



УДК.669.187.2

# ТИТАН. ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА. ПЕРСПЕКТИВЫ. Аналитический обзор. Часть 2\*

К. А. Цыкуленко

Рассмотрены способы производства титановых слитков с применением как расходующихся, так и нерасходующихся электродов. Показаны основные проблемы, возникающие при получении титановых слитков. Отмечены преимущества и недостатки различных способов.

Methods of production of titanium alloys with application of both consumable and also non-consumable electrodes are considered. Main problems are shown, occurring in producing of titanium alloys. Advantages and disadvantages of different methods are outlined.

**Ключевые слова:** титан; способы плавки; расходующий электрод; нерасходующий электрод; скрап; проблемы производства

Многочисленные способы получения слитков титана и его сплавов можно условно разделить на две большие группы — с использованием расходующего титанового электрода и с непосредственным переплавом губки и скрапа. Различные варианты таких технологий (вакуумно-дуговой, электронно-лучевой, электрошлаковый, плазменно-дуговой, индукционный переплавы) подробно описаны в литературе [1–4], поэтому отметим лишь основные моменты и трудности плавки титана, связанные с его свойствами, а также требования, предъявляемые к качеству слитков.

Титан относится к химически активным металлам, поэтому его переплав, плавку и разливку производят в вакууме или защитной среде. При высоких температурах, тем более в жидком состоянии, титан интенсивно реагирует со всеми огнеупорными материалами, в том числе и с оксидами, обычно входящими в состав огнеупоров, в результате чего загрязняется кислородом. Плавка титана в графитовых тиглях приводит к загрязнению его углеродом. Содержание примесей в титане существенно влияет на его механические свойства. Различают примеси внедрения (кислород, азот, углерод, водород) и замещения (железо и кремний). Примеси повышают прочность титана, но одновременно резко снижают пластичность, причем более отрицательное влияние оказывают примеси внедрения, особенно газы. При введении всего лишь 0,003 %

водорода; 0,02 % азота или 0,7 % кислорода титан полностью теряет способность к пластическому деформированию и хрупко разрушается [5]. Особенно вреден водород, снижающий ударную вязкость и вызывающий водородную хрупкость титановых сплавов. Поэтому содержание примесей, прежде всего газов, в титане и его сплавах (табл. 1, а также табл. 11 в части 1 обзора) строго ограничивают.

Наиболее активно удаление из шихтовых материалов газов (особенно водорода) и влаги, а также остатков магния и солей происходит в вакууме. Поэтому для производства титановых слитков наибольшее распространение получила технология вакуумно-дугового переплава (ВДП). В настоящее время по указанной технологии на Верхне-Салдинском металлургическом производственном объединении (ВСМПО) выплавляют слитки диаметром от 450 до 1150 мм, массой до 9,5 т, возможна выплавка слитков массой до 18 т, как правило, путем двух- или трехкратного переплава расходующего электрода. Задача первого переплава заключается в удалении металла-восстановителя, его хлористой соли, водорода и сравнительно равномерном распределении легирующих добавок. Качество поверхности слитка первого переплава особого значения не имеет [1]. Цель последующих переплавов заключается в повышении равномерности распределения легирующих добавок, формировании слитков с однородной структурой и хорошей поверхностью. В качестве расходующего электрода для первого переплава используют заготовку, прессованную из губки, титановых отходов и требуемого количества легирую-

\* Часть 1 см. в № 1, 2007 г.



Таблица 1 [5]. Марки деформируемых титановых сплавов (ГОСТ 19807–91) и их химический состав, мас. %

Марка сплава	Al	V	Mo	Zr	Mn	Cr	Si	Fe	O	H	N	C
BT1-00	–	–	–	–	–	–	0,08	0,15	0,10	0,008	0,04	0,05
BT1-0	–	–	–	–	–	–	0,10	0,25	0,20	0,010	0,04	0,07
BT1-2	–	–	–	–	–	–	0,15	1,50	0,30	0,010	0,15	0,10
OT4-0	0,4...1,4	–	–	0,30	0,5...1,3	–	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10
OT4-1	1,5...2,5	–	–	0,30	0,7...2,0	–	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10
OT4	3,5...5,0	–	–	0,30	0,8...2,0	–	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10
BT5	4,5...6,2	1,2	0,8	0,30	–	–	0,12	0,30	0,20	0,015	0,05	0,10
BT5-1	4,3...6,0	1,0	–	0,30	–	–	0,12	0,30	0,15	0,015	0,05	0,10
BT6	5,3...6,8	3,5...5,3	–	0,30	–	–	0,10	0,60	0,20	0,015	0,05	0,10
BT6с	5,3...6,5	3,5...4,5	–	0,30	–	–	0,15	0,25	0,15	0,015	0,04	0,10
BT3-1	5,5...7,0	–	2,0...3,0	0,50	–	0,8...2,0	0,15...0,40	0,2...0,7	0,15	0,015	0,05	0,10
BT8	5,8...7,0	–	2,8...3,8	0,50	–	–	0,20...0,40	0,30	0,15	0,015	0,05	0,10
BT9	5,8...7,0	–	2,8...3,8	1,0...2,0	–	–	0,20...0,35	0,25	0,15	0,015	0,05	0,10
BT14	3,5...6,3	0,9...1,9	2,5...3,8	0,30	–	–	0,15	0,25	0,15	0,015	0,05	0,10
BT20	5,5...7,0	0,8...2,5	0,5...2,0	1,5...2,5	–	–	0,15	0,25	0,15	0,015	0,05	0,10
BT22	4,4...5,7	4,0...5,5	4,0...5,5	0,30	–	0,5...1,5	0,15	0,5...1,5	0,18	0,015	0,05	0,10
ПТ-7М	1,8...2,5	–	–	2,0...3,0	–	–	0,12	0,25	0,15	0,006	0,04	0,10
ПТ-3В	3,5...5,0	1,2...2,5	–	0,30	–	–	0,12	0,25	0,15	0,006	0,04	0,10
АТ3	2,0...3,5	–	–	–	–	0,2...0,5	0,20...0,40	0,2...0,5	0,15	0,008	0,05	0,10

Примечания: 1. Основа — титан; сплав BT5-1 включает 2...3 мас. % Sn. 2. Сумма прочих примесей во всех сплавах составляет 0,30, в сплаве BT1-00 — 0,10 мас. %.

щих компонентов. Заготовку диаметром 350...650 мм, длиной до 5500 мм получают на специализированных гидравлических прессах усилием до 10000 тс [6].

Необходимость применения дорогостоящего оборудования для изготовления электродов является одним из основных недостатков указанной технологии. Кроме того, из-за ограниченной возможности ввода титановых отходов в шихтовую заготовку–электрод для данной технологии характерны значительный расход первичной титановой губки и высокая стоимость изделия. Вовлечение в шихту более 30...35 % отходов снижает прочность расходуемых электродов и создает опасность их разрушения при транспортировке и плавке [2]. Для повышения прочности электродов в шихту вводят 0,3...0,6 % алюминия. Требования, предъявляемые к качеству титановой губки прежде всего по содержанию хлора, связаны с таким явлением, как ионизация разряда, которая при ВДП может привести к возникновению дугового разряда между расходуемым электродом и стенкой кристаллизатора, а при определенных условиях — к аварии [7].

При использовании технологии ВДП расходуемого титанового электрода в водоохлаждаемом кристаллизаторе одним из недостатков является относительно небольшая ванна жидкого металла, что затрудняет получение слитков, однородных по химическому составу и структуре. Отметим двойственный подход к оценке размеров металлической ванны с точки зрения качества металла. С одной стороны, для получения однородного состава при пе-

реплаве расходуемого электрода, прессованного из титановой губки, из-за неоднородности последней, а также с учетом наличия в таком электроде отходов и легирующих компонентов предпочтительнее глубокая ванна, а следовательно, большая степень усреднения состава. С другой стороны, для формирования мелкой кристаллической структуры целесообразнее мелкая ванна. Поэтому при первом ВДП обеспечивают большую глубину ванны для достижения максимально возможной химической однородности, а при втором — уменьшают глубину ванны для получения более мелкой структуры слитка. К сожалению, при ВДП существует жесткая связь между скоростями плавления электрода и кристаллизации слитка, поэтому возможность воздействия на процесс кристаллизации очень ограничена. В процессе переплава регулируют только ток дуги, а глубина металлической ванны при ВДП прямо пропорциональна значению тока дуги.

При ВДП применяют источники постоянного тока, поскольку дуга постоянного тока в вакууме стабильна, а использование слитка в качестве анода позволяет увеличить глубину металлической ванны за счет эффективного использования выделяемой дугой энергии (на аноде примерно 75 %). Наиболее существенным недостатком применения источников постоянного тока при ВДП является взаимодействие электромагнитного поля дуги постоянного тока с полями токов, индуцируемых в массах металла, расположенных вблизи плавильной зоны. В результате такого взаимодействия возможен переброс дуги



на стенку кристаллизатора и его прожог. Для стабилизации дуги на нее воздействуют продольным магнитным полем, создаваемым различными соленоидными (как подвижными, так и стационарными, намотанными на кристаллизатор).

Устранить несбалансированные магнитные поля в зоне плавки и исключить опасность прожога кристаллизатора возможно при работе на трехфазном переменном токе. Однако наличие сразу трех электродов снижает коэффициент заполнения кристаллизатора, а использование секторных электродов заметно усложняет процесс их изготовления и повышает стоимость. Кроме того, существуют определенные трудности с поддержанием стабильной скорости плавления электродов [4].

В работе [8] показана принципиальная возможность поддержания устойчивого горения дуги переменного тока в вакууме при переплаве одного электрода из титана без применения стабилизаторов дуги (осцилляторов и легкоионизируемых солей) путем использования управляемых параметрических источников питания.

Параметрические источники для ВДП установлены и пущены в эксплуатацию еще в 1964 г. Однако работа на переменном токе требует более высокого напряжения, чем на постоянном, что увеличивает опасность возникновения боковых дуг. Слитки, выплавленные на переменном токе, имеют значительно худшую поверхность. Как отмечалось в монографии [9], и с таким источником не удалось достичь достаточной устойчивости дуги, поэтому работы не получили дальнейшего развития.

Взаимодействие магнитных полей при ВДП приводит к интенсивному вращению металлической ванны. Из-за ее вращения, а также разбрызгивания жидкого металла дугой, испарения компонентов расплава на стенке кристаллизатора, выше уровня расплава, образуется корка-гарнисаж. Внешний по отношению к слитку слой представляет собой конденсат, в состав которого входят все испаряющиеся из переплавленного металла элементы. Причем их концентрация здесь существенно выше, чем в самом слитке. Из-за характерного вида гарнисаж на головной части слитка получил название «корона». При подъеме уровня металла гарнисаж частично растворяется в нем и сплавляется со слитком. Рыхлый конгломерат конденсата и брызг металла значительно ухудшает качество поверхности слитка ВДП. Повышенная загрязненность поверхностного слоя металла неметаллическими включениями, чрезмерное обогащение легирующими элементами, примесями, газами, а также наличие подкорковых дефектов обуславливают необходимость обдирки слитков ВДП на глубину до 25 мм [4].

Технология ВДП не исключает возможности образования в слитке включений за счет не полностью расплавившихся тугоплавких легирующих компонентов. Кроме того, у легированных титановых сплавов, по-видимому, существует определенная предельная масса слитка ВДП, выше которой уве-

личение степени сегрегации легирующих компонентов и примесей, а также более грубая структура металла большого слитка будет отрицательно влиять на качество изделий [2].

С целью преодоления технологических недостатков, присущих вакуумно-дуговому способу получения титановых слитков в Институте электросварки им. Е. О. Патона почти 50 лет назад предложили использовать электрошлаковый процесс [10, 11]. Исследования этого процесса применительно к плавке титана показали, что при использовании открытых печей ЭШП одной лишь шлаковой защиты недостаточно. При открытой поверхности шлаковой ванны в случае контакта жидкого шлака с воздухом происходит поглощение газов (кислорода, азота, водорода) шлаком и насыщение ими переплавляемого металла. Увеличение глубины шлаковой ванны не дало положительных результатов. Потребовалась изоляция шлаковой ванны от воздуха.

Защита шлаковой ванны инертными газами (аргон, гелий) позволяет снизить степень загрязнения титана газами, но не обеспечивает требуемого низкого уровня их содержания. Поэтому сначала титан выплавляли не в открытых кристаллизаторах с вдуванием защитного газа в зону плавки, а в герметичных электропечах с застойной инертной атмосферой, для создания которой камера печи предварительно вакуумируется, а затем заполняется аргоном. Этот процесс называли камерным ЭШП. Давление аргона в печи должно быть не ниже 50...80 мм рт. ст., поскольку при указанном давлении и температуре электрошлакового процесса переплава титана шлак вскипает. Оптимальное давление аргона в печи составляет 300...600 мм рт. ст. Конструкция камерных печей ЭШП мало отличается от таковой печей ВДП [12, 13]. Из-за сложности оборудования и ряда других причин развитие печей ЭШП камерного типа было приостановлено [14, 15]. Только в последнее время стали появляться новые камерные печи ЭШП [16] и процессы ЭШП с использованием печей камерного типа, например магнитоуправляемая электрошлаковая плавка титана [17, 18].

Несмотря на некоторое возможное насыщение титана газами наряду с камерным ЭШП развивали ЭШП в печах открытого типа. В работах [13, 19] показана принципиальная возможность получения титановых слитков способом ЭШП в открытом кристаллизаторе с защитой зоны плавления аргоном. Однако с увеличением развеса слитков чрезмерно возрастает расход аргона, появляются затруднения с устранением подсоса газов из окружающей атмосферы [15].

Для исключения этого явления использовали бескамерные печи ЭШП с флюсовым затвором, конструкция которого позволяет в процессе плавки создавать в плавильном пространстве небольшое избыточное давление газов, что дополнительно препятствует поступлению азота и кислорода из атмосферы воздуха в полость кристаллизатора. Флюсовой затвор, герметизируя плавильное пространство, за-



щищает шлаковую ванну, а также нагретую до высоких температур поверхность расходуемого электрода над ней от насыщения газами. Следует отметить, что при переплаве в печах открытого типа в некоторых случаях для предотвращения насыщения газами поверхность расходуемого электрода покрывают специальными обмазками, флюсами. При использовании флюсового затвора необходимость в такой операции отпадает. Оценка эффективности применения флюсового затвора при ЭШП титана, проведенная в работе [20], показала возможность получения титановых слитков высокого качества в обычных бескамерных печах.

Одним из основных элементов электрошлаковой технологии, играющим энергопреобразующую и теплопередающую роль, является шлак. В работе [11] пришли к выводу, что шлак для электрошлаковой выплавки титановых слитков, как и для сварки титана, должен быть бескислородным. Поскольку при температурах электрошлакового процесса титан не должен заметно реагировать с фторидами (кальция, стронция, бария), предложено использовать чистый фтористый кальций, получивший наименование АНТ-2. В дальнейшем состав шлака (в основном с целью снижения электропроводности) корректировали, вводили различные добавки, например  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$  [21],  $\text{SrCl}_2$  и  $\text{MgTiF}_6$  [17, 21], однако основа  $\text{CaF}_2$  была постоянной. Как отмечено в работах [1, 22], электропроводность шлака с 87,3 %  $\text{CaF}_2$  при 1700 °С равна  $5,5 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . С увеличением количества  $\text{CaF}_2$  в шлаке его электропроводность повышается, а следовательно, увеличиваются энергетические затраты на плавку.

Особенность электрошлакового переплава заключается в отсутствии вакуума, необходимости применения расходуемых электродов с низким содержанием водорода, поскольку его массовая доля в результате ЭШП, в отличие от ВДП, практически не уменьшается. Содержание водорода в губке сразу после вакуумной сепарации обычно не превышает тысячных долей процента [11, 23]. Однако в процессе ее дробления, сортировки, хранения, изготовления расходуемых электродов возможно насыщение губки влагой, а кроме того, — поглощение влаги из воздуха готовыми, прессованными из губки, электродами. Отсутствие дегазации титана в ходе переплава является главным недостатком электрошлакового процесса. Поэтому ЭШП расходуемых электродов применяют, как правило, для получения слитков второго переплава в сочетании с одним из способов первого переплава в вакууме, обеспечивающих достаточно полное удаление газов и прежде всего водорода [1, 2].

Преимущества ЭШП расходуемого электрода, по сравнению с ВДП, состоят в следующем:

возможности не использовать источники постоянного тока;

отсутствии дуги в процессе, что позволяет избежать разбрызгивания металла и возникновения «короны» слитка, насыщенной примесями;

возможности вести процесс при более глубокой ванне жидкого металла и, таким образом, улучшить химическую однородность слитка, а вследствие более равномерного прогрева по сечению получать слитки прямоугольного сечения, что удобно для их дальнейшей прокатки;

возможности в ряде случаев избежать обдирки поверхности слитка перед последующей обработкой.

Кроме того, последние исследования процесса ЭШП расходуемого титанового электрода показали, что существует возможность растворения и/или даже измельчения и равномерного распределения высокоазотистых включений по объему слитка [24–26]. Скорость растворения высокоазотистых включений при ЭШП при определенных условиях может быть почти вдвое выше, чем при ВДП.

Своеобразный способ переплава расходуемого электрода (дугошлаковый — ДШП), являющийся комбинацией дугового и шлакового процессов переплава, предложен в работе [27]. Его предшественником, по-видимому, следует считать способ, в соответствии с которым проведены опытные плавки титана электрической дугой под слоем шлака [1, 28]. Поскольку плавку вели при напряжении 60...70 В в аргоне при давлении 360...500 мм рт. ст., следует полагать, что это были плавки в камерной печи ЭШП. Отмечены заметное увеличение скорости плавления при повышении мощности дуги, формирование слитка с довольно ровной поверхностью, без «короны», а также загрязнение всех узлов печи, в том числе вакуумных, пылевидным флюсом.

В предложенном способе ДШП дуга горит между торцом расходуемого электрода и поверхностью шлаковой ванны, пленка и капли жидкого металла, образующиеся на торце электрода, взаимодействуют с газовой атмосферой. В этом случае требования к герметизации плавильного пространства конструкции флюсового затвора (впервые такие затворы появились с разработкой способа ДШП) существенно выше, чем при ЭШП. Оценка применимости способа ДШП для переплава титана и его сплавов проведена в работах [29–31]. Важнейшие достоинства этого процесса заключаются в более высоком, чем при каноническом ЭШП, качестве переплавляемого металла, в 2–3 раза более низком удельном расходе шлака, в 1,5 раза меньших затратах электроэнергии [31].

Избежать проблем, связанных с изготовлением и переплавом расходуемого электрода, вовлечь в переработку большее количество титановых отходов позволяют различные способы плавки титана с нерасходуемым электродом. Это могут быть вакуумно-дуговая, плазменно-дуговая и электрошлаковые технологии.

В качестве нерасходуемых электродов при переплаве титана применяют вольфрам и графит, а также медные водоохлаждаемые электроды. Однако и здесь возникают проблемы. Так называемый нерасходуемый электрод все же подвергается



эрозии, в результате чего происходит загрязнение титанового слитка включениями материала электрода. Вольфрамовый электрод растрескивается, размывается брызгами переплавляемого металла, в результате чего в полученном слитке можно обнаружить микрочастицы вольфрама. Для надежной работы материал, из которого изготовлен нерасходуемый электрод, должен отличаться хорошими эмиссионными свойствами и высокой термостойкостью.

Для улучшения условий работы в вольфрамовый электрод вводят торий, лантан или иттрий. Такие добавки не только снижают работу выхода электронов и обеспечивают более высокую допустимую плотность тока дуги, но и повышают температуру рекристаллизации вольфрама, т.е. предотвращают охрупчивание и повышают его стойкость.

В случае применения графитовых нерасходуемых электродов обнаружено науглероживание титана, для уменьшения которого графитовый электрод пропитывают титаном.

Наиболее чистыми с точки зрения загрязнения переплавляемого металла являются медные электроды. Медь как более легкоплавкий металл в случае попадания в переплавляемый титан полностью в нем растворяется, образуя с ним твердые растворы замещения. Она не так опасна, как вольфрам. Главная задача при использовании медных нерасходуемых электродов заключается в необходимости свести их эрозию к минимально допустимой, обеспечив при этом требуемые производительность процесса и ресурс работы электрода (плазмотрона).

При ВДП и ПДП с медным нерасходуемым электродом предусматриваются меры, способствующие распределению теплового потока дуги, поступающего на электрод, по максимально возможной площади его рабочей поверхности и/или снижающие плотность тока в пятне привязки дуги на электроде [32]. Так, в установках фирмы «Шлингер» медный нерасходуемый электрод типа «рототрод», установленный под углом к зеркалу металлической ванны, вращают вокруг собственной оси и, таким образом, перемещают пятно привязки дуги по рабочей поверхности электрода.

В установках фирмы «Вестингхаус электрик Ко», использующих электрод типа «дюорак», вращение дуги по кольцевой поверхности наконечника электрода осуществляют с помощью магнитного поля. При рабочих токах до 2 кА ресурс работы указанных электродов не превышает 40... 50 ч.

В дуговых источниках нагрева с плазменным катодом [33, 34] равномерного рассредоточения активных пятен по рабочей поверхности нерасходуемого электрода и уменьшения выделяемой на нем энергии достигают за счет вспомогательной низкоамперной дуги, обеспечивающей требуемое количество заряженных частиц в приэлектродной области для работы основной дуги. При токах до 10 кА ресурс работы такого электрода достигал уже 20 ч.

Дальнейшее совершенствование конструкций нерасходуемых электродов привело к созданию

фирмой «Вестингхаус Плазма Ко» плазменного электрода (плазмотрона), в котором перемещение пятна привязки дуги осуществляется в двух направлениях. Интенсивное вращение по внутренней поверхности водоохлаждаемого трубчатого электрода обеспечивается магнитным полем, а перемещение вдоль рабочей поверхности электрода — мощным газовым потоком. При этом дуга периодически обрывается и вновь образуется в узком зазоре между двумя трубчатыми электродами. Процесс динамично повторяется, позволяя избегать локализации пятна на поверхности электрода. Ресурс работы плазменного нерасходуемого электрода такой конструкции мощностью до 4 МВт достигает нескольких тысяч часов.

Для снижения плотности тока в пятне привязки дуги следует обеспечивать максимально возможный диаметр активного пятна, а лучше всего — диффузную привязку, или разбить пятно на несколько пятен, равномерно рассредоточенных по рабочей поверхности электрода. Рассредоточение пятна по рабочей поверхности электрода способствовало созданию многостержневого или секционного электрода, состоящего из множества электродов малого диаметра, собранных в пакет [35]. Прикатодная область разряда такого электрода формируется из отдельных разрядов (на каждом из электродов малого диаметра), объединенных на определенном расстоянии от поверхности секционного электрода. Ресурс работы данного секционного электрода, по сравнению с обычным массивным, при том же токе заметно выше.

Что касается технологий выплавки титановых слитков с применением нерасходуемых электродов, то отметим следующее. Дуговой переплав в аргоне или гелии и ВДП титана нерасходуемым электродом в медном охлаждаемом кристаллизаторе применяли на ранних этапах развития технологии получения титановых слитков. Из-за загрязнения слитка включениями материала электрода, мелкой металлической ванны и сложности подачи легирующих компонентов в нужном соотношении, образования неоднородности как по сечению, так и по высоте слитка, плохого проплавления, а следовательно, и плохой поверхности слитка (при обдирке в стружку уходило до 25 % металла [1]); неэффективного использования выделяемой дугой энергии (примерно треть ее уходит на нагрев нерасходуемого электрода, а по мере снижения остаточного давления это количество увеличивается), медленного плавления шихты, применяли такие способы недолго.

В результате совершенствования технологии дуговой плавки начали применять способ ВДП расходного электрода, описанный ранее, а также вакуумно-дуговую гарнисажную плавку. При ВДП в гарнисаже можно обеспечить большую ванну жидкого металла, что дает возможность использовать этот способ для производства не только слитков, но и фасонных отливок. Особенности теплофизических процессов при плавке в гарнисаже таковы, что накопление необходимого количества жидкого ме-



тала нужно получить без заметного перехода его в твердую фазу (гарнисаж), т. е. с минимальными потерями. Для этого требуется вести процесс с большей скоростью плавки при высокой удельной мощности дуги. Гарнисажные вакуумно-дуговые печи могут работать как с нерасходуемым, так и с расходуемым электродами и их комбинацией. Плотность тока в гарнисажных печах в 1,5... 2,0 раза выше таковой в печах для выплавки слитков. Объем жидкого металла в тигле непрерывно увеличивается, поэтому температурное поле ванны при плавке расходуемого электрода всегда нестационарно, а площадь поверхности раздела фаз также непрерывно увеличивается. Лишь при плавке с нерасходуемым электродом можно достичь стационарного теплового состояния [9].

В гарнисажных печах для плавки титана применяют, как правило, медные или графитовые тигли, установленные в водоохлаждаемом корпусе. При плавке в металлическом тигле толщина гарнисажа может быть довольно малой. При полном проплавлении гарнисажа на хорошо охлаждаемой стенке мгновенно образуется новый слой гарнисажа. Однако в таком тигле тепловые потери больше, чем в графитовом.

При плавке в графитовом тигле толщина гарнисажа должна быть достаточно большой для предотвращения науглероживания расплава путем диффузии углерода через гарнисаж. На практике толщина гарнисажа при плавке в графитовом тигле должна составлять не менее 12... 15 мм. Расплавление нового металла обычно производят в уже имеющемся гарнисаже, который в процессе плавки непрерывно прогревается. В начале плавки толщина гарнисажа может несколько увеличиваться, а затем (по мере прогрева) уменьшаться. Плавку ведут таким образом, чтобы толщина гарнисажа от плавки к плавке не изменялась.

Условия охлаждения гарнисажа на дне и боковых стенках тигля неодинаковы. На донной поверхности гарнисаж обычно хорошо сплавлен с тиглем, на боковой поверхности — хуже. В местах контакта гарнисажа и тигля образуется большое количество мелких пор. Из-за наличия пор, плохого охлаждения гарнисаж может проплавиться, и расплав вступит в контакт с тиглем. С учетом толщины гарнисажа на дне и боковых стенках тигля, а также мощности установки определяют размеры тигля. Для печей малой и средней емкости (до 250 кг) отношение диаметра тигля к его высоте выбирают равным трем, а для печей большей емкости — двум. При правильном выборе соотношения между размерами тигля и мощностью печи жидкий металл может составлять 80 % и более его общего количества в печи. В тигле обычно перемешивают расплав для усреднения химического состава и температуры. Даже при отсутствии соленоида в гарнисажной печи зафиксировано заметное движение расплава. Расплав интенсивно перемешивается и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях.

Гарнисажная плавка — один из способов, где процессы плавления и кристаллизации металла разделены во времени. Поэтому многие дефекты структуры слитка, связанные одновременно с плавлением и кристаллизацией металла в одном устройстве, не обнаружены. Для слитков, полученных этим способом, характерны обычные литейные дефекты, усугубленные трудностями контроля количества и температуры металла.

В результате совершенствования гарнисажной плавки появились печи с промежуточной емкостью или подовые гарнисажные печи. В них плавку ведут в отдельной, довольно широкой емкости, металл из которой сливается в неохлаждаемую изложницу. Плавка в подовой гарнисажной печи названа процессом ГРЭ.

Получение титановых слитков с помощью процесса ГРЭ — одна из технологических схем плавильно-литейного производства ВСМПО. По такой схеме изготавливают слитки для последующего переплава способом ВДП наряду с традиционным переплавом расходуемого электрода, прессованного из титановой губки [36]. Использование печей ГРЭ позволило ВСМПО вовлечь в оборот большое количество отходов собственного производства, образующихся при изготовлении изделий из титана.

Плазменно-дуговая технология производства титановых слитков, в отличие от ВДП, характеризуется заметным преимуществом — наличием независимого источника теплоты, т. е. плазмотрона, позволяющего регулировать продолжительность пребывания металла в жидком состоянии, глубину и форму металлической ванны и, таким образом, целенаправленно воздействовать на ход металлургических процессов, затвердевание металла.

Подобно процессу ВДП, при ПДП, как правило, применяют источники питания постоянного тока. Это связано с тем, что наибольшую стойкость нерасходуемого электрода (плазмотрона) и стабильность параметров плазменной дуги отмечают при питании плазмотронов постоянным током при прямой полярности. Использование постоянного тока для питания нерасходуемых электродов нецелесообразно при создании крупных плазменных печей для выплавки слитков из-за негативного влияния ферромагнитных масс, расположенных вблизи короткой сети печи, а также взаимодействия магнитных полей нескольких, одновременно горящих, плазменных дуг [4]. С учетом стойкости нерасходуемого электрода мощность плавильных печей повышают не за счет возрастания единичной мощности плазмотрона, а путем увеличения количества плазмотронов. Применение нескольких плазмотронов, возможность отдельного изменения их мощности, а следовательно, и скорости плавления металла придает процессу ПДП большую технологическую гибкость. Однако наличие нескольких одновременно горящих плазменных дуг постоянного тока из-за взаимодействия их магнитных полей приводит к резкому ухудшению стабильности парамет-



ров процесса, к изменению заданного положения дуг в плавильном пространстве, интенсивному вращению металлической ванны. Поэтому в плазменных комплексах мощностью в несколько мегаватт применяют источники переменного тока с трехфазной схемой питания [37]. При использовании источников переменного тока основные затруднения вызывает изменение условий горения дуги при регулярной смене ее полярности, а также увеличение тепловой нагрузки нерасходуемого электрода в те полупериоды, когда на него подается анодный потенциал. Обеспечить устойчивость плазменной дуги переменного тока удастся за счет применения источников питания со значительным запасом напряжения холостого хода по отношению к рабочему напряжению дуги.

Технологические схемы ПДП предусматривают переплав как расходуемой заготовки, так и некомпактной шихты. Собственно ПДП расходуемой заготовки — это использование наряду с нерасходуемыми электродами (плазмотронами) расходуемого электрода, при подготовке к плавке которого возникают изложенные выше проблемы. Кроме того, при ПДП необходимо использовать (особенно в одноплазмотронных печах с горизонтальной подачей заготовки) сравнительно тонкие и поэтому более трудоемкие в изготовлении и дорогостоящие расходуемые заготовки. Как отмечалось в работе [4], способу ПДП при переплаве расходуемой заготовки, трудно составить конкуренцию способам ВДП и ЭШП. Энергетическая эффективность ПДП ниже, оборудование для него сложнее, требуется применение инертных дорогостоящих газов. Экономически целесообразнее использовать способ ПДП для выплавки слитков из шихтовых материалов. Применительно к выплавке слитков из титана такая технология была реализована еще 30 лет назад [38–40]. Созданы оборудование и технологический процесс ПДП шихты, на 100 % состоящей из кондиционных отходов. Как показали многочисленные исследования [38, 39, 41, 42], титановая губка мелких фракций, литейные отходы титана, а также отходы в виде стружки и обрезки могут быть переплавлены способом ПДП в слитки первичного и вторичного титана и его сплавов.

Как и в любом процессе ПДП, остаются нерешенными проблемы, связанные с применением плазмообразующих газов, использование которых не только усложняет оборудование ПДП, но и увеличивает расходы на переплав. А ведь важным экономическим аспектом производства и применения титана является снижение стоимости его переделов.

В плазменно-дуговых печах небольшой мощности расход газа невелик и его обычно не утилизируют после выхода из камеры. С увеличением мощности и количества плазмотронов в печи расход газа возрастает, а сбрасывать его в атмосферу невыгодно. Для многократного использования газа плазменно-дуговые печи оборудуют системами рециркуляции,

предусматривающими очистку газа от твердых и газообразных примесей, загрязняющих его в процессе переплава металла. Чем меньше в плазмообразующем газе нежелательных примесей, тем выше может быть чистота переплавленного металла.

При переплаве титана в качестве плазмообразующего газа, как правило, используют аргон, исходная степень загрязненности которого может превышать допустимые пределы [23]. Особенно это касается содержания в нем водяных паров. Кроме того, при подготовке к плавке (откачка воздуха из камеры печи форвакуумным насосом и двукратная «промывка» его аргоном) в плавильном пространстве остается около 0,1 % кислорода и 0,5 % азота.

В процессе переплава титана, особенно губки, атмосфера печи насыщается удаляемыми из него газообразными примесями и солями. Для поддержания инертной атмосферы в камере печи создаются условия так называемого динамического химического вакуума. «Грязный» аргон удаляется в систему регенерации, а на его место поступает новый, очищенный. Чаще всего ПДП проводят при атмосферном давлении или немного выше для предотвращения подсоса воздуха в печь. С точки зрения взаимодействия нежелательных газообразных примесей, присутствующих в камере печи с расплавом титана, целесообразно поддерживать не атмосферное или избыточное давление в камере печи, а некоторое разрежение (около 300...400 мм рт. ст.). Однако создать такое разрежение можно только в плазменно-дуговых печах небольшой емкости, работающих со сбросом отработанных газов в атмосферу. На крупных печах ПДП для работы систем рециркуляции плазмообразующего газа требуется поддержание избыточного давления в камере печи. Если сравнивать чистоту металла, то переплавленный в аргоне металл больше загрязнен азотом и неметаллическими включениями, чем в случае ВДП [4].

ЭШП с использованием нерасходуемого электрода применяется, как правило, для переплава шихтовых материалов, утилизации стружки, мелкой обрезки. Применяют такой процесс и для подпитки, обогрева и выплавки слитков, а также рафинирования металла [43, 44].

Еще 50 лет назад в процессе изучения применимости электрошлакового процесса для получения титановых слитков сравнивали эффективность ЭШП титана с расходуемым и неплавящимся (нерасходуемым) электродом [11]. Результаты такого сравнения представлены в табл. 2.

При выплавке небольших (диаметром 90 мм) слитков титана с использованием металлического водоохлаждаемого нерасходуемого электрода диаметром 30 мм затраты электроэнергии оказались непомерно большими, а производительность недостаточной. Также отмечена недостаточная стойкость нерасходуемого электрода. К сожалению, авторы не указали материал, из которого изготовлен нерасходуемый электрод, но, по-видимому, это был медный водоохлаждаемый электрод. Из табл. 2 видно,



Таблица 2 [11]. Техничко-экономические показатели ЭШП слитков титана диаметром 90 мм расходуемым и неплавящимся электродами

Режим плавки	Расходуемый электрод	Неплавящийся электрод
Ток, А	2500... 2700	1600
Напряжение, В	23... 25	24... 26
Диаметр электрода, мм	60	30
Глубина шлаковой ванны, мм	25... 30	25... 30
Скорость, кг/ч	40,5	3,6
Удельный расход электроэнергии, (кВт·ч)/кг	1,62	11,2

что ток плавки примерно в 1,6 раз ниже при использовании нерасходуемого электрода, чем расходуемого титанового большего (60 мм) диаметра.

Применение нерасходуемого электрода меньшего диаметра, по всей вероятности, связано с удобством подачи в зазор между электродом и стенкой кристаллизатора шихтовых материалов, однако такое сравнение не совсем корректно. Уменьшение диаметра нерасходуемого электрода привело к существенному увеличению плотности тока в нем. Процессы электрокоррозии и электроэрозии такого электрода в расплавленном шлаке, по-видимому, были настолько интенсивными, что увеличение тока выше указанного уровня сочли нецелесообразным. Более низкое значение тока, а также наличие водоохлаждаемого электрода в центре шлаковой ванны, приводящее к дополнительным тепловым потерям, обусловили снижение скорости плавления переплавляемого металла, а следовательно, повышение удельного расхода электроэнергии. Использование нерасходуемых электродов при классической схеме ЭШП вообще и ЭШП титана, в частности, сочли тогда нерациональным [1].

Однако разработка новых конструкций нерасходуемых электродов [45] и более поздний опыт использования металлических водоохлаждаемых электродов в электрошлаковых процессах [46–48] показали, что этот способ, не уступая обычному ЭШП с применением расходуемого электрода по качеству полученного металла, превосходит его по технологическим возможностям [47]. Наиболее рациональной конструкцией водоохлаждаемого нерасходуемого электрода считают конструкцию со сменными наконечниками. Такие наконечники, к медному корпусу которых по торцевой и боковой поверхностям припаивают молибденовые и вольфрамовые прутки (конструкция, по всей видимости, была заимствована из опыта ПДП), обеспечивают ресурс работы при максимальных нагрузках до 300 ч. Электроды просты в обслуживании, надежны в эксплуатации и обеспечивают стабильное ведение электрошлакового процесса.

Необходимо отметить, что электрошлаковый процесс с использованием металлических нерасходуемых электродов ведут таким образом, чтобы постоянно поддерживать слой шлакового гарнисажа,

«намороженного» на наконечнике водоохлаждаемого электрода. При несоблюдении энергетических режимов шлаковый гарнисаж расплавляется, наконечник работает в контакте с жидким шлаком, в результате чего его ресурс сокращается и появляется вероятность загрязнения расплава материалом наконечника. Применение таких нерасходуемых электродов при выплавке ферротитана описано в работе [49]. Как отмечается в этой статье, содержание титана по диаметру слитка во многом зависит от схемы подвода тока к шлаковой ванне. В данном случае более равномерного его распределения достигали при монофилярной схеме подвода с расщепленным электродом, при которой обеспечивали равномерное выделение теплоты в шлаковой ванне, лучшие условия для плавления металла и передачи теплоты к металлической ванне. Замеры глубины последней показали, что при монофилярной схеме она в 1,2... 1,5 раза больше, чем при бифилярной и к тому же увеличивается у стенок кристаллизатора, что способствует усреднению состава ферротитана в этой зоне.

Отмечена необходимость использования шлаков с большим электрическим сопротивлением, когда достигаются более высокие значения температуры шлака, производительность переплава и меньший расход электроэнергии. Промышленная реализация процесса электрошлакового переплава с применением нерасходуемых водоохлаждаемых электродов для производства ферротитана осуществлена на ВСМПО. В настоящее время ферротитан на ВСМПО получают электрошлаковым способом [36].

К способам ЭШП с использованием нерасходуемого электрода следует, вероятно, отнести и переплав в токоподводящем кристаллизаторе [50, 51]. Верхняя токоподводящая секция такого кристаллизатора является нерасходуемым электродом, эрозия которого с учетом значительно большей площади рабочей поверхности существенно ниже, чем у обычного медного электрода относительно малого диаметра, расположенного по центру шлаковой ванны. Но и в этом случае для защиты от электроэрозии и электрокоррозии иногда применяют защитные покрытия токоподводящей поверхности [52].

Авторы одной из первых конструкций токоподводящего кристаллизатора [51] в качестве защит-





ного покрытия предложили применять вольфрам, молибден или графит. Разработка различных технологических процессов в кристаллизаторе, особенно процессов с заливкой жидкого металла [53], привела к появлению биметаллических конструкций с защитой медной токоподводящей поверхности относительно тонким слоем углеродистой стали [52, 54]. В случае плавки титана и его сплавов в качестве защитного покрытия может быть использован титан.

Применение токоподводящего кристаллизатора для плавки титановой губки описано в работах [55, 56]. Плавку проводят в камерной печи в аргоне. Необходимо отметить, что при переплаве губки в токоподводящем кристаллизаторе целесообразно использовать шлак с более высокими значениями температуры плавления и электросопротивления, чем у обычно применяемого для этих целей фтористого кальция. С увеличением диаметра кристаллизатора из-за недостаточной температуры шлаковой ванны могут возникать проблемы с плавлением губки, нерасплавившиеся части которой скапливаются в формирующей части кристаллизатора. Для интенсификации процесса плавления губки можно использовать двухконтурную схему переплава [57, 58], один из вариантов которой представляет собой комбинацию процессов переплава в токоподводящем кристаллизаторе и переплава с использованием нерасходуемого электрода, расположенного по центру шлаковой ванны. Возможность использования такой схемы для переплава титановой губки указана в работе [56]. Наличие дополнительного медного водоохлаждаемого электрода возвращает нас к проблемам, связанным с его стойкостью, тепловой эффективностью процесса и прочим проблемам, описанным ранее. При двухконтурной схеме переплава целесообразнее использовать расходуемый электрод.

Вообще отказаться от применения как расходных, так и нерасходуемых электродов позволяют различные способы индукционного и электроннолучевого переплава. Эти способы, а также перспективы развития титановой промышленности будут рассмотрены в третьей части.

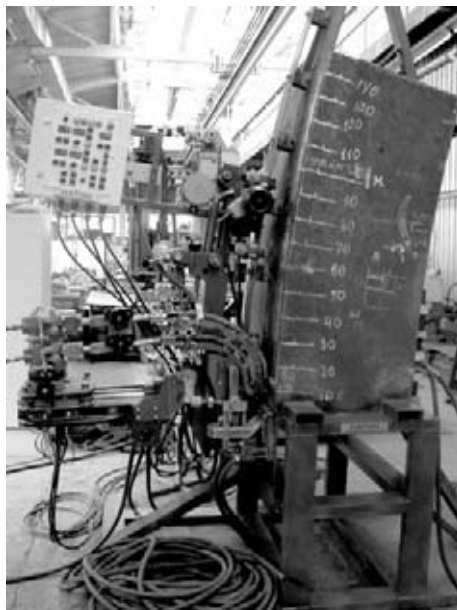
1. *Металлургия титана* / В. А. Гармата, Б. С. Гуляницкий, В. Ю. Крамник и др. — М.: Металлургия, 1967. — 643 с.
2. *Титан* / В. А. Гармата, А. Н. Петрунько, Н. В. Галицкий и др. — М.: Металлургия, — 1983. — 559 с.
3. *Получение* слитков титана и его сплавов путем переплава непосредственно титановой губки и скрапа / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, В. И. Кумыш // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1995. — № 3. — С. 14–23.
4. *Латаш Ю. В., Матях В. Н.* Современные способы производства слитков особо высокого качества. — Киев: Наук. думка, 1987. — 336 с.
5. *Металлы и сплавы.* Справочник / Под ред. Ю. П. Солнцева. — СПб: НПО «Профессионал», 2003. — 163 с.
6. *Плавка и литье титановых сплавов* / Н. Ф. Аношкин, С. Г. Глазунов, Е. И. Морозов и др. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.
7. *К вопросу о возможности переплава губчатого титана с повышенным содержанием техногенных примесей. Сообщение 1* / М. Л. Жадкевич, Ю. В. Латаш, И. В. Шейко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1997. — № 1. — С. 55–60.
8. *Величко Т. Л., Гуттерман К. Д., Волохонский Л. А.* Вакуумная дуговая плавка металлов и сплавов на переменном токе // Электроотермия. — 1968. — Вып. 4. — С. 17–19.
9. *Волохонский Л. А.* Вакуумные дуговые печи. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 232 с.
10. *Гуревич С. М., Дидковский В. П.* Вопросы электрошлаковой выплавки слитков титана // Техн. бюллетень. — 1958. — № 1. — С. 3–6.
11. *Гуревич С. М., Дидковский В. П., Новиков Ю. К.* Электрошлаковая выплавка слитков титановых сплавов // Автомат. сварка. — 1963. — № 10. — С. 37–42.
12. *Электрошлаковые печи* / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1976. — 414 с.
13. *Электрошлаковая выплавка титановых слитков в бескамерной печи ЭШП* / Б. И. Медовар, В. Г. Попов, Л. В. Чекотило, Е. Ш-М. Гисер // Спец. электрометаллургия. — 1978. — № 8. — С. 41–45.
14. *Патон Б. Е., Медовар Б. И., Медовар Л. Б.* ЭШП: каким ему быть в ближайшее десятилетие // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1996. — № 3. — С. 9–10.
15. *Электрошлаковая выплавка плоских слитков титана и его сплавов* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Г. Попов, Л. В. Чекотило // Там же. — 1975. — Вып. 28. — С. 36.
16. *О новом подходе к конструкции камерных печей ЭШП* / Л. Б. Медовар, А. А. Троянский, В. Я. Саенко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 2. — С. 15–17.
17. *Протокилов И. В.* Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка многокомпонентных титановых сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 2006. — 20 с.
18. *Котлан Я. Ю., Щербинин Э. В.* Электрошлаковые сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
19. *Павлючук Г. А., Майоренко В. М., Стулак Л. М.* Электрошлаковая выплавка слитков титана // Спец. электрометаллургия. — Киев: Наук. думка, 1972. — Ч. 1. — С. 148.
20. *Оценка эффективности применения флюсового затвора при выплавке слитков из высокопрочных титановых сплавов в бескамерных печах ЭШП* / В. Я. Саенко, А. Г. Богаченко, Л. Б. Медовар и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1994. — № 3–4. — С. 3–6.
21. *Нафziger Р. Х.* Шлаки для электрошлаковой выплавки титана и режимы плавки // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1971. — С. 202–218.
22. *Евсеев П. П., Филиппов А. Ф.* Электропроводность шлаков // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1965. — № 3. — С. 74.
23. *Электрошлаковый металл* / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
24. *ESR as fast technique to dissolve nitrogen rich inclusions in titanium* / M. G. Benz, P. J. Meschter, J. P. Nic et al. // Innovations in materials conf. (Washington, July, 20–22, 1998). — Washington, 1998. — P. 212–218.
25. *Dissolution of nitrogen-rich inclusions in titanium alloys by active slag ESR refining* / M. G. Benz, P. J. Meschter, J. P. Nic et al. // Proc. XITC-98 (Xian, China, Sept. 15–18, 1998). — Xian, 1998. — P. 327–332.
26. *Медовар Л. Б., Бенц М. Дж.* Токоведущий кристаллизатор для электрошлакового рафинирования титановых сплавов с независимым управлением температурой шлака, скоростью вращения шлака и скоростью расплавления электрода // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1998. — № 4. — С. 13–15.
27. *А. с. 520784 СССР, МПК В22d 23/06 НВЗФ.* Способ переплава расходного электрода / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Лакомский и др. — Опубл. 05.07.82; Бюл. № 20.
28. *Тетюхин В. В.* Плавление титана электрической дугой под слоем расплавленного флюса // Титан в промышленности: Сб. ст. — М.: Оборонгиз, 1961. — 328 с.
29. *Переплав губчатых расходных электродов методами ЭШП и ДШП* / Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, В. И. Кумыш и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1994. — № 3–4. — С. 7–11.
30. *Оценка эффективности применения флюсового затвора при выплавке слитков из высокопрочных титановых сплавов в бескамерных печах ЭШП* / В. Я. Саенко, А. Г. Богаченко, Л. Б. Медовар и др. // Там же. — 1994. — № 3–4. — С. 3–6.
31. *Дугошлаковый переплав титана и титановых сплавов* / Б. И. Медовар, В. В. Шепелев, В. Я. Саенко, Ю. М. Погарин // Там же. — 1992. — № 2. — С. 13–15.



32. *Дуговые* источники нагрева с нерасходуемыми электродами / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник и др. // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 4. — С. 29–33.
33. *Pat. 2014412* Англия, H05B 7/18. Generating plasma in arc torch / В. Е. Патон, G. A. Melnik, J. V. Latash et al. — Publ. 17.04.1982.
34. *Трехфазные* плазменные нагревательные комплексы и перспективы их применения / Б. Е. Патон, Ю. В. Латаш, О. С. Забарыло и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 2. — С. 53–57.
35. *Коротев А. С.* Электродуговые плазмотроны. — М.: Машиностроение, 1980. — 174 с.
36. *www.vsmpro.ru.*
37. *Трехфазные* плазменные нагревательные комплексы и перспективы их применения / Б. Е. Патон, Ю. В. Латаш, О. С. Забарыло и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1985. — № 1. — С. 50–55.
38. *Получение* вторичного титана методом плазменно-дугового переплава / В. И. Лакомский, О. С. Забарыло, А. В. Жердев и др. // Там же. — 1976. — Вып. 4. — С. 94–96.
39. *Некоторые* исследования выплавки слитков вторичного титана на установке У-599 / В. В. Должиков, Ю. В. Латаш, С. Я. Шехтер и др. // Там же. — 1983. — Вып. 18. — С. 85–88.
40. *Опробование* технологии плазменной выплавки и прокатки листовых слитков из отходов губчатого титана / Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, В. П. Макаренко и др. // РЖ Металлургия. — 1994. — № 12. — С. 212.
41. *Лакомский В. И.* Плазменно-дуговой переплав. — Киев: Техніка, 1974. — 336 с.
42. *Исследование* качества вторичного титанового сплава ТВ-4К, полученного способом плазменно-дугового переплава / В. В. Должиков, Ю. В. Латаш, О. С. Забарыло и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 14. — С. 92–94.
43. *Биктагиров Ф. К.* Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщение 1 // Там же. — 2002. — № 4. — С. 11–17.
44. *Биктагиров Ф. К.* Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщение 2 // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 1. — С. 5–9.
45. *Разработка* и исследование нерасходуемых металлических охлаждаемых электродов для электрошлакового процесса / В. А. Яковенко, Е. В. Буцкий, В. Н. Ярулин, С. В. Богданов // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 2. — С. 16–21.
46. *Электролитическое* рафинирование электролитического марганца на установке УО-105 / Ю. В. Латаш, В. А. Яковенко, И. Ю. Лютый и др. // Там же. — 1989. — № 2. — С. 14–21.
47. *Электрошлаковый* переплав отходов жаропрочных сплавов с применением охлаждаемых нерасходуемых электродов / Ю. В. Латаш, В. А. Яковенко, Е. В. Буцкий и др. // Там же. — 1990. — № 2. — С. 10–15.
48. *Лютый И. Ю., Латаш Ю. В.* Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов. — Киев: Наук. думка, 1982. — 198 с.
49. *Получение* ферротитана путем электрошлакового переплава титановой и стальной стружки / Ю. В. Латаш, В. А. Яковенко, С. В. Кравцов и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1991. — № 3. — С. 50–53.
50. *Ксендзык Г. В.* Электрошлаковый переплав стружки высоколегированной стали в токоподводящем кристаллизаторе // Повышение качества и эффективности процессов сварки и наплавки: Сб. ст. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 67–68.
51. *Pat. 4,185,682 USA*, МПК В22, В 27/02. Electroslag remelting & surfacing apparatus / G. V. Ksendzyk, I. I. Frumin, V. S. Shirin. — Publ. 29.01.80.
52. *Цыкуленко К. А., Федоровский Б. Б., Цыкуленко А. К.* Применение биметаллических и огнеупорных материалов в конструкциях кристаллизаторов ЭШП // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 1. — С. 17–20.
53. *Electroslag* processes without consumable electrodes / V. I. Medovar, L. B. Medovar, A. K. Tsykulenko et al. // Proc. of the Intern. symp. on liquid metal processing & casting (Santa Fe, New Mexico, February 16–19, 1997). — Santa Fe, 1997. — P. 114–121.
54. *Рекламные материалы НКМЗ* // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 2. — 2-я стр. обл.
55. *Medovar V. I., Medovar L. B.* Electroslag melting of titanium sponge in a current-conductive mould // Proc. of the 1997 Intern. symp. on liquid metal processing & casting (Santa Fe, New Mexico, February 16–19, 1997). — Santa Fe, 1997. — P. 270–274.
56. *ЭШП титана: вчера, сегодня, завтра* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, М. Г. Бенц и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1999. — № 2. — С. 3–8.
57. *К вопросу* об электрошлаковой выплавке крупнотоннажных заготовок из высоколегированных сталей и сплавов / Б. И. Медовар, Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко и др. // Там же. — 1999. — № 2. — С. 26–30.
58. *Двухконтурная* схема электрошлакового переплава расходоуемого электрода / А. К. Цыкуленко, И. А. Ланцман, Л. Б. Медовар и др. // Там же. — 2000. — № 3. — С. 16–20.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 10.01.2007

### Техническая характеристика аппарата АШ 115 М



Толщина свариваемых кромок, мм	40... 200
Количество электродов, шт.	2
Диаметр электродной проволоки, мм	3; 4
Значение сварочного тока на один электрод при ПВ = 100 %, А	до 800
Скорость подачи электродов, м/ч	80... 450
Схема подачи электродов	автономная
Скорость вертикального перемещения, м/ч	0,6... 12,0
Разворот электродов при ЭШС наклонных стыков, град	С25
Корректировка положения электродов:	
вдоль разделки	С60
поперек разделки	С20
Тяговое усилие ходового механизма, кг	У800
Амплитуда колебаний, мм	100
Направляющий рельс	гибкая полоса с эвольвентной зубчатой рейкой