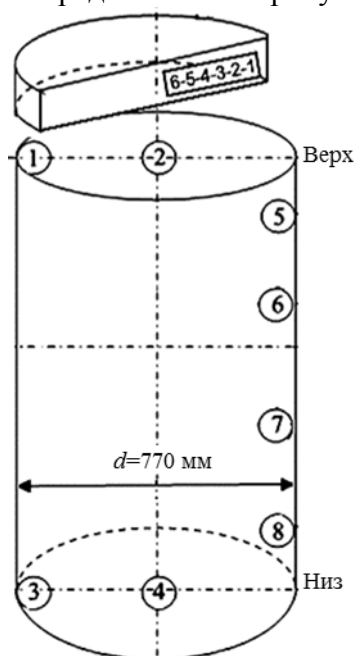


Схема отбора образцов для исследования химического состава крупногабаритного опытно-промышленного слитка из сплава ВТ47 (①–⑧ – места отбора образцов в виде стружки для атомно-эмиссионного анализа; 6–5–4–3–2–1 – место отбора образцов в виде цилиндров для рентгенофлуоресцентного анализа)

Результаты исследований химического состава опытно-промышленного слитка обработали методами статистического анализа с целью выявления характеристик однородности его химического состава и проведения сравнительной оценки с аналогичными характеристиками слитков, полученных в опытном производстве ФГУП «ВИАМ». Результаты статистической обработки данных, полученных при исследовании опытно-промышленного слитка, приведены в табл. 2 и 3. Для сравнения в табл. 4 приведены результаты исследования малогабаритного слитка, полученного во ФГУП «ВИАМ». Следует отметить, что в связи с оптимизацией химического состава сплава ВТ47 шихтовой (расчетный) состав лабораторной и опытно-промышленной плавки незначительно отличаются друг от друга. В опытно-промышленной плавке снижено содержание иттрия, увеличено количество алюминия и осуществлено долегирование кислородом до целевого значения 0,09% (по массе).

Таблица 2

Статистические характеристики значений химического состава опытно-промышленного слитка из сплава ВТ47, полученные атомно-эмиссионным методом анализа

Элемент	Статистические характеристики химического состава				
	Среднее значение содержания элемента, % (по массе)	Отклонение от шихтового состава, % (отн.)	Разброс значений		Стандартное отклонение
			% (по массе)	% (отн.)	
Al	2,58	-4,6	0,08	3,1	0,030
Mo	2,00	-0,2	0,13	6,5	0,048
V	9,45	-5,5	0,46	4,9	0,162
Cr	3,77	-5,9	0,23	6,1	0,094
Fe	1,10	-8,1	0,21	19,0	0,080
Sn	1,28	6,8	0,11	8,6	0,038
Zr	0,99	-0,7	0,21	21,2	0,072
Y	0,047	-41,4	0,022	46,9	0,007

Таблица 3

Статистические характеристики значений химического состава опытно-промышленного слитка из сплава ВТ47, полученные рентгенофлуоресцентным спектральным методом анализа

Элемент	Статистические характеристики химического состава				
	Среднее значение содержания элемента, % (по массе)	Отклонение от шихтового состава, % (отн.)	Разброс значений		Стандартное отклонение
			% (по массе)	% (отн.)	
Al	2,81	4,2	0,06	2,1	0,023
Mo	2,16	7,8	0,16	7,4	0,062
V	9,98	-0,2	0,21	2,1	0,082
Cr	3,98	-0,5	0,19	4,8	0,072
Fe	1,20	0	0,18	15,0	0,068
Sn	1,24	2,9	0,04	3,2	0,015
Zr	1,11	10,5	0,08	7,2	0,033
Y	0,059	-26,5	0,013	22,1	0,005

Как следует из данных табл. 2, средние значения фактического химического состава сплава по всем легирующим элементам (за исключением иттрия) хорошо соответствуют шихтовому составу. Значения разброса содержания алюминия, молибдена, ванадия, хрома и олова в слитке, выраженные в относительных величинах, не превышают 10% (отн.). Показатель 4,9% (отн.) для ванадия в натуральном выражении составляет 0,46% (по массе) и обусловлен в первую очередь его высоким содержанием в сплаве. По вышеуказанным элементам, в том числе ванадию, на лабораторных плавках получены аналогичные результаты. Разброс по цирконию и

железу по образующей крупногабаритного слитка в относительных величинах достаточно велик, однако фактический разброс в натуральном выражении не превышает ~0,2% (по массе), что с учетом малого содержания их в сплаве не должно оказывать негативного воздействия на однородность свойств конечных полуфабрикатов. Характеристики распределения иттрия по сечению слитка имеют свои отличительные особенности: максимальный разброс в натуральном выражении и значения стандартного отклонения практически полностью соответствуют результатам, полученным на лабораторных слитках. Однако в виду того, что фактическое содержание иттрия в опытно-промышленной плавке ниже, в относительных величинах разброс по его содержанию выше в 1,7 раза по сравнению с лабораторной плавкой.

Таблица 4

Статистические характеристики значений химического состава лабораторного слитка из сплава ВТ47, полученные рентгенофлуоресцентным спектральным методом анализа

Элемент	Статистические характеристики химического состава				
	Среднее значение содержания элемента, % (по массе)	Отклонение от шихтового состава, % (отн.)	Разброс значений		Стандартное отклонение
			% (по массе)	% (отн.)	
Al	2,46	-1,6	0,18	7,3	0,073
Mo	2,08	3,8	0,18	8,7	0,070
V	9,70	-3,0	0,46	4,7	0,184
Cr	4,16	4,0	0,28	6,7	0,106
Fe	1,23	2,3	0,08	6,5	0,026
Sn	1,24	3,1	0,10	8,1	0,043
Zr	1,12	11,7	0,04	3,6	0,015
Y	0,071	-28,6	0,020	28,0	0,007

Исследования распределения содержания легирующих элементов в радиальном направлении верхнего темплета опытно-промышленного слитка, проведенные спектральным методом анализа, подтвердили полученные атомно-эмиссионным методом анализа результаты.

Для наглядного сравнения характеристик однородности распределения легирующих элементов по слитку для лабораторной и опытно-промышленной плавки использовали значения стандартного отклонения – меры того, насколько широко разбросаны точки данных относительно среднего значения (табл. 5).

Таблица 5

Сравнение статистических характеристик значений химического состава опытно-промышленного и лабораторного слитков из сплава ВТ47

Элемент	Стандартное отклонение		
	для лабораторного слитка массой 30 кг (опытная технология)	для опытно-промышленного слитка массой 1550 кг	
	полученное методом химического анализа		
	спектральным (по образующей)	атомно-эмиссионным (по образующей)	спектральным (по радиусу темплета)
Al	0,073	0,030	0,023
Mo	0,070	0,048	0,062
V	0,184	0,162	0,082
Cr	0,106	0,094	0,072
Fe	0,026	0,080	0,068
Sn	0,043	0,038	0,015
Zr	0,015	0,072	0,033
Y	0,007	0,007	0,005

Сравнительный анализ стандартных отклонений содержания легирующих элементов в слитках показал, что для опытно-промышленной плавки характерны лучшие, по сравнению с лабораторной, показатели однородности по алюминию. Однородность распределения молибдена, ванадия, хрома и олова практически одинакова для обеих плавов, а значения стандартных отклонений по железу и цирконию для опытно-промышленного слитка заметно больше, чем для лабораторного.

Для иттрия характерны идентичные значения стандартного отклонения в обеих плавках. В абсолютных значениях эти отклонения невелики, однако с учетом небольшого содержания иттрия в сплаве относительные колебания его содержания в различных зонах слитка оказываются существенными и могут влиять на физико-механические свойства готовых полуфабрикатов.

В настоящее время в научно-технической литературе практически не представлено детальной информации о влиянии иттрия и небольших изменений его концентрации на комплекс физико-механических и технологических свойств высоколегированных титановых сплавов. В открытой печати также практически отсутствует информация по особенностям распределения иттрия и других редкоземельных элементов в слитках, полученных путем вакуумно-дугового переплава. В особенности не отражен опыт изготовления слитков большой массы и размеров из титановых сплавов, содержащих РЗМ.

Таким образом, для дальнейших исследований представляют повышенный интерес следующие аспекты:

- поиск путей усовершенствования и оптимизации технологии изготовления крупногабаритных слитков в промышленности;
- установление рационального содержания иттрия в сплаве ВТ47 посредством многофакторного технико-экономического анализа и проведение исследований влияния малых изменений его содержания на комплекс физико-механических и технологических характеристик;
- выбор оптимального метода введения иттрия в состав сплава при изготовлении слитков и разработка технологии прецизионного микролегирования.

Приведенные выше проблемные вопросы в настоящее время являются одними из наиболее актуальных, а их решение – наиболее важным для реализации возможности практического использования в промышленности титановых сплавов различных классов, содержащих в своем составе микродобавки РЗМ.

В связи с тем, что возможности по дальнейшему улучшению свойств традиционных высокопрочных сплавов практически исчерпаны, применение новых титановых сплавов, легированных РЗМ, позволит и в дальнейшем повышать эксплуатационные свойства изделий. Как показано рядом исследований, введение микродобавок РЗМ в различные титановые сплавы позволяет повысить предел прочности и жаростойкость при повышенных температурах [11, 12], пластичность в термически упрочненном состоянии, в особенности после перегревов при высокой температуре, улучшить однородность макро- и микроструктуры [13, 14] и дисперсность вторичных выделений α -фазы [15], снизить скорость роста β -зерна во время высокотемпературных выдержек в β -области [16]. В научно-технической литературе упоминается еще один немаловажный положительный эффект от введения РЗМ – снижение уровня кислорода в сплаве посредством образования частиц оксидов и, как результат, пластифицирование матрицы сплава.

Заключения

Проведенные исследования химического состава крупногабаритного опытно-промышленного слитка из сплава ВТ47 показали, что алюминий, молибден, хром и олово равномерно распределены по его сечению. Для ванадия, железа и циркония характерны

более низкие показатели однородности, при этом иттрий с учетом его малого содержания в сплаве имеет удовлетворительные показатели однородности распределения.

Сравнительный анализ результатов исследований лабораторных слитков массой 30 кг и крупногабаритного слитка массой 1550 кг показал, что в промышленном производстве испарение иттрия в процессе выплавки выражено в большей степени, что также требует корректировки расчетного (шихтового) состава.

В связи с выявленными закономерностями для улучшения металлургического качества крупногабаритных слитков из сплава ВТ47 целесообразно оптимизировать технологию выплавки в условиях промышленного производства и выбрать оптимальный метод введения иттрия в состав сплава – в частности использовать лигатуру, более близкую по свойствам к титану.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boyer R.R., Briggs R.D. The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2005. Vol. 14 (6). P. 681–685.
2. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // *МиТОМ*. 1998. №12. С. 11–14.
3. Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Исследование структуры и химического состава слитков опытного высоколегированного титанового сплава // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-6-6.
4. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
5. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 3–10.
8. Высокопрочный сплав на основе титана и изделие, выполненное из высокопрочного сплава на основе титана: пат. 2569285 Рос. Федерация. №2014153690/02; заявл. 29.12.14; опубл. 20.11.15, Бюл. №32.
9. Zhijun Yang, Hongchao Kou, Fengshou Zhang, Xiangyi Xue, Jinshan Li, Lian Zhou. The Effect of VAR Process Parameters on Beta Flecks Formation in Ti–10V–2Fe–3Al // *Proceedings of the 12th World Conference on «Titanium Ti-2011 Science and Technology»*. Beijing, 2012. Vol. 1. P. 601–604.
10. Андреев А.Л., Аношкин Н.Ф. и др. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов. М.: Металлургия, 1978. 384 с.
11. Савицкий Е.М., Ливанов В.А., Нусс П.А. и др. Сплавы титана с редкоземельными металлами // *Титан в промышленности*. М.: Оборонгиз, 1961. С. 85–89.
12. Khorev A.I. Alloying titanium alloys with rare-earth metals // *Russian Engineering Research*. 2011. Vol. 31. No. 11. P. 1087–1094.
13. Yu-Yong Chen, Yu-Feng Si, Fan-Tao Kong et al. Effects of yttrium on microstructures and properties of Ti–17Al–27Nb alloy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2006. Vol. 16. No. 2. P. 316–320.
14. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н., Мовенко Д.А. Эффективность применения редкоземельных металлов для легирования присадочных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №3 (48). С. 14–19. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-14-19.
15. Хорев А.И., Мухина Л.Г., Жегина И.П. Влияние редкоземельных элементов на свойства титановых сплавов // *Легирование и термическая обработка титановых сплавов*. М.: ВИАМ, 1977. С. 106–113.
16. Kyosuke Ueda, Shinichiro Nakaoka, Takayuki Narushima. β -Grain Refinement of $\alpha+\beta$ -Type Ti–4,5Al–6Nb–2Fe–2Mo Alloy by Using Rare-Earth-Oxide Precipitates // *Materials Transactions*. 2013. Vol. 54 (2). P. 161–168.