

ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ СЛИТКОВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОЛОВОМ, В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ УСТАНОВКАХ

С. В. Ахонин¹, А. Ю. Северин¹, В. А. Березос¹,
А. Н. Пикулин¹, А. Г. Ерохин²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
03680, Киев-150, ул. Казимира Малевлича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.
03028, г. Киев, ул. Ракетная, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Изучено влияние технологических параметров ЭЛП на содержание легирующих элементов, в частности олова, в слитках титановых сплавов VT5-1, VT25Y и Ti-6242S. Для предотвращения потерь легколетучих и легкоплавких легирующих элементов разработана новая схема подготовки шихтовых материалов и определены оптимальные технологические режимы ведения электронно-лучевой плавки слитков сплавов VT5-1, VT25Y и Ti-6242S. Проведена серия экспериментальных плавок слитков сплава VT25Y и Ti-6242S диаметром 110 мм. По результатам проведенных экспериментальных плавок определены особенности электронно-лучевой плавки деформируемого титанового сплава VT5-1, которые необходимо учитывать при подготовке и ведении плавки данного сплава. Выплавлена промышленная серия слитков сплава VT5-1 диаметром 400 мм и длиной до 2000 мм. Показано, что разработанная новая схема шихтовки может быть использована для получения слитков сплава VT5-1 с заданным химическим составом способом ЭЛП. Библиогр. 16, табл. 2, ил. 3.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; титановый сплав; легирующие элементы; олово; шихта; слиток

Основной проблемой при производстве сплавов методом электронно-лучевой плавки (ЭЛП) является испарение при ведении плавки в вакууме элементов с высокой упругостью пара [1–3]. К таким элементам, применяемым при производстве промышленных титановых сплавов, относятся в первую очередь алюминий и хром. Эту проблему удалось решить методом математического моделирования процессов испарения и рациональной подготовкой шихтовой заготовки путем добавления в шихту этих элементов в большем количестве, что позволило достаточно точно и равномерно определять химический состав конечного слитка [4–6]. Существует ряд промышленных сплавов, легированных таким легкоплавким элементом как олово (температура плавления 232 °С, температура кипения 2270 °С) [7]. Так, упругость пара олова при температуре 1700 °С составляет 386, алюминия — 642, хрома — 114 Па. Значение упругости пара олова находится между алюминием и хромом и поэтому для расчета испарения этого элемента за основу были взяты математические модели, построенные для алюминия и хрома [6].

Известно, что для улучшения свойств титановых сплавов наряду с алюминием в качестве легирующих элементов применяют цирконий и олово.

К элементам, стабилизирующим α -фазу титана, относятся алюминий, в меньшей степени олово и цирконий. При упрочнении титана α -стабилизаторами образуется твердый раствор с α -модификацией титана. Цирконий положительно влияет на свойства сплавов при повышенных 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 % (рис. 1) [7, 8]. При обычной температуре оно является довольно слабым упрочнителем, но существенно повышает жаропрочность сплавов. Поэтому олово добавляют к жаропрочным титановым сплавам обычно в количестве 1...6 %, а в отдельных случаях до 13 %. Олово повышает также технологическую пластичность двойных сплавов Ti–Al. Например широко известен листовой свариваемый α -сплав VT5-1, содержащий 5 % Al и 2,5 % Sn [9].

Цель данной работы — изучение влияния технологических параметров ЭЛП на содержание легирующих элементов, в частности олова, в слит-

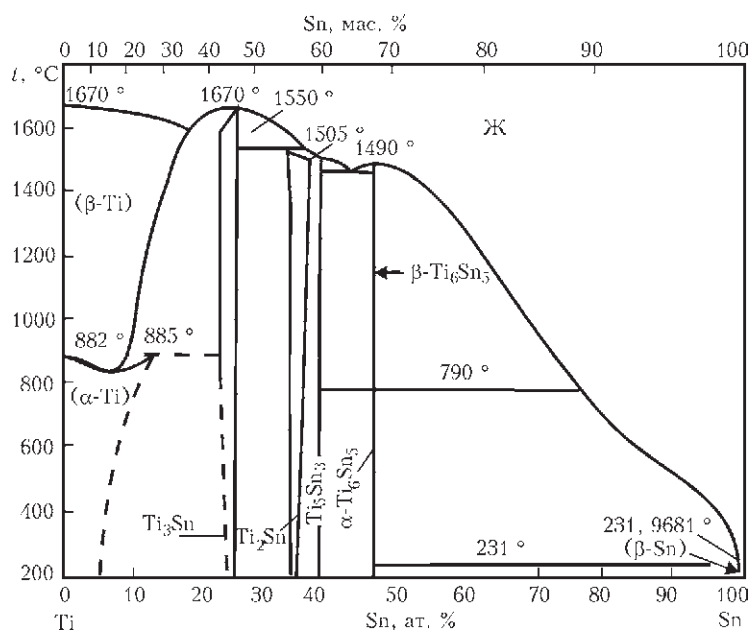


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Sn–Ti
 как титановых сплавов BT5-1, BT25Y и Ti-6242S,
 а также разработка новых схем шихтовки для
 обеспечения равномерного химического состава
 слитка и минимизации потерь легкоплавких леги-
 рующих элементов.

Технология получения слитков из титановых сплавов в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью включает следующие основные этапы: формирование расходомерной заготовки; процесс плавки; контроль качества выплавленных слитков.

Основной проблемой при выплавке слитков титановых сплавов, содержащих олово, является его низкая по отношению к другим компонентам сплава температура плавления — 232 °С. Это создает трудности при подготовке шихтовой заготовки с использованием элементов в чистом виде, поскольку при воздействии на сформированную заготовку электронно-лучевого нагрева, в первую очередь произойдет расплавление олова и его дальнейшее растекание по еще не расплавленным элементам шихты, что приводит к неравномерному химическому составу по длине слитка. Для отработки схем шихтовки и технологических режимов проведены серии опытно-промышленных плавки сплавов BT5-1, BT25Y и Ti-6242S [7].

Сплав BT5-1 (Ti–5Al–2,5Sn) относится к деформируемым титановым сплавам средней прочности с однофазной α-структурой. Алюминий и олово повышают его прочностные и жаропрочные свойства. Олово также повышает технологическую пластичность при обработке давлением. Сплав не упрочняется термической обработкой и хорошо сваривается. Применяется в деталях и

конструкциях авиационной техники, работающих при температурах 400...450 °С.

Сплав BT25Y (Ti–6,5Al–1,8Sn–3,8Zr–4Mo–1W–0,2Si) относится к деформируемым титановым сплавам высокой прочности с двухфазной (α+β)-структурой. Достаточно высокое содержание алюминия и нейтральных упрочнителей (олова и циркония), а также дополнительное легирование вольфрамом повышают его жаропрочные свойства (по прочности и жаропрочности в интервале температур 450...550 °С сплав превосходит все известные сплавы российских разработчиков), удовлетворительно деформируется в горячем состоянии, применяется в деталях газотурбинных двигателей (ГТД), работающих при температурах 500...550 °С.

Сплав Ti-6242S (Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo–0,08Si) — материал с повышенными жаропрочными характеристиками и относится к псевдо-α-сплавам. Алюминий, олово и цирконий вызывают твердорастворное упрочнение, а молибден стабилизирует некоторое количество β-фазы. Кремний повышает сопротивление ползучести. Его использование рекомендуется при температурах до 565 °С и применяется в деталях компрессора ГТД, листовых деталях двигателей и др.

С целью отработки технологических схем слитки сплавов BT25Y и Ti-6242S выплавливали в кристаллизаторе диаметром 110 мм на электронно-лучевой установке УЭ-208М [10]. В качестве исходных шихтовых материалов использовали технически чистый титан, алюминий, кремний, олово, вольфрам, а также электролитический хром, молибден и цирконий.

Для предотвращения растекания олова, уменьшения его испарения и обеспечения гарантированного равномерного химического состава конечного слитка предложена новая схема шихтовки. На первой стадии подготовки шихты формируют шихтовую заготовку для многокомпонентных титановых сплавов по схемам, описанным в работах [6, 11]. Выплавливают слиток-заготовку, содержащий тугоплавкие элементы (Zr, Mo, W, Si) и в основе сплава — титан. К полученному слитку-заготовке аргонодуговой сваркой приваривают контейнеры в виде сот, изготовленные из листа титана марки BT1-0, которые заполняют гранулированным оловом в количестве, рассчитанном 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. 2, а). Затем к за-

готовке добавляли алюминий и хром с учетом их потерь на испарение. Для предотвращения интенсивного испарения элементов с высокой упругостью пара при воздействии на шихту электронным лучом, полученный «пакет» накрывали листами титана BT1-0 (рис. 2, б). После загрузки шихты установку вакуумировали до уровня остаточного давления в камере пушек — 10^{-2} , в камере плавки — 10^{-1} Па. Подготовленную шихту сначала сплавляли в промежуточную емкость до ее заполнения, а после металл периодически сливали в медный водоохлаждаемый кристаллизатор до полного сплавления шихты. Выплавку слитка осуществляли в соответствии с рассчитанными мощностями и конфигурацией нагрева его торца в кристаллизаторе.

Отличительной особенностью электронно-лучевых установок с промежуточной емкостью является то, что подача шихтовой заготовки осуществляется в горизонтальной плоскости, а развертки электронных лучей, работающих на резе заготовки, расположены перпендикулярно ее оси, благодаря чему торец заготовки обогревается по всей площади сечения [12, 13]. Поэтому более легкоплавкие материалы плавясь стекают по торцу заготовки и практически сразу взаимодействуют с основным металлом (рис. 2, в). Это способствует минимизации потерь легколетучих элементов сплава.

На производственных мощностях ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» проведены работы по выплавке партии слитков сплавов BT25Y и Ti-6242S диаметром 110 и длиной 800...1000 мм (рис. 2, г).

С целью оценки качества металла полученных слитков проводили исследования химического состава образцов, отобранных по длине слитка с верхней, средней и нижней частей. Распределение легирующих элементов по длине слитков титано-

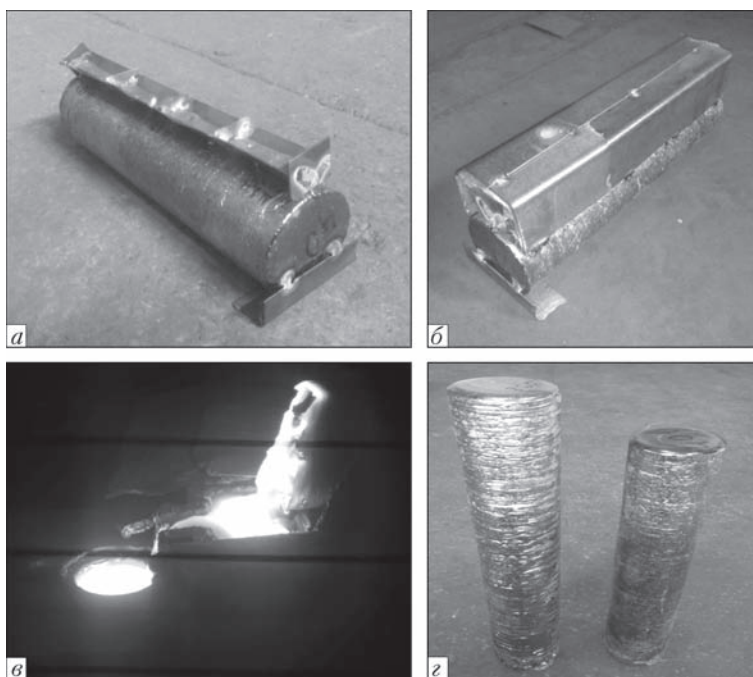


Рис. 2. Подготовленная шихта (а, б), процесс плавки (в) и полученные слитки ЭЛП (г) сплавов BT25Y и Ti-6242S

вых сплавов BT25Y и Ti-6242S ЭЛП представлены в табл. 1.

По отработанным схемам шихтовки и технологическим параметрам плавки для сплавов BT25Y и Ti-6242S получена промышленная партия слитков сплава BT5-1 диаметром 400 и длиной до 2000 мм. В отличие от схемы выплавки сплавов BT25Y и Ti-6242S слитки сплава BT5-1 получали путем однократного переплава, так как они не содержат в составе тугоплавких элементов. Схема шихтовки следующая: к слитку-заготовке титана марки BT1-0 аргонодуговой сваркой приваривали контейнеры в виде сот из пластин BT1-0, которые заполняли гранулированным оловом, взвешенным согласно схеме шихтовки и с учетом потерь на испарение. Для предотвращения рассыпания гранул олова в процессе плавки их сплавляли в монолитную заготовку с помощью газовой горелки. Затем к заготовке добавляли алюминий технической чистоты марки А7 в виде чушек с учетом потерь на испарение.

Т а б л и ц а 1. Содержание легирующих элементов титановых сплавов BT25Y и Ti-6242S после ЭЛП

Сплав	Место отбора пробы	Содержание легирующих элементов в слитке, мас. %					
		Al	Sn	Zr	Mo	W	Si
BT25Y	Верх	6,20	1,92	4,52	3,75	0,99	0,05
	Середина	6,25	1,97	4,77	3,55	1,02	0,05
	Низ	6,18	2,15	4,86	3,76	1,05	0,03
Ti-6242S	Верх	5,70	1,70	4,00	2,30	—	—
	Середина	6,20	1,90	3,70	2,20	—	—
	Низ	5,90	1,80	3,80	2,30	—	—

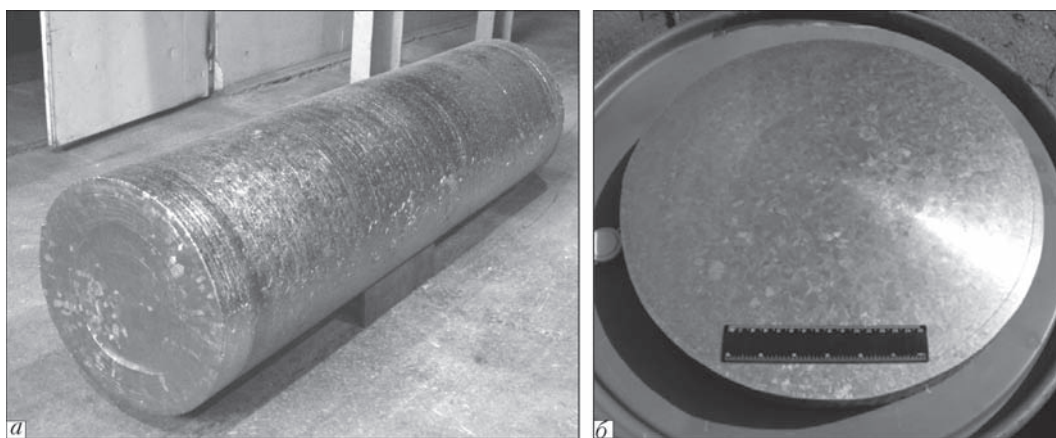


Рис. 3. Слиток ЭЛП сплава ВТ5-1 диаметром 400 мм (а), поперечный темплет (б)

Технологические режимы плавки следующие:
 скорость плавки, кг/ч 270
 время между заливкой порций, с 60
 высота одновременно заливаемых порций
 в кристаллизатор, мм 8
 мощность 1-й пушки (центральный нагрев), кВт 50
 мощность 2-й пушки (периферийный нагрев), кВт 70

Боковая поверхность выплавленных слитков после охлаждения в вакууме чистая, повышенная концентрация примесных элементов на поверхности в виде окисленного или альфирированного слоя отсутствует (рис. 3, а). Глубина поверхностных дефектов типа гофр составляет 2...3 мм, дефекты в виде разрывов, трещин или несплавлений отсутствуют.

С целью изучения распределения легирующих элементов в слитке сплава ВТ5-1 вырезали поперечный темплет толщиной 25 мм (рис. 3, б). На темплете в центре, у края и в середине радиуса отобрали стружку для проведения химического анализа, показывающего распределение элементов по сечению слитка. Результаты исследования химического состава слитков промышленного сплава ВТ5-1 выплавленных в ЭЛУ представлены в табл. 2. Исследование химического состава полученных слитков показало, что распределение легирующих элементов как по длине (пробы № 1–5), так и по поперечному сечению слитков

равномерное. Содержание всех элементов находится в пределах требований ГОСТ 19807–91 [9].

На поперечных темплатах изучена макро-структура слитка сплава ВТ5-1, вырезанного на расстоянии 150 мм от верха слитка. Выявление структуры проводили травлением темплетов в 10 %-ом растворе плавиковой кислоты с последующей промывкой в 90 %-ом водном растворе азотной кислоты [14]. Структура металла слитков титановых сплавов ВТ5-1 плотная, однородная, с отсутствием различно травящихся зон по сечению слитка (рис. 3, б). Существенной разницы в структуре центральной и периферийной зон слитка не наблюдается. Дефекты в виде пор, раковин, трещин и неметаллических включений не обнаружены. Характерная для слитков ВДП сегрегация легирующих элементов также отсутствует [15, 16]. Кристаллическое строение металла одинаковое по всей длине слитков и характеризуется кристаллами по форме близкими к равноосным.

Для исследования наличия в полученных слитках внутренних дефектов в виде неметаллических включений, пор и несплошностей использовали метод ультразвуковой дефектоскопии. Исследования проводили при помощи прибора УД-11УА эхо-импульсным методом при контактном варианте контроля. Рабочая частота анализа составила 2,5 и 5 МГц, что обеспечило максимальное соотношение сигнал/шум. В слитках не выявлено несплошностей, усадочных раковин, пористости, единичных отражений, которые можно интерпретировать как крупные неметаллические включения.

Таким образом, по результатам проведенных плавок установлено, что для обеспечения заданного химического состава слитка сплава ВТ5-1 диаметром 400 мм оптимальная скорость плавки должна составлять 270 кг/ч при мощности электронно-лучевого нагрева в кристаллизаторе — 120, в промежуточной емкости и заготовке — 450 кВт. Анализ химического состава полу-

Таблица 2. Распределение легирующих элементов по слитку ЭЛП титанового сплава ВТ5-1, мас. %

Место отбора пробы	Ti	Al	Sn
1	Основа	4,8	2,2
2		5,0	2,3
3		5,4	2,4
4		5,3	2,5
5		5,1	2,5
Центр темплета		5,3	2,6
Середина радиуса темплета		5,3	2,6
Край темплета		5,2	2,6

ченных слитков показал, что предложенная схема подготовки шихтовых материалов обеспечивает получение качественных, химически однородных слитков.

Выводы

1. Установлено, что основным фактором, влияющим на концентрацию алюминия и олова в слитке при неизменных технологических параметрах плавки, является их исходное содержание в расходуемой заготовке. Это необходимо учитывать при расчете шихтовой заготовки.

2. Показано, что благодаря использованию новой схемы подготовки шихтовых материалов при электронно-лучевой плавке слитков титановых сплавов не происходит неконтролируемого растекания легкоплавкого легирующего элемента — олова.

3. Показано, что основное взаимодействие легкоплавких и легколетучих элементов сплавов с другими их компонентами происходит на сплавляемом торце расходуемой заготовки, что обеспечивает менее интенсивное их испарение и в итоге — получение равномерного химического состава конечного слитка.

4. Определено, что для получения качественного слитка сплава VT5-1 диаметром 400 мм необходимо обеспечить скорость плавки 270 кг/ч при мощности электронно-лучевого нагрева в кристаллизаторе — 120, а в промежуточной емкости и заготовке — 450 кВт.

1. *Электронно-лучевая плавка* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин [и др.]. — К.: Наукова думка, 1997. — 265 с.
2. *Развитие технологии электронно-лучевой плавки титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. — 2000. — № 2. — С. 34–40.
3. *Электронно-лучевая плавка титана* / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин [и др.]. — К.: — Наукова думка, 2006. — 246 с.

4. *Испарение алюминия из сплавов на основе титана в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью* / И. Ю. Варич, С. В. Ахонин, Н. П. Тригуб [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1997. — № 4. — С. 15–21.
5. *Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron-beam cold-hearth melting of Ti–6Al–4V ingots* / S. V. Akhoni, N. P. Trigub, V. N. Zamkov [et al.] // Metallurgy and Materials Transactions. — 2003. — Vol. 34B, August. — P. 447–454.
6. *Математическое моделирование процессов испарения при выплавке слитков многокомпонентных титановых сплавов в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью* / С. В. Ахонин, А. Ю. Северин, В. А. Березос [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2013. — № 4. — С. 34–39.
7. *Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства* / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Польшкин. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.
8. *Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник*; под ред. Н. П. Лякишева. Т. 3. Кн. 2. — М.: Машиностроение, 2000. — С. 331–332.
9. *Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки*: ГОСТ 19807–91.
10. *Электронно-лучевая установка УЭ-208* / А. Л. Тихоновский, А. А. Тур, А. Н. Кравец [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1992. — № 1. — С. 71–74.
11. *Пат. № 80217 Україна, Спосіб одержання зливків сплавів на основі титану* / М. П. Тригуб, Г. В. Жук, В. В. Телін [та ін.]; заявник і патентовласник Інститут електрозварювання ім. С. О. Пато́на НАН України; заявл. 07.04.2006; опубл. 27.08.2007 р.; бюл. № 13.
12. *Рафинирование титана в электронно-лучевых печах с промежуточной емкостью* / Н. П. Тригуб, А. Я. Дереча, А. Н. Калинин [и др.] // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1998. — № 2. — С. 16–20.
13. *Электронно-лучевая плавка недробленых блоков губчатого титана* / Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2006. — № 4. — С. 6–9.
14. *Мальцев М. В. Металлография цветных металлов и сплавов* / М. В. Мальцев, Т. А. Барсукова, Ф. А. Борин. — М.: Металлургиздат, 1960. — С. 276.
15. *Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме* / В. А. Бояршинов [и др.]. — М.: Металлургия, 1979. — 304 с.
16. *Слитки титановых сплавов* / В. И. Добаткин, Н. Ф. Аношкин, А. Л. Андреев [и др.]. — М.: Металлургия, 1966. — 287 с.

The effect of EBM technological parameters on the content of alloying elements, in particular tin, in ingots of titanium alloys VT5-1, VT25U and Ti-6242S was studied. To prevent the losses of easily-volatile and easily-fusible alloying elements, the new scheme of preparation of charge materials was developed and optimum technological modes of electron beam melting of ingots of alloys VT5-1, VT25U and Ti-6242S were determined. A series of experimental meltings of ingots of alloy VT25U and Ti-6242S was carried out. From the results of the carried out experimental meltings the peculiar features of electron beam melting of deformed titanium alloy VT5-1 were defined, which can be taken into account in preparation and melting of this alloy. Industrial series of ingots of alloy VT5-1 of 400 mm diameter and up to 2000 mm length was melted out. It is shown that the developed new scheme of charge preparation can be used for producing ingots of alloy VT5-1 with preset chemical composition by using the EBM method. Ref. 16, Tables 2, Figures 3.

Key words: electron beam melting; titanium alloy; alloying elements; tin; charge; ingot

Поступила 30.06.2016