

## ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22 СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

С. В. Ахонин<sup>1</sup>, В. А. Березос<sup>1</sup>, А. Н. Пикулин<sup>1</sup>,  
А. Ю. Северин<sup>1</sup>, С. Л. Шваб<sup>1</sup>, А. Г. Ерохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

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

Проведены комплексные работы по исследованию возможности получения слитков высокопрочного сложнолегированного титанового сплава VT22 из первичной шихты. По технологии электронно-лучевого переплава с промежуточной емкостью и порционной подачей металла в водоохлаждаемый кристаллизатор получены слитки диаметром 400 мм и длиной до 3 м, из которых изготовлены полуфабрикаты в виде пластин и горячепрессованных прутков диаметром 60 мм. Представлены результаты исследований структуры и механических свойств полуфабрикатов, изготовленных из слитков титанового сплава VT22. Установлено, что металл полученных слитков и полуфабрикатов соответствует требованиям стандартов как по химическому составу, так и по структуре и механическим свойствам. При этом материал характеризуется хорошей пластичностью при высоких прочностных характеристиках. Показано, что электронно-лучевая технология является эффективным способом получения сложнолегированных сплавов титана. Библиогр. 12, табл. 4, ил. 11.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая плавка; высокопрочный титановый сплав; слиток; химический состав; структура; деформация; механические свойства

Важнейшими элементами конструкций авиационной и космической техники являются детали и узлы, изготовленные из высокопрочных титановых сплавов [1]. По уровню прочности титановые сплавы принято разделять на: малопрочные (временное сопротивление разрыву менее 650 МПа); средней прочности (от 700 до 1000 МПа) и высокопрочные (более 1000 МПа). Сплав VT22 относится к высокопрочным титановым сплавам.

Сплав VT22 является двухфазным ( $\alpha + \beta$ )-сплавом, близким по составу к критическому. Высокопрочный сплав VT22 эффективно упрочняется с помощью термической обработки и обладает высокими эксплуатационными свойствами, позволяющими применять его в силовых конструкциях планера и шасси самолета. Из него могут быть изготовлены тяжело нагруженные силовые элементы, такие как подкосы и цилиндры шасси, кронштейны системы управления, детали механизации крыла [2].

К деталям тяжело нагруженных силовых элементов предъявляются высокие требования, которые постоянно совершенствуются и ужесточаются. Это в первую очередь относится к качеству используемых материалов [3]. Поэтому с целью широкого применения титановых сплавов в различных конструкциях необходимо не только создавать новые материалы на основе титана с более

высокими эксплуатационными характеристиками, но и в дальнейшем совершенствовать производство титановых полуфабрикатов. Любые несовершенства химической и структурной однородности в титановых сплавах приводят к снижению прочности и долговечности изделий. Получение титановых сплавов связано с трудностями, обусловленными высокой чувствительностью титана к примесям внедрения, особенно к кислороду, азоту, водороду, углероду и взаимодействием со многими химическими элементами, в результате чего образуются твердые растворы или химические соединения. Кроме того, одним из основных структурных несовершенств титановых сплавов является наличие неметаллических включений. Высокая активность титана приводит к протеканию физико-химических процессов взаимодействия с газами даже в твердом состоянии. Поэтому неметаллические включения, в частности, нитриды и оксиды, могут образовываться как в процессе выплавки слитков, так и на различных этапах технологического передела в готовую продукцию. Неметаллические включения могут быть внесены шихтовыми материалами в процессе плавки, а также сформированы во время термической обработки готового изделия. Титан активно взаимодействует не только с газами, но и с другими элементами, в том числе с легирующими

компонентами сплавов, поэтому локальное обогащение отдельных объемов слитков легирующими элементами может приводить к образованию интерметаллических включений, например,  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $TiCr$  и других [4].

В настоящее время не все способы производства слитков титановых сплавов позволяют получить качественный металл, а при нарушении технологического процесса производства сплавов титана в слитках обнаруживаются дефекты, которые снижают качество металла. Таким образом, решение проблемы получения качественных слитков высокопрочных титановых сплавов из различных шихтовых материалов весьма актуально.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) — наиболее эффективный способ вакуумной металлургии для получения сплавов, в том числе тугоплавких и высокореакционных, со сверхнизким содержанием газов, летучих примесей и неметаллических включений. При ЭЛП возможно в широких пределах регулирование скорости плавки, благодаря независимому источнику нагрева, что, в свою очередь, позволяет регулировать продолжительность пребывания металла в жидком состоянии. ЭЛП является технологией, позволяющей практически полностью обеспечить удаление тугоплавких включений высокой и низкой плотности [5]. Таким образом, ЭЛП позволяет значительно повысить качество слитков из титановых сплавов [6–8].

Большинство высокопрочных титановых сплавов содержат в составе высокое количество легирующих элементов, что несколько усложняет их производство способом электронно-лучевой плавки. При выплавке слитков высокопрочных титановых сплавов способом ЭЛП возникает проблема обеспечения заданного химического состава слитка, так как плавка в относительно глубоком вакууме способствует избирательному испарению легирующих элементов с высокой упругостью пара [9]. В данном случае к таким элементам относятся алюминий и хром. Концентрация в слитке элементов с упругостью пара ниже упругости пара титана, в данном случае  $Mo$ ,  $V$  и  $Zr$ , может даже несколько повышаться.

С целью совершенствования технологии производства слитков сложнолегированных сплавов титана в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведены работы по выплавке партии слитков сплава VT22. Получены слитки круглого сечения диаметром 400 мм и длиной до 3 м. Слитки получали по технологии ЭЛП с промежуточной емкостью и порционной подачей жидкого металла в водоохлаждаемый кристаллизатор (рис. 1).

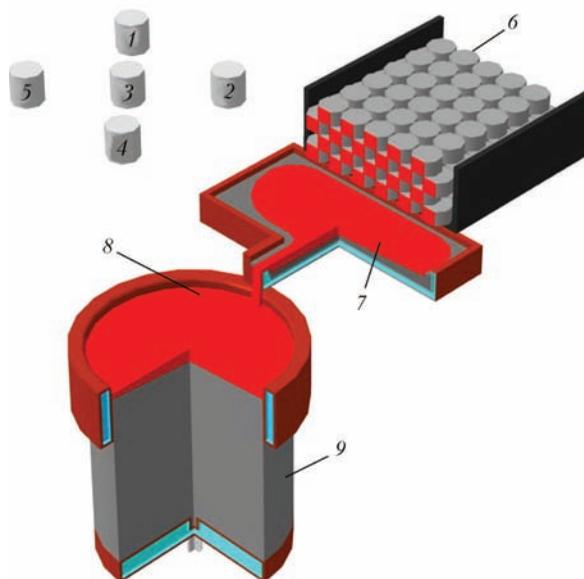


Рис. 1. Схема электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью: 1–5 — электронно-лучевые пушки; 6 — расходомерная заготовка; 7 — промежуточная емкость; 8 — кристаллизатор; 9 — выплавляемый слиток

На основе ранее проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины фундаментальных исследований процессов испарения компонентов сплавов из расплава в вакууме [5] проводили расчеты прогнозируемого химического состава выплавляемых слитков, по результатам которых осуществляли корректировку составляющих шихтовой заготовки. Легирующие компоненты с высокой упругостью пара ( $Al$ ,  $Cr$ ) шихтовали с учетом компенсации потерь на испарение.

Шихтовую заготовку для выплавки слитков формировали в нерасходуемый короб. Заготовка представляла собой плотно уложенные брикеты титановой губки ТГ-120 с легирующими компонентами.

Технология получения слитков высокопрочного сплава титана VT22 в электронно-лучевой установке включала в себя следующие этапы: формирование расходомерной заготовки; подготов-



Рис. 2. Внешний вид электронно-лучевой установки УЭ5812



Рис. 3. Процесс электронно-лучевой плавки слитка диаметром 400 мм из первичной шихты

ку оборудования и технологической оснастки к плавке; процесс плавки; контроль качества выплавленного слитка.

Для проведения опытных плавки использовали электронно-лучевую установку УЭ5812 (рис. 2, 3).

В процессе плавки контролировали следующие технологические параметры: ускоряющее напряжение электронно-лучевых пушек, токи лучей, скорости подачи исходной шихты в зону плавки и вытяжения слитка из кристаллизатора, температуру охлаждающей воды. При этом производительность процесса составляла 270 кг/ч, суммарная мощность электронно-лучевого нагрева примерно 600 кВт.

Боковая поверхность выплавленных слитков после охлаждения в вакууме до температуры ниже 300 °С чистая, повышенная концентрация примесных элементов на поверхности в виде окисленного или альфированного слоя отсутствует. Глубина поверхностных дефектов типа «гофр» составляет 2...3 мм, дефекты в виде разрывов, трещин или несплавлений отсутствуют.

Для оценки качества металла полученных слитков проводили исследование химического состава образцов, отобранных по длине слитка в верхней, средней и нижней частях. Результаты анализа химического состава металла полученных слитков показали, что распределение легирующих элемен-



Рис. 4. Внешний вид оплавленного слитка из титанового сплава VT22

тов по их длине равномерное и соответствует марочному составу (табл. 1).

Ввиду отсутствия окисленного или альфированного слоя дефекты типа «гофр» были удалены путем электронно-лучевого оплавления боковой поверхности слитка [10] (рис. 4).

Макроструктуру слитков изучали на поперечных темплетах, вырезанных из середины слитков. Выявление структуры проводили травлением темплетов в 15%-ном растворе фтористой кислоты с добавлением 3%-ной азотной кислоты при комнатной температуре.

Структура металла слитка плотная, однородная, с отсутствием различно травящихся зон по сечению слитка (рис. 5). Существенной разницы в структуре центральной зоны слитка и периферийной не наблюдается. Дефекты в виде пор, раковин, трещин и неметаллических включений не обнаружены. Характерной для слитков ВДП сегрегации легирующих элементов [11] не обнаружено. Размер зерен соответствует 7–8 баллу по 10-ти балльной шкале макроструктур.

Для исследования наличия в титановых слитках внутренних дефектов в виде неметаллических включений, пор и несплошностей использовали метод ультразвуковой дефектоскопии. Исследования проводили с помощью ультразвукового дефектоскопа УД4-76 эхоимпульсным методом при контактном варианте контроля. Рабочая частота анализа составляла 1,25 МГц, что обеспечивало максимальное соотношение сигнал/шум.

При исследовании слитков наблюдались множественные отражения малой амплитуды, что типично для литого металла и является результатом отражения сигнала от границ зерен (дендритов).

Таблица 1. Распределение легирующих элементов по длине слитка титанового сплава VT22, мас. %

Сплав	Место отбора проб	Al	Mo	V	Fe	Cr	Zr	O	N
VT22	Верх	5,1	4,2	4,9	0,90	1,3	0,01	0,11	0,012
	Середина	5,2	4,5	4,7	1,0	1,3	0,01	–	–
	Низ	5,0	4,1	5,0	1,0	1,4	0,01	–	–
	ГОСТ 19807–91	4,4...5,7	4,0...5,5	4,0...5,5	0,5...1,5	0,5...1,5	<0,3	<0,18	<0,05

Ни в одном из слитков не выявлено несплошностей, усадочных раковин, пористости, а также единичных отражений, которые можно было бы интерпретировать как крупные неметаллические включения.

Прочность высокопрочных титановых сплавов определяется не только степенью легирования, но и структурой, которая формируется при последующих термомеханической и термической обработках. Однако с повышением прочности сплава, как правило, снижается его пластичность, что является существенным недостатком материала при изготовлении из него конструкций, работающих на знакопеременных и ударных нагрузках. Поэтому в последнее время все большее внимание уделяется оптимизации параметров деформирования слитков при изготовлении из них полуфабрикатов и режимам упрочняющей термической обработки.

Физико-химические и теплофизические особенности титана и сплавов на его основе требуют тщательного подхода к процессам их деформирования. Это обусловлено следующими факторами. Пониженная теплопроводность титановых сплавов приводит к температурным перепадам по сечению слитков и заготовок при их нагреве, возникновению значительных внутренних напряжений, а в отдельных случаях к образованию трещин. Это обуславливает необходимость ограничения скорости нагрева особенно слитков и заготовок больших размеров. При охлаждении заготовок также могут возникать значительные температурные перепады. Например, быстрое захлаживание концов заготовки, острых углов, тонких элементов сечений заготовок чрезвычайно затрудняет обеспечение равномерной деформации, приводит к образованию трещин и ряда других дефектов.

С целью дальнейшего изучения качества металла слитков сплавов титана, полученных способом ЭЛП, проведены комплексные исследовательские работы по изготовлению полуфабрикатов в виде листов. От механически обработанного слит-

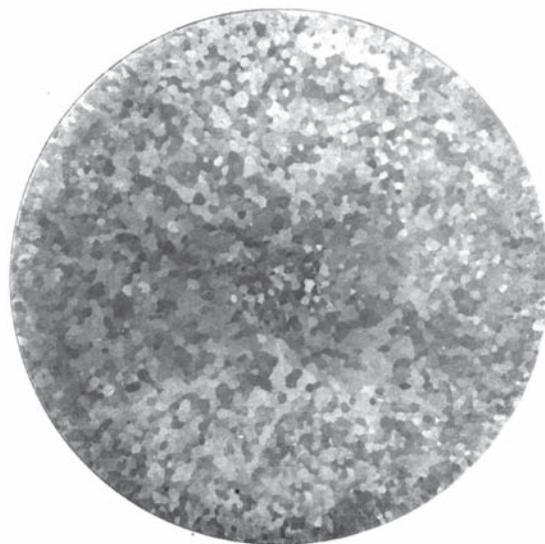


Рис. 5. Макроструктура слитка диаметром 400 мм титанового сплава BT22, полученного способом ЭЛП

ка отрезали исходные заготовки, которые подвергали горячей деформационной обработке в виде прокатки в продольном и поперечном направлениях на реверсивном прокатном ДУО-стане Skoda 355/500 (рис. 6).

Нагрев заготовок осуществляли в электропечи сопротивления без применения защитной атмосферы и защитных покрытий. Температура начала деформации составляла 1180 °С, конца — 850 °С. Были получены пластины шириной 350 мм, длиной 700 мм, толщиной 10 мм (рис. 7). На поверхности полученных пластин при визуальном осмотре трещины, расслоения, а также включения не обнаружены.

Микроструктуру пластин сплава BT22 после прокатки исследовали на микроскопе «Neophot-2». Микроструктура деформированного металла состояла из  $\beta$ -зерен с нерекристаллизованной пластинчатой  $\alpha$ -фазой в объеме зерна, сгруппированной в колонии (рис. 8). Толщина пластин  $\alpha$ -фазы составляла 0,7...2,0 мкм. В промежутках между  $\alpha$ -колониями и  $\alpha$ -пластинами располагалась  $\beta$ -фаза.



Рис. 6. Продольно-поперечная прокатка титанового сплава BT22

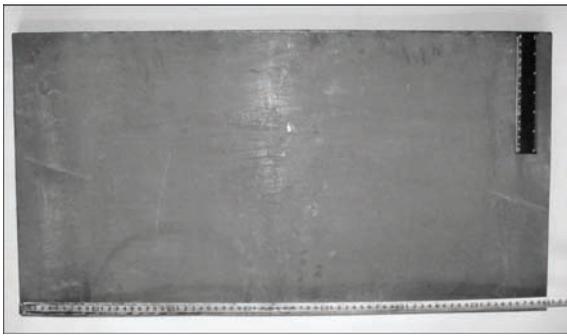


Рис. 7. Пластина размерами 50×700×10 мм из титанового сплава BT22

По границам β-зерен наблюдали α-оторочку. Большинство α-пластин имели волнистые границы, что может свидетельствовать о сложном внутреннем строении пластин. Сложное строение α-фазы вносит значительный вклад в увеличение прочности металла и предел прочности основного металла при этом составил 1230...1270 МПа (табл. 2). Механические свойства на растяжение определяли при нормальной температуре на цилиндрических образцах по ГОСТ 1497–84.

В дальнейшем полученные пластины подвергли отжигу по следующему режиму: нагрев до

750 °С, выдержка 1 ч с последующим охлаждением с печью [12].

Изучение микроструктуры отожженных пластин показало, что в структуре образца встречаются α-пластины с волнистыми и прямолинейными границами (рис. 9). Металл образца состоит из крупных первичных β-зерен с некristализованной внутризеренной структурой. На границах зерен присутствует α-оторочка шириной 1,5...2,5 мкм. Пластинчатая α-фаза в объеме зерна собрана в колонии, длина пластин составляет 10...30 мкм, ширина — около 1 мкм. В промежутках между α-пластинами располагается β-фаза. Границы некоторых пластин имеют извилистый характер, что может указывать на протекание процесса глобуляризации α-фазы.

Механические испытания показали некоторый разброс свойств по пределу прочности  $\sigma_b$  (табл. 3). Причиной этого может быть структурная неоднородность металла образцов после термомеханической обработки. Для получения наилучшего сочетания характеристик прочности для титанового сплава BT22 рекомендуется проводить более сложные режимы термической обработки. Так

Т а б л и ц а 2. Механические свойства сплава BT22 после деформационной обработки

Сплав	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
BT22	1228...1274	1182...1205	12	39	19...21

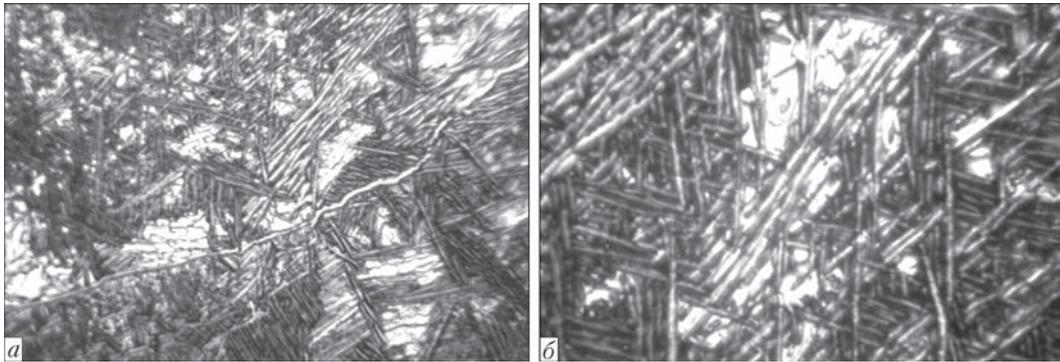


Рис. 8. Микроструктура сплава BT22 после деформационной обработки: а — ×500; б — ×1200

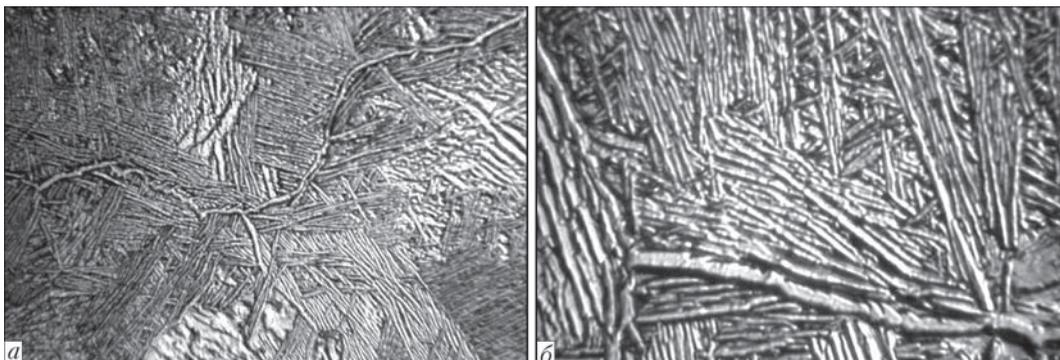


Рис. 9. Микроструктура отожженных пластин сплава титана BT22: а — ×500; б — ×1200

**Т а б л и ц а 3. Механические свойства сплава ВТ22 после отжига**

Сплав	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
ВТ22	1026...1088	967...981	15...17	25...30	22...25

как отожженные пластины в дальнейшем были использованы для исследования свариваемости сплава ВТ22, полученного способом ЭЛП, упрочняющую термическую обработку пластин не проводили.

Также были проведены работы по изготовлению горячепрессованных прутков диаметром 60 мм из слитка сплава ВТ22, выплавленного способом ЭЛП. Первоначально из слитка диаметром 400 мм титанового сплава ВТ22 на ковочном прессе были получены кованные заготовки диаметром 180 мм. Нагрев исходных заготовок осуществляли в печи, оснащенной газовыми горелками, до температуры 1020 °С. Перед началомковки проводили нагрев ковочного бойка до температуры 250...300 °С. Ковку на начальной стадии обработки слитков производили до степени деформации заготовки 20...30 %. Температура концаковки была не ниже 800 °С. В конце первого этапаковки полученную заготовку перерубывали на две равные части, после чего их помещали в печь с последующим нагревом до температуры 980 °С. После нагрева заготовку протягивали до диаметра приблизительно 180 мм с последующей правкой.

Далее заготовки подвергали прессованию в пруток диаметром 60 мм. Нагрев перед прессованием осуществляли в электропечи до температуры 1050...1100 °С в ( $\alpha + \beta$ )-области. От полученных прутков были отобраны пробы для определения макроструктуры. В макроструктуре металла полученных прутков трещин, расслоений, пустот, металлических и неметаллических включений не обнаружено (рис. 10). Величина макрозерна соответствовала 3-баллу согласно 10-балльной шкалы макроструктур по ГОСТ 26492–85.

Полученные прутки подвергали термической обработке (нагрев до температуры 850 °С с последующей выдержкой 1,5 ч; охлаждение с печью до 790 °С, выдержка 2 ч с последующим охлаждением на воздухе; старение при 600 °С, выдержка

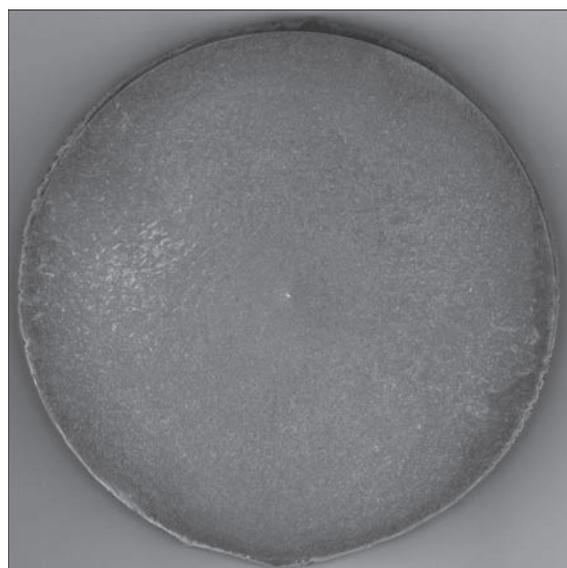


Рис. 10. Макроструктура прессованного прутка диаметром 60 мм



Рис. 11. Прессованные прутки диаметром 60 мм из титанового сплава ВТ22

4 ч с последующим охлаждением на воздухе), а затем механической до диаметра 60 мм и длиной 500...800 мм (рис. 11).

Механические свойства прессованных прутков определяли при 20 °С после проведенной термической обработки (табл. 4). Эти данные позволяют сделать вывод, что механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ22, полученного способом ЭЛП полностью соответствуют требованиям стандартов.

Таким образом, проведенные работы показывают, что электронно-лучевая плавка является эффективным способом получения качественных слитков из высокопрочного титанового сплава ВТ22, а качество полуфабрикатов соответствует

**Т а б л и ц а 4. Механические свойства полуфабрикатов из высокопрочного титанового сплава ВТ22, полученного способом ЭЛП**

Сплав	Вид заготовки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость HB
ВТ22	Прессованный пруток	1250	1200	10	35	40	320
	ОСТ 1 90266–86	>1200	–	>6	>14	>18	300...340

требованиям стандартов. При этом металл характеризуется повышенной пластичностью при высоких прочностных характеристиках.

**Список литературы**

1. Хореев А. И., Хореев М. А. (2005) Титановые сплавы, их применение и перспективы развития. *Материаловедение*, **7**, 25–34.
2. Антонок С. Л., Моляр А. Г., Калинюк А. Н. и др. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, **1**, 10–14.
3. Бычков А. С., Моляр А. Г. (2016) Эксплуатационная несущая способность деталей конструкций отечественных воздушных судов транспортной категории из титановых сплавов. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, **71**, 18–29.
4. Бабенко Е. П., Долженкова Е. В. (2014) Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава VT23. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **3**, 82–85.
5. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В., Жук Г. В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
6. Shambten C. E. (1995) Titanium alloy hearth melt «only» technology development. Titanium 95. Science and Technology. In: *Proc. of the 8-th World Conf. on Titanium* (Birmingham, UK, October 22–26, 1995), Vol. 2, 1438–1446.
7. Buttrill W. H., Shambten C. E. (1995) Hearth melt plus vacuumarc remelt: production status. *Ibid.*, pp. 1446–1454.
8. Poulsen E., Chitmis W., Made M. (1999) Status of titanium cold hearth melting. Titanium 99. Science and Technology. In: *Proc. of the 9-th World Conf. on Titanium* (Saint-Petersburg, Russia, June 7–11, 1999), Vol. 3, 1328–1335.
9. Ахонин С. В., Северин А. Ю., Березос В. А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава VT19 в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **2**, 23–27.
10. Ахонин С. В., Березос В. А., Пикулин А. Н. и др. (2014) Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков титана. *Там же*, **2**, 21–25.
11. Александров В. К., Аношкин Н. Ф., Бочвар Г. А. и др. (1979) *Полуфабрикаты из титановых сплавов*. Москва, Металлургия.

12. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.

**References**

1. Khoreev, A.I., Khoreev, M.A. (2005) Titanium alloys, their application and prospects of development. *Materialovedenie*, **7**, 25–34 [in Russian].
2. Antonyuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N. et al. (2003) Titanium alloys for aircraft industry of Ukraine. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 9–12.
3. Bychkov, A.S., Molyar, A.G. (2016) Service load-carrying capacity of parts of structures of national transport category aircrafts from titanium alloys. *Open Inform. i Komputer. Integr. Tekhnologii*, **71**, 18–29 [in Russian].
4. Babenko, E.P., Dolzhenkova, E.V. (2014) Investigation of fracture causes of large-sized part of VT23 alloy. *Metallurg. i Gornorudnaya Promyshl.*, **3**, 82–85 [in Russian].
5. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Shambten, C.E. (1995) Titanium alloy hearth melt «only» technology development. Titanium 95. Science and Technology. In: *Proc. of the 8-th World Conf. on Titanium* (Birmingham, UK, October 22–26, 1995), Vol. 2, 1438–1446.
7. Buttrill, W. H., Shambten, C. E. (1995) Hearth melt plus vacuumarc remelt: production status. *Ibid.*, 1446–1454.
8. Poulsen, E., Chitmis, W., Made, M. (1999) Status of titanium cold hearth melting. Titanium 99. Science and Technology. In: *Proc. of the 9-th World Conf. on Titanium* (Saint-Petersburg, Russia, June 7–11, 1999), Vol. 3, 1328–1335.
9. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A. et al. (2016) Peculiarities of melting of titanium alloy VT19 ingots in electron beam cold hearth installation. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 23–27 [in Russian].
10. Akhonin, S.V., Berezos, V.A., Pikulin, A.N. et al. (2014) Electron beam melting of surface of titanium alloy ingots. *Ibid.*, **2**, 21–25 [in Russian].
11. Aleksandrov, V.K., Anoshkin, N.F., Bochvar, G.A. et al. (1979) *Semiproducts of titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
12. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].

**ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО СПЛАВУ ТИТАНУ VT22 СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ**

**С. В. Ахонін<sup>1</sup>, В. О. Березос<sup>1</sup>, О. М. Пікулін<sup>1</sup>, А. Ю. Северин<sup>1</sup>, С. Л. Шваб<sup>1</sup>, О. Г. Єрохін<sup>2</sup>**

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

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України».

03028, м. Київ, вул. Ракетна, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Проведено комплексні роботи по дослідженню можливості отримання зливок складнолегованого титанового сплаву VT22 з первинної шихти. За технологією електронно-променевого переплаву з проміжною ємністю і порціонною подачею металу в водоохолоджуваний кристалізатор отримані зливки діаметром 400 мм і довжиною до 3 м, з яких виготовлені напівфабрикати у вигляді гарячепресованих прутків діаметром 60 мм. Представлено результати досліджень структури і механічних властивостей напівфабрикатів у вигляді гарячепресованих прутків, виготовлених із зливок титанового сплаву VT22. Показано, що метал отриманих зливок і напівфабрикатів відповідає вимогам стандартів. При цьому метал характеризується підвищеною пластичністю при високих значеннях міцності. Показано, що електронно-променева технологія є ефективним способом отримання складнолегованих сплавів титану. Бібліогр. 12, табл. 4, іл. 11.

**Ключові слова:** електронно-променева плавка; високоміцний титановий сплав; зливок; хімічний склад; структура; деформація; механічні властивості

**PPRODUCING OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOY VT22 BY METHOD OF ELECTRON BEAM MELTING**

**S.V. Akhonin<sup>1</sup>, V.A. Berezos<sup>1</sup>, A.N. Pikulin<sup>1</sup>, A.Yu. Severin<sup>1</sup>, S.L. Shvab<sup>1</sup>, A.G. Erokhin<sup>2</sup>**

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

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

<sup>2</sup>SE «RPC «Titan» of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

26 Raketnaya Str., 03028, Kyiv. E-mail: titan.paton@gmail.com

The integrated works were carried out on investigation of feasibility for producing ingots of high-strength complex-alloyed titanium alloy VT22 of a primary charge.. Using technology of an electron beam cold hearth remelting and a portion supply of metal into a water-cooled mould the ingots of 400 mm diameter and up to 3 m length were produced, from which the semi-products in the form of plates and hot-pressed rods of 60 mm diameter were manufactured. Results of investigations of structure and mechanical properties of semi-products, made of titanium alloy VT22 ingots, are presented. It was found that the metal of produced ingots and semi-products is in compliance with requirements of standards both by the chemical composition and also by the structure and mechanical properties. Moreover, the material is characterized by a good ductility at high strength characteristics. It is shown that the electron beam technology is an effective method for producing the complex-alloyed alloys of titanium. 12 Ref, 4 Tabl., 11 Fig.

**Key words:** electron beam melting; high-strength titanium alloy; ingot; chemical composition; structure; deformation; mechanical properties

Поступила 06.11.2017

**НОВЫЕ КНИГИ**



**Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 642 с. ISBN 978-617-7015-74-0**

Сборник включает 86 статей и докладов сотрудников отдела физики газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 1978–2018 гг. В нем обобщен сорокалетний опыт научно-исследовательской деятельности отдела в области теоретического исследования и компьютерного моделирования физических явлений, протекающих при дуговых, плазменных, лазерных и гибридных процессах сварки, наплавки и напыления покрытий. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами дуговой, плазменной, лазерной и гибридной сварки и обработки материалов, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы сварочных и родственных процессов.

**Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд:** Каталог інноваційних пропозицій цільової комплексної програми наукових досліджень «Ресурс». Київ: Інститут електросварювання ім. С.О. Патона НАН України, 2018. — 65 с.

До каталогу інноваційних пропозицій увійшли 62 готових до впровадження нових розробок науковців, виконаних за Цільовою програмою НАН України з урахуванням нагальних потреб економіки держави. Вони виконані для підприємств і організацій сучасних галузей промисловості, будівництва та агропромислового комплексу.



Заказы на сборник и каталог просьба направлять в редакцию журнала «Современная электрометаллургия»