

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ СЛИТКОВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПА

**И. В. Протоковиллов, А. Т. Назарчук, Д. А. Петров, В. Б. Порохонько**

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Рассмотрены технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковой печи камерного типа. Обоснован выбор технологической схемы ЭШП титана, описана технология изготовления расходоуемых электродов из губчатого титана, рассмотрены вопросы выбора флюсовой композиции и режимы газовой защиты плавильного пространства. Получены слитки титановых сплавов различные по форме (цилиндрические, полые, прямоугольные) и химическому составу. Показано, что как по качеству выплавляемого металла, так и по технико-экономическим показателям ЭШП может конкурировать с другими металлургическими процессами получения слитков титановых сплавов. Библиогр. 26, ил. 6, табл. 1.

*Ключевые слова:* камерный электрошлаковый переплав; титановые сплавы; расходоуемый электрод; слиток; флюс

Работами, проведенными в Институте электросварки им. Е. О. Патона еще в 60-х годах прошлого века, было показано, что однократная электрошлаковая плавка расходоуемых электродов позволяет получать технический титан ВТ1 и сплавы типа ОТ4 со свойствами, не уступающими металлу, выплавленному в вакуумно-дуговой печи [1, 2]. Наряду с преимуществами, среди основных недостатков ЭШП титана в то время считали отсутствие рафинирования металла от водорода и высокий, по сравнению с ВДП, удельный расход электроэнергии. С развитием технологии и оборудования для ЭШП доказано, что как качество титана, получаемого этим способом, так и затраты электроэнергии вполне сравнимы с показателями, которые достигаются при ВДП [3–6].

Среди преимуществ электрошлакового процесса, обуславливающих эффективность его применения для получения титановых сплавов можно выделить простоту и надежность используемого оборудования, гибкость технологических параметров плавки, высокое качество поверхности слитков, возможность получения слитков сложной формы, отсутствие неконтролируемого испарения компонентов сплава. Также необходимо подчеркнуть эффективность использования при ЭШП электромагнитных способов воздействия на кристаллизацию металла, способствующих повышению химической и структурной однородности выплавляемых сплавов [7–9].

**Выбор технологической схемы ЭШП титана.** Высокая химическая активность титана накладывает

серьезные ограничения на выбор технологических схем его выплавки. При нагреве выше 400...450 °С титан начинает активно взаимодействовать с атмосферными газами. Поэтому при ЭШП титановых сплавов необходимо обеспечить надежную защиту расплавленного металла и нагретых до высоких температур расходоуемого электрода и слитка от взаимодействия с атмосферными газами. Этого можно достичь только при использовании камерных печей ЭШП с предварительным вакуумированием плавильного пространства и последующей подачей инертного газа.

Недопустимость загрязнения металла углеродом и кислородом исключает возможность использования при ЭШП титана различных формирующих устройств и нерасходоуемых электродов на основе графита или других огнеупорных материалов.

К специфическим особенностям ЭШП титана следует также отнести необходимость использования солевых флюсов, не содержащих оксиды. Данные флюсы обладают высокой жидкотекучестью и резко изменяют показатели вязкости при снижении температуры (короткие флюсы), что значительно усложняет использование схем ЭШП с взаимным перемещением кристаллизатора и слитка.

Исходным сырьем при производстве слитков титановых сплавов является губчатый титан и легирующие добавки. Использование схем ЭШП, позволяющих переплавлять кусковую шихту без ее предварительного компактирования для изготовления расходоуемых электродов, могло бы существенно снизить затраты на производство

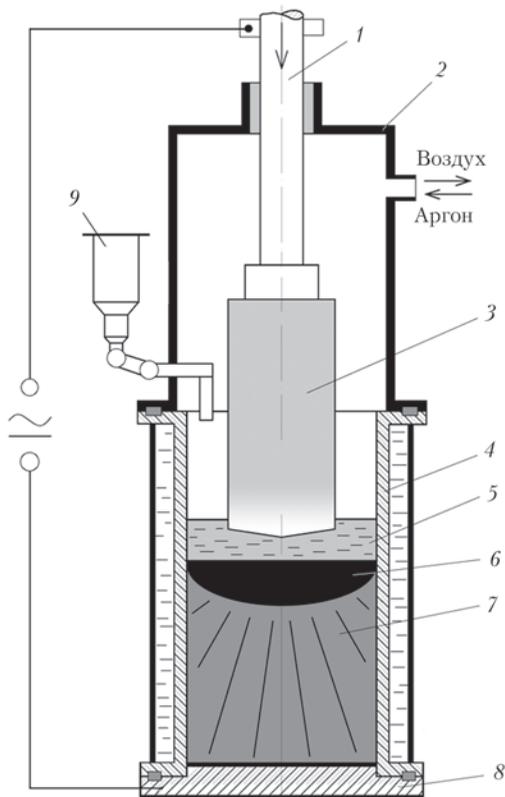


Рис. 1. Схема ЭШП расходуемого электрода в камерной печи: 1 — шток вертикального перемещения электрода; 2 — камера печи; 3 — расходуемый электрод; 4 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 — шлаковая ванна; 6 — металлическая ванна; 7 — слиток; 8 — поддон; 9 — бункер для подачи сыпучих компонентов

титановых слитков. Однако подача на зеркало шлаковой ванны кусковой шихты, состав которой существенно отличается по физическим свойствам, неминуемо приводит к формированию химической неоднородности в металле слитка.

Использование для выплавки титановых сплавов различных схем ЭШП с жидким металлом также сложнореализуемо ввиду необходимости его защиты от взаимодействия с атмосферными газами и использования камерных печей.

Таким образом, на наш взгляд, наиболее эффективной схемой ЭШП титановых сплавов на сегодняшний день остается классическая схема переплава расходуемого электрода в атмосфере инертного газа в стационарном водоохлаждаемом кристаллизаторе (рис. 1).

**Изготовление расходуемых электродов.** ЭШП можно использовать как рафинирующий переплав титановых слитков, полученных другими металлургическими способами, например, индукционной или дуговой гарнисажной плавками. Однако практический интерес представляет получение слитков титановых сплавов из исходной шихты — губчатого титана и легирующих компонентов. В этом случае шихту необходимо компактировать для получения расходуемых электродов.

Известны различные способы производства расходуемых электродов, основанные на процессах спекания шихты, холодного и горячего прессования на гидравлических прессах, прессования взрывом, изостатического, под током и др. [10–13]. Опыт показывает, что наиболее эффективным способом получения электродов для ЭШП титановых сплавов является полунепрерывное, порционное прессование на гидравлическом прессе в проходную пресс-форму (рис. 2).

Данный способ обеспечивает высокую производительность процесса прессования, возможность получения электродов необходимой длины, не загрязняет металл атмосферными газами и, что очень важно, обеспечивает равномерное распределение легирующих компонентов по высоте электрода, что является залогом получения однородных по химическому составу слитков.

Монтаж расходуемого электрода в печи осуществляется при помощи инвентарной головки, которая приваривается к торцу электрода. В работе [14] разработан способ контактной приварки инвентарной головки с использованием стандартного электрошлакового оборудования непосредственно



Рис. 2. Схема процесса прессования (а) и внешний вид полученных из губчатого титана электродов диаметром 75 и 100 мм (б): 1 — пуансон; 2 — приемная воронка; 3 — шихта; 4 — конусная, проходная пресс-форма; 5 — электрод

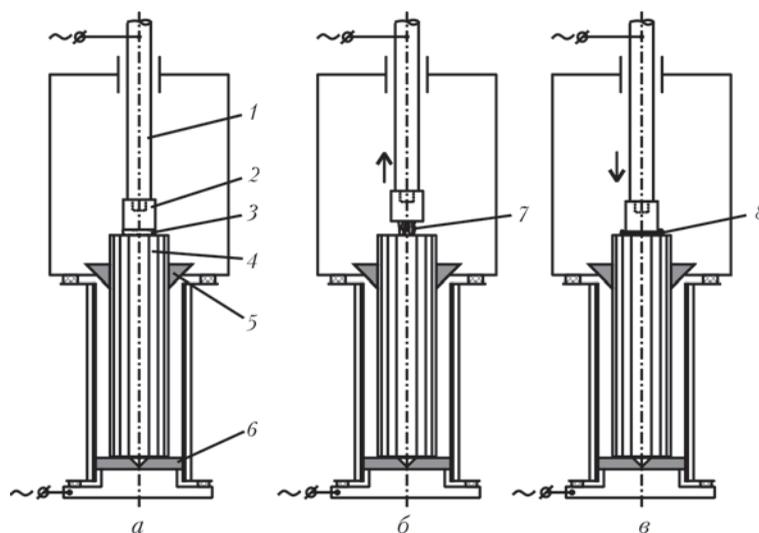


Рис. 3. Схема приварки инвентарной головки к расходуемому электроду (*а* — нагрев соединяемых поверхностей проходящим током; *б* — оплавление поверхностей электрической дугой; *в* — осадка): 1 — шток вертикального перемещения электрода; 2 — инвентарная головка; 3 — токопроводящая прослойка; 4 — расходный электрод; 5, 6 — центрирующие втулки; 7 — электрическая дуга; 8 — сварное соединение

в камере электрошлаковой печи (рис. 3). Сущность способа заключается в предварительном контактом нагреве свариваемых поверхностей электрическим током (рис. 3, *а*), оплавлении поверхностей дугой (рис. 3, *б*) и осадке, обеспечивающей сварку изделий (рис. 3, *в*). Указанные процессы осуществляются в форвакууме, что исключает насыщение металла сварного соединения и нагретых участков электрода атмосферными газами.

Разработанный способ обеспечивает соосность крепления электрода в кристаллизаторе и позволяет получать сварное соединение, выдерживающее механические и электрические нагрузки в процессе ЭШП (рис. 4). Важное преимущество предложенного способа заключается в отсутствии необходимости использования дополнительного оборудования и оснастки, в результате чего снижается трудоемкость и затраты на изготовление расходных электродов и технико-экономические показатели получения слитков в целом.

**Выбор флюсовой композиции.** Высокое сродство титана к кислороду исключает возможность использования при его плавке флюсов, содержащих оксиды. Поэтому при ЭШП титановых сплавов применяют бескислородные солевые флюсы, основу которых составляет чистый  $\text{CaF}_2$ . В качестве добавок используют галогениды щелочных и щелочноземельных металлов, а также металлический кальций [15–20].

Характерной особенностью солевых флюсов является их высокая электропроводность в расплавленном состоянии. К примеру, удельная электропроводность большинства оксидных флюсов при температуре 1500 °С не превышает 100...150  $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ , а удельная электропроводность солевых флюсов при той же температуре дости-

гает 400...600  $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$  [15, 16]. Такие высокие показатели электропроводности солевых флюсов снижают допустимые значения напряжения на шлаковой ванне и обуславливают высокий расход электроэнергии при ЭШП с их использованием.

Для понижения электропроводности флюса и повышения технико-экономических показателей ЭШП титана предложено в состав флюса на основе  $\text{CaF}_2$  дополнительно вводить хлориды щелочноземельного металла и (или) комплексные соединения типа  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $\text{MgTiF}_6$  и др. В расплавах таких флюсов образуются комплексные анионы типа  $\text{MgF}_4^{2-}$ ,  $\text{AlF}_6^{3-}$ , которые характеризуются больши-



Рис. 4. Внешний вид сварного соединения инвентарной головки и прессованного из губчатого титана электрода, выполненного контактной сваркой

ми ионными радиусами с малой подвижностью, что снижает электропроводность системы.

С учетом таких подходов разработан ряд флюсов для ЭШП титана систем  $\text{CaF}_2$ -8...30  $\text{SrCl}_2$ -2...5  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  и  $\text{CaF}_2$ -3...44  $\text{MeCl}_2$ -0,5...3  $\text{MgTiF}_6$ , где  $\text{MeCl}_2$  — хлорид щелочноземельного металла [21–23]. Использование данных флюсов при выплавке титановых сплавов обеспечивает стабильный электрошлаковый процесс, хорошее формирование поверхности слитка при снижении на 15...20 % удельного расхода электроэнергии (по сравнению с ЭШП под флюсом на основе 100 %  $\text{CaF}_2$ ) [21].

**Газовая атмосфера.** Как было отмечено выше, для предотвращения взаимодействия титана с атмосферными газами его плавку необходимо осуществлять в защитной атмосфере инертного газа (обычно аргона). При этом плавильное пространство необходимо предварительно вакуумировать до остаточного давления не выше  $1...5 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. Это позволяет удалить воздух и влагу из различных полостей в плавильном пространстве, неплотностей прессованного электрода и конденсата, который присутствует на стенках камеры. В процессе вакуумирования печи также можно осуществлять дополнительную дегазацию губчатого электрода путем его нагрева проходящим током, как показано в работе [24].

При подаче в камеру печи инертного газа его давление обычно выбирают несколько выше атмосферного (избыток 0,25...0,5 атм), что исключает натекание воздуха в камеру. Практический интерес также представляет ведение процесса ЭШП при пониженном давлении, так как при этом создаются условия для частичного удаления из металла водорода. Установлено, что нижний предел давления Аг в плавильном пространстве при плавке под флюсом АН-Т4 составляет 60...80 мм рт. ст. Дальнейшее понижение давления приводит к ухудшению стабильности электрошлакового процесса и вскипанию шлака.

В целом соблюдение указанных выше мер по предотвращению взаимодействия титана с атмо-

ферными газами обеспечивает получение титановых сплавов, газовый состав которых полностью удовлетворяет требованиям существующих стандартов.

Необходимо отметить, что сегодня помимо традиционных титановых сплавов, содержание атмосферных газов в которых строго ограничено, все большее распространение получают титановые сплавы, легированные кислородом. Камерный ЭШП является эффективным способом получения таких сплавов, обеспечивающим равномерное распределение кислорода в металле слитка [25]. При этом легирование можно осуществлять как путем добавления в шихту кислородсодержащих компонентов, так и непосредственно из газовой фазы, создавая в плавильном пространстве точную атмосферу с аргонокислородной смесью.

**Выплавка слитков.** Необходимость ведения процесса плавки в герметичном пространстве существенно затрудняет возможность использования жидкого старта электрошлакового процесса. Поэтому при ЭШП титановых слитков для наведения шлаковой ванны применяется техника «твердого» старта. Для облегчения процесса «твердого» старта к торцу расходоуемого электрода приваривается конусный наконечник, а на поддон устанавливается затравка из прессованного губчатого титана.

После наведения шлаковой ванны и выхода на заданные режимы плавки осуществляется основной этап переплава расходоуемого электрода. В отличие от ЭШП сталей процесс плавки титановых сплавов характеризуется более низкими значениями электрического напряжения и более высокими — тока.

Важным технологическим преимуществом ЭШП титана является возможность получения слитков различной формы (цилиндрических, прямоугольных, полых) с высоким качеством формирования их боковой поверхности, в результате чего снижаются затраты на их механическую обработку (рис. 5). Причем при выплавке технического титана и низколегированных сплавов годный металл получается уже после первого переплава, что существенно повышает технико-эко-



Рис. 5. Слитки титановых сплавов, полученные способом ЭШП

Механические свойства титановых сплавов электрошлаковой выплавки						
Сплав	Состояние	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>
BT1	Литой	440	360	28,0	57,0	186
BT6	Литой	940	890	9,3	24,0	48
BT6	Упрочненный	1020	920	11,0	38,0	63
BT22	Литой	970	940	8,5	21,7	33
BT22	Упрочненный	1300	1210	12,0	31,0	34
Ti-10-2-3	Литой	980	920	6,7	12,4	30
Ti-10-2-3	Упрочненный	1200	1120	13,0	36,5	50
ТС6	Упрочненный	1350	1180	12,0	25,0	—
Ti-50Ni (ат. %)	Литой	255	420	4,5	4,0	13
Ti-50Ni (ат. %)	Термообработанный	325	610	10,0	12,0	32
Ti-48Al-2Cr-2Nb (ат. %), $T_{исп} = 700^\circ\text{C}$	Литой	470	520	3,7	8,3	—

номические показатели ЭШП титановых слитков. При выплавке сложнoleгированных сплавов, как и при традиционном ВДП, для достижения требуемого уровня химической однородности металла требуется применение повторного переплава.

Для повышения однородности сложнoleгированных титановых сплавов при ЭШП целесообразно использование электромагнитного воздействия на процесс первичной кристаллизации металла [7–9]. Суть способа заключается в периодическом силовом воздействии на жидкий металл и фронт кристаллизации слитка электромагнитными силами, формирующимися в расплаве в результате взаимодействия тока плавки с внешним магнитным полем. Для создания последнего используется соленоид, размещенный с наружной стороны кристаллизатора. Питание соленоида осуществляется в импульсном режиме, в том числе и за счет разрядов конденсаторов, в результате чего в рабочей зоне создаются мощные импульсные магнитные поля, способствующие интенсивному перемешиванию жидкого металла и измельчению кристаллической структуры слитка. Это позволяет получать литой металл с мелкозернистой однородной структурой, приближающейся к структуре деформированного металла (рис. 6).

Еще одним важным преимуществом ЭШП титановых сплавов в камерной печи является отсутствие избирательного испарения легирующих элементов из расплава в процессе выплавки слитков. В отличие от ВДП и ЭЛП электрошлаковый процесс характеризуется относительно низкотемпературным рассредоточенным источником нагрева, переплав ведется при избыточном давлении инертного газа, зеркало металлической ванны покрыто расплавленным шлаком. Все это препятствует неконтролируемому испарению легирующих элементов с высокой упругостью пара (Cr, B, Sn, Al и др.) и позволяет выплавлять слитки различного химического состава — от технически чистого титана до многокомпонентных высокопрочных и жаропрочных титановых сплавов, интерметаллидных сплавов систем TiNi,  $\gamma$ -TiAl и



Рис. 6. Макроструктура продольного сечения титанового слитка, выплавленного способом ЭШП с электромагнитным воздействием на металлургическую ванну

др. [3–6, 26]. Указанные титановые сплавы электрошлаковой выплавки обладают высокими механическими характеристиками и могут найти применение в различных отраслях промышленности и медицине (таблица).

### Заключение

В ИЭС им. Е. О. Патона проведены комплексные исследовательские работы по получению слитков титановых сплавов электрошлаковым способом. Разработаны процессы прессования расходных электродов из губчатого титана, созданы бескислородные солевые флюсы для ЭШП титановых сплавов, разработано оборудование и оснастка для выплавки титановых слитков различных размеров и формы. Разработаны способы электромагнитного воздействия на кристаллизацию металла, позволяющие усреднять химический состав выплавляемых сплавов и измельчать структуру литого металла.

Получены слитки титановых сплавов различной формы (цилиндрические, полые, прямоугольные) и различного химического состава. Показано, что как по качеству выплавляемого металла, так и по технико-экономическим показателям ЭШП может конкурировать с другими металлургическими процессами получения титановых сплавов.

#### Список литературы

1. Гуревич С. М., Дидковский В. П. (1963) Свойства технического титана и сплавов типа OT4, полученных электрошлаковой плавкой. *Автоматическая сварка*, **4**, 27–33.
2. Гуревич С. М., Дидковский В. П., Новиков Ю. К. (1963) Электрошлаковая выплавка слитков титановых сплавов. *Там же*, **10**, 37–42.
3. Компан Я. Ю., Протокивиллов И. В., Назарчук А. Т. (2008) Мелкозернистые слитки многокомпонентных титановых сплавов. *Теория и прак. металлургии*, **2**, 35–40.
4. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Петров Д. А. и др. (2009) Интерметаллическое жароупрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Современная электрометаллургия*, **1**, 3–11.
5. Протокивиллов И. В., Петров Д. А., Порохонько В. Б. (2016) Электрошлаковая выплавка и термомеханическая обработка высокопрочного титанового псевдо  $\beta$ -сплава ТС6. *Там же*, **3**, 16–20.
6. Протокивиллов И. В., Петров Д. А. (2017) Структура и свойства высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 электрошлакового переплава. *Там же*, **1**, 9–14.
7. Компан Я. Ю., Протокивиллов И. В., Назарчук А. Т. (2008) Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей. *Матер. Междунар. конф. «Ti-2008 в СНГ»*, 18–21 мая 2008 г., Санкт-Петербург, сс. 96–99.
8. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протокивиллов И. В., Петров Д. А. (2012) Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах. *Современная электрометаллургия*, **2**, 8–13.
9. Протокивиллов И. В., Назарчук А. Т., Порохонько В. Б., Петров Д. А. (2015) Использование разрядов конденсаторов для управления кристаллизацией металла при ЭШП. *Там же*, **4**, 3–8.
10. Андреев А. Л., Аношкин Н. Ф., Борзцовская К. М. и др. (1978) *Плавка и литье титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
11. Ивченко З. А., Лунев В. В. (2010) Изготовление и использование прессованных титановых брикетов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **1**, 90–92.
12. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Саенко В. Я. и др. (1994) Переплав губчатых титановых расходных электродов способами ЭШП и ДШП. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **3–4**, 7–11.
13. Жадкевич М. Л., Шаповалов В. А., Константинов В. С. и др. (2005) Получение расходных электродов компактированием титановой губки под током. *Современная электрометаллургия*, **3**, 64–67.
14. Протокивиллов И. В., Петров Д. А., Порохонько В. Б., Бабич Л. М. (2013) Изготовление расходных электродов для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки титана. *Там же*, **3**, 8–11.
15. Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г. (1988) *Сварочные шлаки*. Киев, Наукова думка.
16. Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. (1989) *Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами*. Москва, Машиностроение.
17. Замков В. Н. (ред.) (1986) *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
18. Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Рябинин В. А. (2010) Выбор флюсов для ДШП при получении слитков титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*, **1**, 8–11.
19. Протокивиллов И. В. (2008) Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов. *Там же*, **2**, 13–16.
20. Рябцев А. Д., Троянский А. А., Мастепан В. Ю. и др. (2003) Об электропроводности флюсов системы  $\text{CaF}_2\text{—Ca}$ . *Там же*, **1**, 3–4.
21. Протокивиллов И. В., Порохонько В. Б., Гончаров И. А., Мищенко Д. Д. (2015) Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана. *Там же*, **3**, 7–12.
22. Компан Я. Ю., Протокивиллов И. В., Петров А. М. (2003) *Флюс для магнитокероаной электрошлаковой плавки титановых сплавів*. Україна Пат. UA 55502, B23K35/36.
23. Протокивиллов И. В., Порохонько В. Б. (2016) *Флюс для электрошлакового переплаву титанових сплавів*. Україна Пат. UA 110591 C2.
24. Протокивиллов И. В. (2012) Дегазация электрода спрессованного из губчатого титана в процессе вакуумирования камерной печи ЭШП. *Современная электрометаллургия*, **1**, 12–15.
25. Ратиев С. Н., Рябцева О. А., Троянский А. А. и др. (2010) Легирование титана кислородом из газовой фазы при камерном электрошлаковом переплаве титановой губки. *Там же*, **2**, 8–12.
26. Протокивиллов И. В., Петров Д. А. (2011) Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Титан*, **4**(34), 40–44.

#### References

1. Gurevich, S.M., Didkovsky, V.P. (1963) Properties of commercial titanium and alloys of OT4 type produced by electroslag melting. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 27–33 [in Russian].
2. Gurevich, S.M., Didkovsky, V.P., Novikov, Yu.K. (1963) Electroslag melting of titanium alloy ingots. *Ibid.*, **10**, 37–42 [in Russian].
3. Kompan, Ya.Yu., Protokovilov, I.V., Nazarchuk, A.T. (2008) Fine-grained ingots of multicomponent titanium alloys. *Teoriya i Prakt. Metallurgii*, **2**, 35–40 [in Russian].
4. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Petrov, D.A. et al. (2009) Intermetallic heat-hardening of titanium alloys, produced by method of magnetically-controlled electroslag melting. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 1–11 [in Russian].
5. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B. (2016) Electroslag melting and thermomechanical treatment of high-strength titanium pseudo  $\beta$ -alloy TS6. *Ibid.*, **3**, 16–20 [in Russian].
6. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A. (2017) Structure and properties of high-strength titanium alloy Ti-10-2-3 of electroslag remelting. *Ibid.*, **1**, 9–14 [in Russian].
7. Kompan, Ya.Yu., Protokovilov, I.V., Nazarchuk, A.T. (2008) Magnetically-controlled electroslag melting of titanium alloys with discrete effects of magnetic fields. In: *Proc. of Int. Conf. «Ti-2008 in CIS»* (18–21 May 2008, Saint-Petersburg), 96–99.
8. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Protokovilov, I.V., Petrov, D.A. (2012) Possibilities of application of pulsed electromagnetic effects in electroslag processes. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 8–13 [in Russian].
9. Protokovilov, I.V., Nazarchuk, A.T., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B. et al. (2015) Application of discharges of capacitors for control of metal crystallization in ESR. *Ibid.*, **4**, 3–8 [in Russian].

10. Andreev, A.L., Anoshkin, N.F., Borzetsovskaya, K.M. et al. (1978) *Melting and casting of titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Ivchenko, Z.A., Lunev, V.V. (2010) Manufacture and application of compacted titanium briquettes. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metallurgii ta Mashynobuduvanni*, **1**, 90–92 [in Russian].
12. Paton, B.E., Medovar, B.I., Saenko, V.Ya. et al. (1994) Production of sponge titanium consumable electrodes by ESR and ASR methods. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3–4**, 7–11 [in Russian].
13. Zhadkevich, M.L., Shapovalov, V.A., Konstantinov, V.S. et al. (2005) Production of consumable electrodes by titanium sponge compaction under current. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 58–61.
14. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B., Babich, L.M. (2013) Manufacture of consumable electrodes for magnetically-controlled electroslag melting of titanium. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **3**, 8–11 [in Russian].
15. Podgaetsky, V.V., Kuzmenko, V.G. (1988) *Welding slags*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
16. Kompan, Ya.Yu., Shcherbinin, E.V. (1989) *Electroslag welding and melting with controlled MHD-processes*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
17. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. Ed. by V.N. Zamkov. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
18. Medovar, L.B., Saenko, V.Ya., Ryabinin V.A. (2010) Selection of fluxes for ASR in producing titanium ingots. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 8–11 [in Russian].
19. Protokovilov, I.V. (2008) Electroslag melting of halogenide oxygen-free fluxes. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 12–14.
20. Ryabtsev, A.D., Troyansky, A.A., Mastepan, V.Yu. et al. (2003) About electrical conductivity of fluxes of CaF<sub>2</sub> system. *Ibid.*, **1**, 2–3.
21. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B., Goncharov, I.A., Mishchenko, D.D. (2015) Investigation of physical and technological properties of salt fluxes for ESR of titanium. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 7–12.
22. Kompan, Ya.Yu. Protokovilov, I.V., Petrov, A.M. (2003) *Flux for magnetically-controlled electroslag melting of titanium alloys*. Pat. UA 55502, Ukraine, Int. Cl. B23K35/36 [in Ukrainian].
23. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2016) *Flux for electroslag remelting of titanium alloys*. Pat. UA 110591 C2 Ukraine [in Ukrainian].
24. Protokovilov, I.V. (2012) Degassing of electrode, pressed of spongy titanium, in the process of chamber ESR furnace evacuation. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 12–15 [in Russian].
25. Ratiev, S.N., Ryabtseva, O.A., Troyansky, A.A. et al. (2010) Titanium alloying with oxygen from gas phase in chamber-type electroslag remelting of titanium sponge. *Ibid.*, **2**, 8–12 [in Russian].
26. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A. (2011) Production of alloys of Ti–Ni system with shape memory effect by magnetically-controlled electroslag melting method. *Titan*, **4**(34), 40–44 [in Russian].

#### ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА МЕТАЛУРГІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИПЛАВКИ ЗЛИВКІВ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ В ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ

**І. В. Протоковілов, О. Т. Назарчук, Д. А. Петров, В. Б. Порохонько**

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

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

Розглянуто технологічні та металургійні особливості виплавки зливків титанових сплавів в електрошлаковій печі камерного типу. Обґрунтовано вибір технологічної схеми ЕШП титану, описана технологія виготовлення витратних електродів з губчастого титану, розглянуті питання вибору флюсової композиції і режими газового захисту плавильного простору. Отримано зливки титанових сплавів різні по формі (циліндричні, порожнисті, прямокутні) і хімічному складу. Показано, що як за якістю виплавленого металу, так і за техніко-економічними показниками ЕШП може конкурувати з іншими металургійними процесами отримання зливків титанових сплавів. Бібліогр. 26, іл. 6, табл. 1.

**Ключові слова:** камерний електрошлаковий переплав; титанові сплави; витратний електрод; зливки; флюс

#### TECHNOLOGICAL AND METALLURGICAL PECULIARITIES OF MELTING OF TITANIUM ALLOY INGOTS IN CHAMBER-TYPE ELECTROSLAG FURNACES

**I. V. Protokovilov, A. T. Nazarchuk, D. A. Petrov, V. B. Porokhonko**

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

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

Considered are technological and metallurgical peculiarities of melting the titanium alloys in chamber-type electroslag furnaces. Selection of technological diagram of ESR of titanium was grounded, technology of manufacture of consumable electrodes, made of sponge titanium, was described, the problems of selection of a flux composition and modes of melting space gas protection were considered. Titanium alloy ingots were produced in different shapes (cylindrical, hollow, square) and chemical composition. It is shown that by both the quality of metal melted and also the technical-economic characteristics, the ESR can compete with other metallurgical processes of producing the titanium alloy ingots. Ref. 26, Tabl. 1, Fig. 6.

**Key words:** chamber-type electroslag remelting; titanium alloys; consumable electrode; ingot; flux

Поступила 27.02.1018