



## АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕПЛАВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

И. В. Шейко, В. А. Шаповалов, В. С. Константинов

Представлены данные о применении индукционной плавки в секционном кристаллизаторе для рафинирования и утилизации отходов титана и его сплавов.

Data on application of induction melting in a sectional mould for refining and utilization of waste titanium and its alloys are presented.

**Ключевые слова:** индуктор; электромагнитное поле; титан; металлическая ванна; слиток; секционный кристаллизатор; титан; титановая губка

Титан и его сплавы являются незаменимыми конструкционными материалами во многих областях новой техники, например в случаях, когда уменьшение массы имеет большое значение, а также в химическом машино- и судостроении, где требуется высокая коррозионная стойкость в химически активных средах, в том числе и морской воде. Поэтому несмотря на высокую стоимость титановой металлопродукции с каждым годом возрастает ее потребление промышленностью.

Получение металлического титана (титановой губки), служащего основой для производства сплавов, литых и деформированных изделий, является многостадийным и весьма энергоемким химико-металлургическим процессом, требующим применения дорогостоящих оборудования и реагентов. В результате из сравнительно дешевого и довольно распространенного природного сырья получают металл, стоимость которого значительно выше, чем у стали, алюминия, меди и других цветных металлов.

Основными этапами производства металлического титана являются следующие:

выплавка титанового шлака в руднотермической печи из ильменитового концентрата;

хлорирование полученного шлака в хлораторах с расплавом солей;

очистка четыреххлористого титана  $TiCl_4$  путем химической обработки, ректификации и дистилляции;

магнийтермическое восстановление с получением первичного металлопродукта (губчатого титана);

вакуумная дистилляция (сепарация) губчатого титана от техногенных примесей (в основном хлоридов магния);

прессование расходуемых электродов из очищенного губчатого титана;

переплав электродов в вакуумно-дуговых печах с получением слитков технически чистого титана и сплавов на его основе.

Наиболее энергоемкой стадией в технологической цепочке производства титановой губки является вакуумная дистилляция, предусматривающая нагрев полученной массы до температуры 1000...1020 °С в вакууме и выдержка ее при этой температуре в течение нескольких десятков часов [1–4].

Остаточное содержание хлора и других примесей в титановой губке регламентируется соответствующими стандартами (ГОСТ 17746–72), согласно которым количество хлора в губке марок ТГ90–ТП20 не должно превышать 0,08 мас. %. Для получения такого количества хлора в титановой губке требуется длительное время выдерживать реакционную массу в аппаратах при высокой температуре, что приводит к значительному расходу электроэнергии, снижению производительности и ресурса работы аппаратов вакуумной дистилляции [4].

В процессе производства титановой губки образуется около 10 % отходов, имеющих различный фракционный состав и повышенное содержание газовых и техногенных примесей [1, 3, 5]. Анализ различных партий титановой губки марки ТГ–ТВ свидетельствует о том, что часть ее (около 60 %) можно использовать для выплавки титановых слитков, а в дальнейшем — в качестве расходуемых электродов, например при отливке корпусов и деталей запорной арматуры для химического машиностроения [6]. Данные о содержании примесей в титановой губке, согласно ГОСТ 17746–72, приведены в табл. 1.



Таблица 1. Химический состав и твердость губчатого титана (ГОСТ 17746–72)

Марка титана	Массовая доля примесей, %, не более						HB, не более
	Fe	Si	C	Cl	[N]	[O]	
ТГ-90	0,06	0,01	0,02	0,08	0,02	0,04	90
ТГ-100	0,07	0,02	0,03	0,08	0,02	0,04	100
ТГ-110	0,09	0,03	0,03	0,08	0,03	0,05	110
ТГ-120	0,11	0,03	0,04	0,08	0,03	0,06	120
ТГ-130	0,13	0,04	0,04	0,10	0,03	0,08	130
ТГ-150	0,20	0,04	0,05	0,20	0,04	0,10	150
ТГ-ТВ	2,00	–	0,05	0,30	0,30	–	–
ТГ-ТВ (ЗТМК)*	0,34	0,026	0,025	0,07	0,105	0,125	–

\*Приведены среднестатистические данные по 20 партиям производимой титановой губки ЗТМК.

Из табл. 1 видно, что содержание примесей в некондиционной губке ТГ-ТВ, полученной на Запорожском титаномагниеком комбинате (ЗТМК) довольно высокое, хотя и ниже уровня, допускаемого стандартом. Следовательно, губка этой марки может быть использована в качестве шихты для выплавки слитков и получения литых изделий неотвеченного назначения.

Кроме того, значительное количество титановых отходов в виде стружки и обрезки образуется на предприятиях химического машиностроения. Большинство из них является кондиционным металлом, химический состав которого соответствует марочному. Таким образом, отходы могут вовлекаться в шихту при производстве слитков и литых изделий.

Ограниченное количество отходов в виде стружки, скрапа и пр. (не более 30 %) может быть смешано с металлической титановой губкой и скомпактировано в брикеты или расходные электроды для последующего переплава. Эта технология широко применяется в промышленности, однако является сложной, дорогостоящей и существенно увеличивающей стоимость титановой металлопродукции. А самый главный недостаток заключается в невозможности полного вовлечения отходов при выплавке слитков, особенно на предприятиях машиностроительного комплекса. Весьма заманчивыми являются попытки многих исследователей использовать процесс индукционной плавки в секционном кристаллизаторе (ИПСК) для получения титановых слитков с применением различной шихты, в том числе ранее не используемой для выплавки титаносодержащих ферросплавов [7–10].

Индукционная плавка с формированием слитка в секционном кристаллизаторе, как и индукционная плавка в холодном тигле, в настоящее время еще не заняла устойчивую нишу в области специальной электрометаллургии. Имеющиеся в литературе сведения можно охарактеризовать как поиск возможных путей использования этого способа для рафинирования различных металлов и сплавов (преимущественно высокорекреационных в жидком состоянии), утилизации различных видов дорогостоящих металлоотходов и выплавки сложнолегирован-

ных сплавов высокого качества из компонентов с резкими физическими отличиями (плотность, температура плавления и кипения и др.).

Важной особенностью ИПСК является то, что плавление шихты и кристаллизация слитка происходят в электромагнитном поле большой интенсивности, вызывающем энергичное перемешивание металлического расплава. Интенсивная циркуляция металла является одним из важнейших достоинств этого процесса, поскольку обеспечивает выравнивание температуры и химического состава в объеме ванны, ускоряет расплавление шихты и способствует активному взаимодействию металла со шлаком.

Первые сведения о применении ИПСК для выплавки титановых слитков относятся к 1960–1970-м гг. В лаборатории «Бюроу оф майнз» (США) под руководством П. Клайтса и Р. Билла опробована выплавка слитков из титанового скрапа с применением бескислородного флюса (фтористого кальция), подаваемого в ходе плавки в кристаллизатор вместе с титановой губкой [8]. Расплавляясь, фтористый кальций образовывал в зоне отжата металлической ванны кольцевую шлаковую ванну, способствующую получению тонкого шлакового гарнисажа на охлаждаемой стенке кристаллизатора. Этот гарнисаж предотвращал шунтирование секции кристаллизатора металлом и (как при электрошлаковом переплаве) изолировал слиток от охлаждаемой стенки кристаллизатора.

Общее количество фторида кальция составляло около 4 % массы металлической шихты. Используемый в этом процессе фтористый кальций не только не обеспечивал удаление примесей из титана, а наоборот, имеющиеся в нем примеси переходили в слиток. Поэтому его подвергали переплаву в вакууме с тем, чтобы свести к минимуму загрязнение титана.

Сравнительный химический анализ выплавленных слитков с металлом вакуумно-дуговой плавки показал, что первые имеют более высокое содержание контролируемых примесей, особенно кремния, железа и водорода [8]. В результате показатели таких физико-механических характеристик, как твердость, временное сопротивление и предел текучести были несколько выше, а относительное удлинение

**Таблица 2. Содержание примесей в слитках, выплавленных из титановой губки марки ТГ-ТВ ( $D_{сл} = 105$  мм)**

Характеристика шихты	Место отбора проб	Массовая доля элементов, %			Объемная доля элементов, %			НВ
		Fe	C	Si	[N]	[O]	[N]	
Губка ТГ-ТВ (фракции 2... 12)	Верх	0,33	0,022	0,020	0,098	0,117	0,010	201
	Середина	0,33	0,020	0,018	0,094	0,110	0,008	104
	Низ	0,34	0,024	0,025	0,102	0,124	0,012	212

**Таблица 3. Содержание примесей в слитках, выплавленных из титановой губки различных сортов ( $D_{сл} = 67$  мм)**

Состав шихты, %	Массовая доля примесей, %				
	Fe	C	[N]	[O]	[H]
80 ТГ-100	0,058	0,035	0,012	0,068	0,007
20 ТГ-ТВ					
70 ТГ-100	0,100	0,045	0,018	0,085	0,007
30 ТГ-ТВ					
60 ТГ-100	0,150	0,057	0,025	0,120	0,008
40 ТГ-ТВ					
50 ТГ-100	0,250	0,070	0,035	0,160	0,008
50 ТГ-ТВ					
Регламентируемый техническими условиями для сплава ВТ1-0	0,300	0,070	0,040	0,200	0,010

**Таблица 4. Содержание примесей в слитках, выплавленных из губчатого титана с повышенным содержанием хлорида магния ( $D_{сл} = 67$  мм)**

Место отбора проб	Массовая доля примесей, %			
	Cl	Fe	[N]	[O]
Титан губчатый	0,15	0,28	0,22	1,05
Слиток	0	0,28	0,22	0,24
Титан губчатый	0,30	0,32	0,14	1,10
Слиток	0	0,32	0,15	0,22
Титан губчатый	0,52	0,15	0,14	0,68
Слиток	0	0,17	0,15	0,25

и сужение ниже, чем у титана, выплавленного с применением индукционно-шлаковой технологии. Особенностью металла индукционно-шлаковой выплавки является его пониженная ударная вязкость. К сожалению, авторы не проверили, сохраняется ли эта особенность после переплава полученных расходоуемых электродов в печах ВДП.

Более детальное изучение поведения основных легирующих элементов и примесей в титане при ИПСК проведено в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины [11–14]. Выполненные работы направлены преимущественно на утилизацию отходов титанового производства (титановая губка марки ТГ-ТВ) и машиностроительных предприятий.

О качестве слитков титана, произведенных из титановой губки марки ТГ-ТВ на установке ИПСК, можно судить по данным, приведенным в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что такие примеси, как железо, углерод и кремний, распределены в слитках довольно равномерно и их содержание зависит от исходного количества в титановой губке, т. е. не обнаружено изменение массовой доли этих элементов в слитке, по сравнению с содержанием их в шихте в результате переплава.

Газовые примеси также распределены в объеме слитков весьма равномерно. Повышенное содержание кислорода и водорода в донной части слитков объясняется поглощением их жидким металлом из атмосферы плавильной камеры в начальный период

плавки в результате испарения адсорбированной на стенках плавильной камеры влаги при появлении излучения с поверхности металлической ванны.

Интересные результаты получены при выплавке титановых слитков из некондиционной титановой губки ТГ-ТВ, которую разбавляли высокосортной губкой марки ТГ-100 в различных соотношениях (табл. 3).

Полученные результаты (табл. 3) свидетельствуют о том, что процесс ИПСК позволяет выплавлять слитки, полностью соответствующие требованиям технических условий даже при содержании в шихте 50 % некондиционной титановой губки ТГ-ТВ. Это на 20 % больше, чем в шихте, применяемой при прессовании расходоуемых электродов для вакуумно-дугового переплава.

При производстве губчатого титана наиболее энергоемким этапом его получения является вакуумное рафинирование (сепарация) губчатого титана от хлоридов магния.

В случае сокращения продолжительности этого этапа в губчатом титане остается повышенное количество хлора и магния, могущих значительно превышать уровень, установленный государственным стандартом.

Для оценки возможностей процесса ИПСК с целью удаления указанных примесей использовали титановую губку, содержащую заведомо значительное количество хлора (0,15; 0,30 и 0,52 %) [3].

Результаты исследования химического состава слитков, выплавленных из этой губки, приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, содержание железа и азота в слитках остается на том же уровне что и в исходной титановой губке. В то же время в процессе плавки существенно удаляется кислород, что, по мнению авторов, происходит в результате испарения адсорбированной на поверхности губки влаги в результате вакуумирования плавильной камеры установки, а также нагрева шихты на желобе питателя.

Плавки губчатого титана с повышенным содержанием хлоридов магния сопровождаются бурным газовыделением, о чем свидетельствует барботажная металлической ванны, а в отдельных случаях — локальный выброс расплава в местах погружения кусочков губки к основанию отжатой части ванны.

При переплаве губки с 0,52 %  $Cl_2$  происходит образование конденсата на стенке кристаллизатора выше уровня жидкого титана в виде пленки хлоридов.

На отдельных участках поверхности слитков обнаружили тонкий слой мелкодисперсных возгонов (рис. 1), легко удаляемых при помощи металлической щетки. В целом поверхность слитков удовлетворительная, без явных дефектов.

Особые трудности связаны с переплавом титановой стружки, имеющей чрезвычайно развитую поверхность, на которой при резании образуется тонкая пленка оксидов, и, кроме того, загрязненной смазочными материалами (эмульсией), применяемыми во время механической обработки. Такая стружка, как правило, идет в руднотермические печи на выплавку ферротитана, а также на прессование брикетов, используемых в процессах раскисления стали.

Технологические исследования показали, что при переплаве очищенной должным образом стружки технически чистого титана ВТ1-0 и сплава ВТ5 (промывка в горячем растворе щелочи с последующим обезжириванием в авиационном бензине) можно выплавлять слитки с содержанием примесей, соответствующим требованиям стандарта (табл. 5).

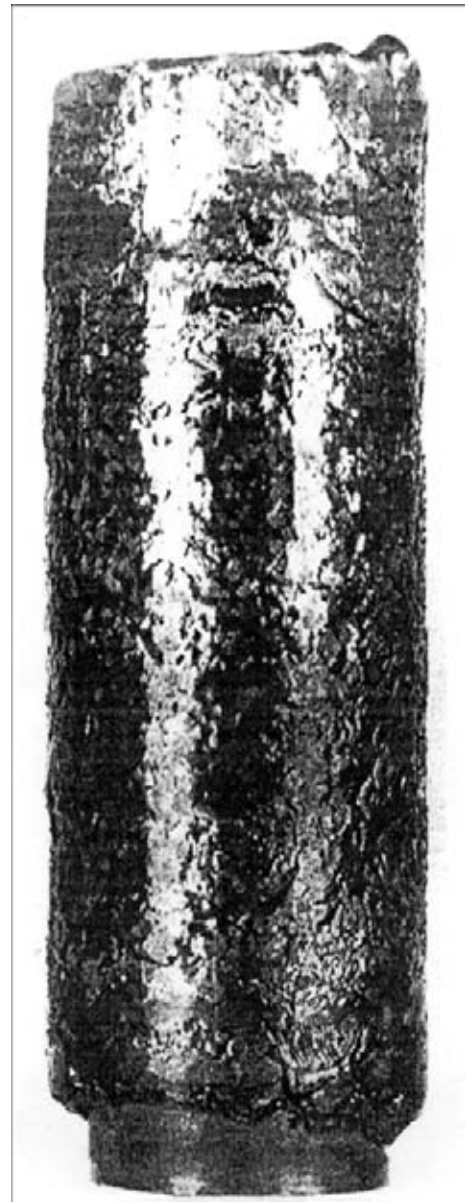


Рис. 1. Общий вид слитка, выплавленного из губчатого титана с содержанием 0,30 % Cl ( $D_{ст} = 67$  мм)

Таблица 5. Содержание примесей в слитках ИПСК, выплавленных из стружки

Марка сплава	Атмосфера в плавильной камере	Массовая доля примесей, %				
		Fe	C	[N]	[O]	[H]
ВТ1-0 (исходный)	—	0,22	0,056	0,04	0,16	0,012
ВТ1-0	Аргон	0,20	0,055	0,04	0,15	0,008
ВТ1-0	Гелий	0,12	0,048	0,03	0,12	0,006
Регламентируемое техническими условиями	—	0,30	0,070	0,03	0,20	0,010
ВТ5 (исходный)	—	0,23	0,052	0,04	0,25	0,009
ВТ5	Аргон	0,23	0,059	0,04	0,25	0,008
ВТ5	Гелий	0,16	0,045	0,03	0,21	0,007
Регламентируемое техническими условиями	—	0,30	0,100	0,05	0,30	0,015

**Таблица 6. Химический состав слитков, выплавленных из отходов гранулированного порошка сплава ВТ5-1 кг**

Газовая атмосфера в плавильной камере	Давление в плавильной камере, МПа	Массовая доля, %							
		легированных элементов		примесей					
		Al	Sn	C	Fe	Si	[O]	[N]	[H]
Аргон	0,05	5,40	2,64	0,018	0,078	Следы	0,086	0,023	0,0045
»	0,10	5,41	2,67	0,018	0,080	»	0,088	0,025	0,0046
Гелий	0,05	5,40	2,63	0,017	0,078	»	0,082	0,016	0,0037
»	0,10	5,41	2,65	0,018	0,079	»	0,085	0,019	0,0430
Исходный металл	–	5,42	2,68	0,018	0,080	0,01	0,080	0,011	0,0050
ТУ91-1-192-87	–	4,0... 5,5	2,00... 3,00	0,005	0,200	0,10	0,120	0,040	0,0080

Значительное количество кондиционных отходов титановых сплавов образуется при гранульной технологии, разработанной сравнительно недавно и нашедшей применение в авиационной и ракетно-космической технике для изготовления деталей ответственного назначения, таких как крыльчатки, турбины, корпуса различной сложности из жаропрочных сплавов, в том числе и на основе титана.

Высокая скорость кристаллизации гранулированных порошков  $4 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$  град/с, производимых преимущественно способом центробежного распыления расходуемых заготовок, оплаваемых низкотемпературной плазмой в инертном газе, обеспечивает получение однородной мелкозернистой структуры, равномерность распределения фазовых составляющих сплавов и возможность введения в них легирующих компонентов в количестве, недоступном традиционными способами литья.

Одной из проблем является сложность производства гранулированных порошков, а в ряде случаев и отсутствие эффективных технологий переработки образующихся отходов, представляющих собой кондиционный по химическому составу металл, но не соответствующий гранулометрии [15–18]. Доля этих отходов в общем балансе расхода металла достигает 35... 40 %.

В этой связи опробовали переплав отходов гранулированного порошка из титанового сплава ВТ5-1



Рис. 2. Слитки ИПСК, выплавленные из отходов гранулированных порошков сплава ВТ5-1 кг

на установке ИПСК (диаметр 67 мм). Такой диаметр слитков соответствовал диаметру расходуемых заготовок (с небольшим допуском на механическую обработку), используемых в установках центробежного распыления (УЦР). Результаты исследования приведены в табл. 6.

Как следует из приведенных данных, переплав по технологии ИПСК практически не оказывает влияния на массовую долю основных легирующих элементов в сплаве (алюминий и олово). Содержание газовых примесей (кислорода и азота) в металле слитка выше, чем в гранулах, используемых в качестве шихты. Это обусловлено не столько газовой средой в плавильной камере, сколько наличием адсорбированных газов и влаги на поверхности шихты, имеющей чрезвычайно развитую поверхность. При этом удалить с поверхности гранул адсорбированные примеси обычным вакуумированием плавильной камеры не представляется возможным из-за высокой компактируемости шихты в бункере.

Мягкий рассредоточенный нагрев расплава, характерный для индукционного источника нагрева, в сочетании с перемешиванием расплава предотвращает его локальный перегрев поверхности и тем самым не вызывает испарение легирующих элементов даже таких, как алюминий и олово, имеющих достаточно высокие значения упругости пара.

Выплавленные из отходов слитки имеют хорошее качество поверхности, какие-либо дефекты на поверхности отсутствуют (рис. 2).

Исследование макроструктуры слитков показало, что они имеют структуру, характерную для слитков, получаемых способами ВДП, ЭШП, ЭЛП и ПДП (рис. 3).

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины впервые реализовали в промышленных условиях на ПО «Киевтрактородеталь» переплав расходуемых заготовок из титанового сплава ОТ4-2, собранных из отработанных элементов оснастки машин центробежного литья гильз.

В литейном цехе этого объединения в качестве теплоизолирующих вставок в кокилях машин центробежного литья гильз для тракторных двигателей использовали фланцы из титанового сплава ОТ4-2, что позволило исключить отбел чугуна в краевых



Рис. 3. Макроструктура слитка ИПСК сплава BT5-1 кт

(торцевых) зонах отливок. Титановые вставки (фланцы) работают в напряженных термических условиях — быстрый нагрев при заливке чугуна во вращающийся кокиль чередуется с резким охлаждением их в водяной ванне после извлечения чугунной гильзы из кокиля. Таким образом, после отливки нескольких сотен гильз на рабочей поверхности фланцев образуется большое количество радиальных трещин, которые в процессе последующих заливок быстро углубляются. В дальнейшем такие фланцы уже нельзя использовать (рис. 4). Ежегодно на заводе для изготовления новых фланцев расходовали до 15 т дорогостоящего листового титанового проката.

Из-за значительных габаритов отработанных титановых фланцев применять их в качестве шихты при ИПСК не представлялось возможным, а их

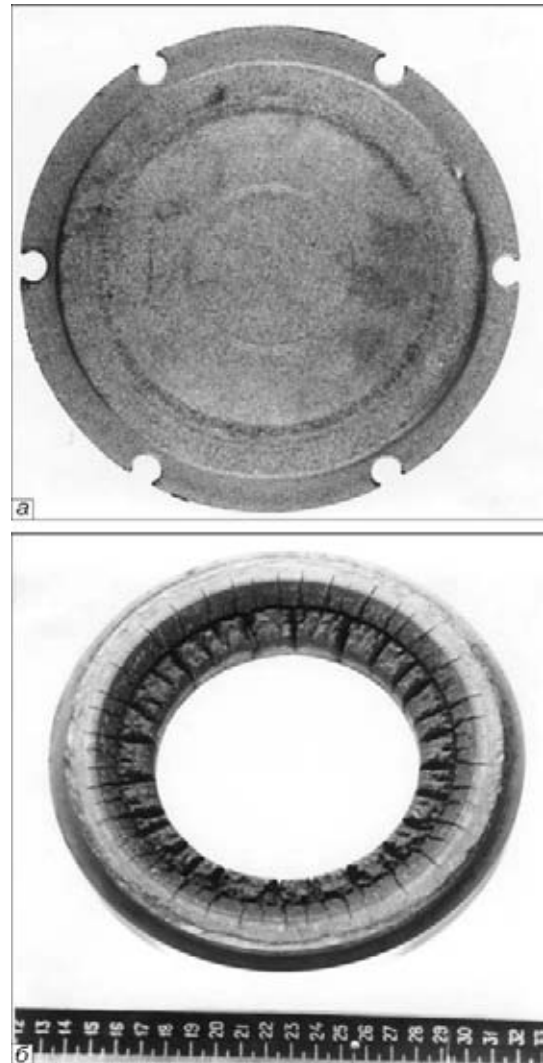


Рис. 4. Общий вид отработанных фланцев из титанового сплава ОТ4-2: а, б — соответственно передний и задний фланцы кокиля

дробление или порезка на более мелкие куски экономически не оправданы. Переплав таких отходов с одинаковыми габаритными размерами оказался возможным благодаря применению расходующихся заготовок, собираемых из отработанных фланцев.

Для получения расходующихся заготовок обработанные на дробеструйной установке титановые кольца собирали в стопку по 20... 25 шт. и сваривали между собой способом аргодуговой сварки (рис. 5). Дополнительно снаружи приваривали полосы шириной 15... 20 мм из титанового листа для предотвращения обрыва колец во время плавки.

При ИПСК не требуется защита поддона от воздействия высококонцентрированного источника тепловой энергии, как в случае ВДП. Роль затравки при ИПСК сводится к тому, чтобы расплавившись она образовывала металлическую ванну, достаточную для нормального ведения процесса. При выплавке слитков на установке ОП117 (рис. 6) в качестве затравки использовали 2... 3 отработанных фланца, перед плавкой уложенные стопкой на поддон. Внутреннюю полость фланцев заполняли титановой обрезью или стружкой.



Рис. 5. Расходуемая заготовка, собранная из отработанных фланцев титанового сплава ОТ4-2

Выплавленные слитки диаметром 220 мм имеют характерные особенности — на поверхности слитков зафиксированы продольные тонкие ребра высотой 0,5... 2,0 мм, образовавшиеся в результате заполнения жидким металлом стыков между секциями кристаллизатора. Эти ребра не влияют на структуру слитка и его последующую механическую обработку, поэтому их не следует рассматривать как дефекты поверхности (рис. 7).

В поверхностном слое слитков не обнаружено заворотов или подкорковой пористости. При соблюдении технологического режима на завершающем этапе плавки усадочная раковина в слитках ИПСК отсутствует (рис. 8). Все это повышает выход годного металла до 96 %.

В целом кристаллическое строение слитков ИПСК по характеру направленности кристаллов такое же, как и у других переплавных процессов, но размер кристаллов, как показали металлографические исследования, на 1,0... 1,5 балла меньше, что обусловлено интенсивным перемешиванием металлической ванны в электромагнитном поле.

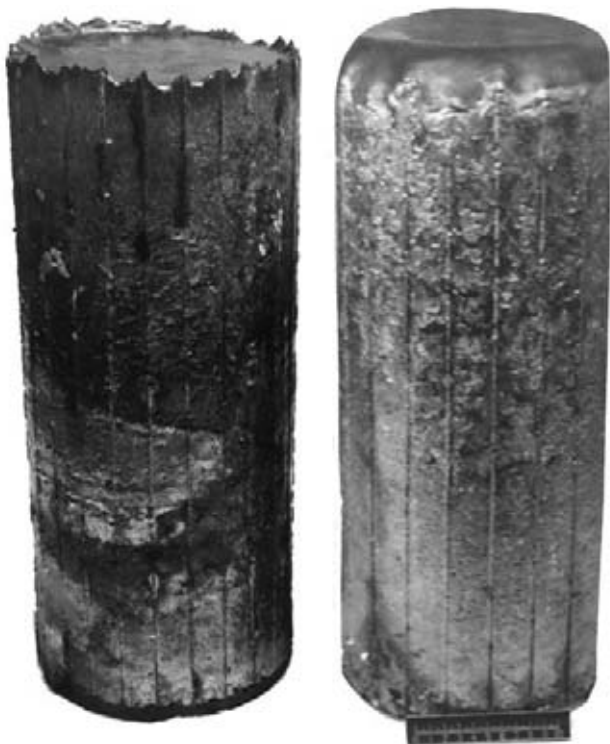


Рис. 6. Слитки, выплавленные из отходов титанового сплава ОТ4-2 ( $D_{ст} = 220$  мм)

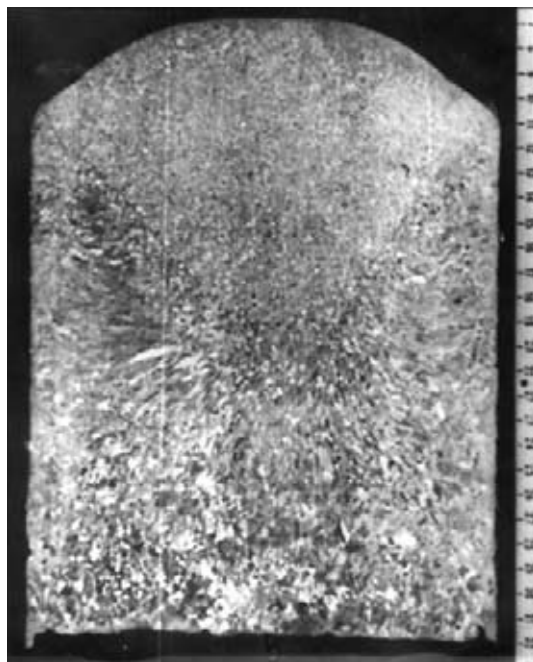


Рис. 7. Макроструктура головной части слитка, выплавленного с выведением усадочной раковины

Химический состав металла слитков, выплавленных из отработанных элементов литейной оснастки, приведен в табл. 7.

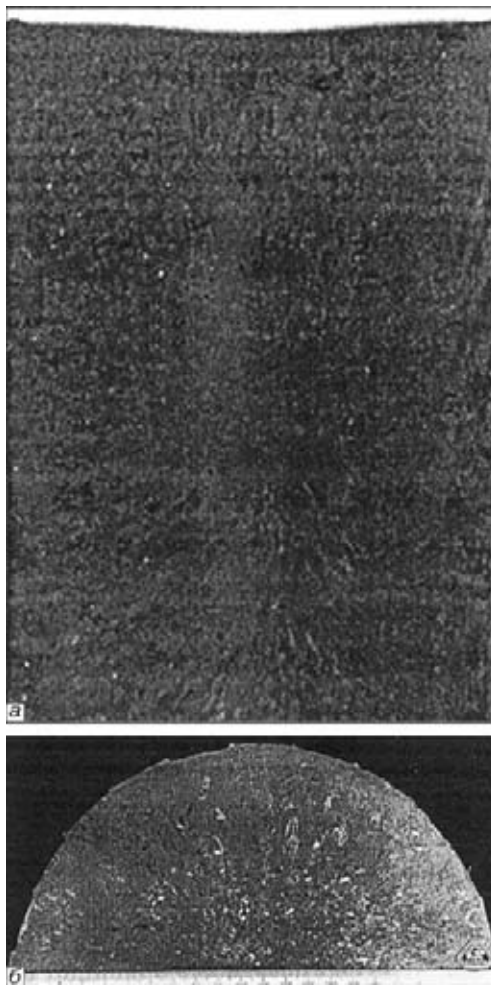


Рис. 8. Макроструктура слитков ИПСК диаметром 200 мм (сплав ОТ4-2): а, б — соответственно продольный и поперечный разрезы



Таблица 7. Химический состав металла слитков сплава ОТ4-2

Место отбора проб	Массовая доля, %				
	легирующих элементов		примесей		
	Al	Mn	Fe	Si	C
Исходный металл	3,69	1,27	0,22	0,13	0,07
Слитки	3,62	1,06	0,41	0,19	0,12
Регламентируемый стандартом и техническими условиями	0,50... 4,00	0,50... 2,00	≤ 0,60	≤ 0,30	≤ 0,15

Таблица 8. Содержание газовых примесей в слитках ИПСК сплава ОТ4-2

Вид шихты	Место отбора проб в слитках	Массовая доля газов, %		
		[O]	[N]	[H]
Фланцы без очистки	Голова	0,224... 0,227	0,047... 0,051	0,012... 0,014
	Середина	0,280... 0,234	0,050... 0,056	0,013... 0,016
	Низ	0,292... 0,328	0,051... 0,062	0,013... 0,017
Фланцы после дробеструйной очистки	Голова	0,218... 0,225	0,034... 0,039	0,008... 0,009
	Середина	0,218... 0,224	0,035... 0,039	0,010... 0,012
	Низ	0,231... 0,244	0,038... 0,044	0,010... 0,012
Фланцы после дробеструйной очистки и промывки	Голова	0,183... 0,191	0,030... 0,033	0,007... 0,009
	Середина	0,194... 0,198	0,029... 0,033	0,007... 0,009
	Низ	0,213... 0,218	0,036... 0,041	0,009... 0,012
Исходный металл	Фланцы	0,177... 0,225	0,029... 0,043	0,018... 0,038
Регламентируемое по техническим условиям	—	≤ 0,30	≤ 0,06	≤ 0,015

По содержанию основных легирующих элементов металл слитка соответствует требованиям стандарта для сплава ОТ4-2, а по содержанию регламентированных примесей не превышает требований технических условий для вторичных сплавов.

Представляют интерес результаты исследования влияния способов подготовки к переплаву отработанных титановых фланцев на массовую долю газовых примесей в металле слитков (табл. 8).

Количество газовых примесей в металле слитков, выплавленных из предварительно неочищенных фланцев, несколько превышает допустимые нормы. Предварительная дробеструйная очистка фланцев перед сборкой расходомерных заготовок позволяет снизить содержание газовых примесей до уровня, удовлетворяющего требованиям технических условий. Еще чище получают металл слитков, выплавленных из фланцев, дополнительно промытых в горячем растворе соды, затем водой и просушенных при температуре 380... 400 К. Более высоких качественных результатов можно достичь, подвергнув переплавляемые фланцы травлению в растворе кислот.

Как следует из данных табл. 8, при переплаве расходомерных заготовок из неочищенных фланцев заметно увеличивается в металле содержание азота и кислорода, в отличие от слитков, выплавленных из предварительно очищенных фланцев, где при-

рост газовых примесей незначителен. Полученные данные свидетельствуют о том, что основная доля примесей в ходе переплава вносится в жидкий металл вместе с оксидными пленками, покрывающими поверхность фланцев. Дробеструйная обработка фланцев резко снижает поступление азота и кислорода в металл, и содержание газовых примесей укладывается в регламентируемые пределы.

Массовая доля водорода в слитках значительно меньше, по сравнению с исходным содержанием, независимо от качества подготовки к переплаву фланцев.

Следует отметить, что в донной части слитков зафиксирована более высокая концентрация газовых примесей. Такой характер их распределения обусловлен тем, что в стартовый период плавки при повышении температуры в плавильной камере адсорбированные на ее стенках азот и кислород переходят в атмосферу печи и затем растворяются в жидком металле. Дальнейшее наплавление слитка происходит в очищенной таким образом атмосфере.

Результаты измерения твердости показали, что металл, выплавленный из неочищенных фланцев, как и следовало ожидать, имеет большую твердость, чем исходный (табл. 9). Поверхностная очистка фланцев способствовала получению металла, твердость которого не превышала исходную.

Большинство титановых сплавов, в том числе сплав ОТ4-2, в качестве легирующих компонентов



**Таблица 9. Показатели твердости титанового сплава ОТ4-2**

Объект исследования	HV		
	Донная часть	Середина	Головная часть
Слиток из фланцев:			
неочищенных	375... 385	370... 380	360... 375
очищенных	253... 277	251... 263	228... 248
Исходный металл	—	270... 285	—
Регламентируемая твердость сплава согласно техническим условиям	—	Г 300	—

содержат алюминий и марганец, имеющие высокую упругость пара при температуре плавления титана. Поэтому выплавка сплавов, включающих эти элементы, а также утилизация образующихся отходов

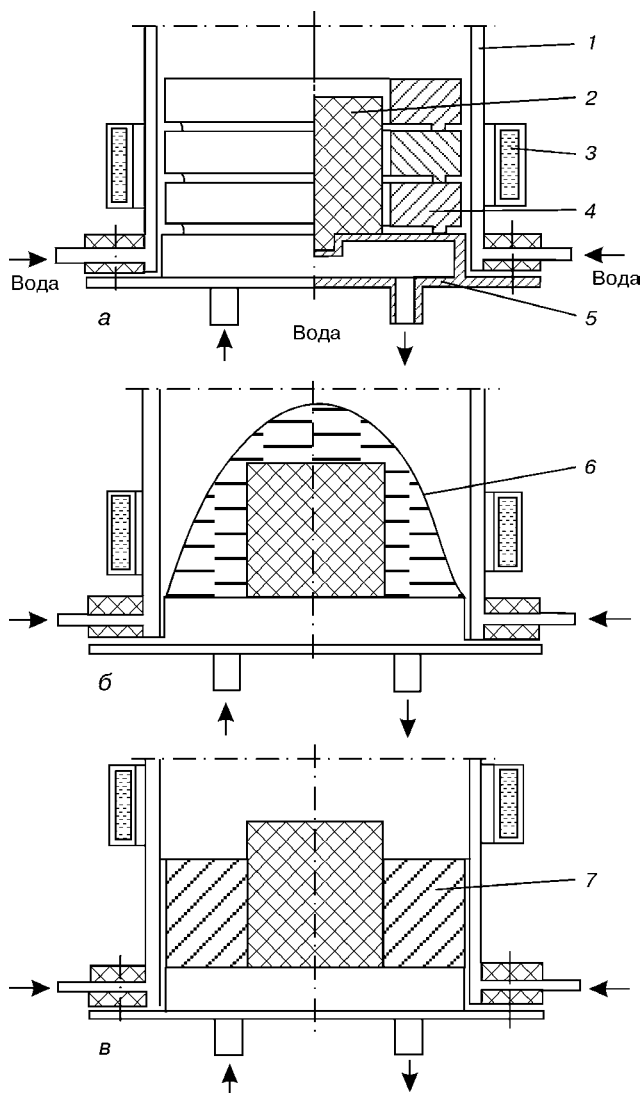


Рис. 9. Пооперационная схема выплавки полых слитков-заготовок (типа шайбы) на установке ОП117: а — размещение шихты и стержня в секционном кристаллизаторе; б — расплавление шихты; в — затвердевание металла; 1 — кристаллизатор; 2 — графитовый стержень; 3 — индуктор; 4 — лом титановых изделий; 5 — поддон; 6 — расплавленный металл; 7 — отливка

**Таблица 10. Изменение содержания алюминия и марганца в титановых сплавах в зависимости от длительности выдержки в жидком состоянии**

Легирующие элементы	Исходная массовая доля элементов в сплаве, %	Изменение массовой доли элементов, %, при длительности выдержки, мин				
		5	10	15	20	25
Алюминий	2,97	2,96	2,96	2,96	2,93	2,90
Марганец	2,09	2,08	2,06	2,05	2,03	2,01
Алюминий	3,83	3,82	3,80	3,76	3,74	3,71
Марганец	1,82	1,82	1,80	1,79	1,77	1,76

путем их переплава связаны с определенными трудностями, обусловленными значительными потерями алюминия и марганца в условиях вакуумной плавки. Процесс ИПСК осуществляется, как правило, в инертном газе при атмосферном давлении в плавильной камере. Поэтому даже весьма продолжительная выдержка (до 25 мин) металлического расплава в аргоне при атмосферном давлении не приводит к ощутимым потерям алюминия и марганца в сплавах титана (табл. 10).

Потери этих элементов не превышают 3,5 (алюминий) и 2,8 отн. % (марганец) при выдержке расплавов в расплавленном состоянии в течение 25 мин. В реальных условиях переплава длительность пребывания порции металла в жидком состоянии не превышает 10... 15 мин и, следовательно, потери этих элементов еще меньше.

О влиянии кратности индукционного переплава отходов сплава ОТ4-2 на содержание газовых примесей можно судить по данным, приведенным в табл. 11.

Как видно из представленных данных, на каждой стадии переплава происходит приток содержания таких примесей, как кислород и азот, позволяющий неоднократно переплавлять пришедшие в негодность элементы литейной оснастки из титанового сплава.

Количество водорода в сплаве даже после многократного переплава практически остается на одном уровне. Более того, отмечается тенденция к его снижению.

С целью сокращения объема механической обработки при изготовлении литейной оснастки из вторичного титанового сплава ОТ4-2 разработана

**Таблица 11. Содержание газовых примесей в титановом сплаве ОТ4-2 после ИПСК**

Количество переплавов	Массовая доля элементов, %		
	[O]	[N]	[H]
Исходный металл	0,182	0,034	0,018
Первый переплав	0,218	0,039	0,013
Второй переплав	0,242	0,045	0,010
Третий переплав	0,255	0,052	0,009
Регламентируемые техническими условиями	≤ 0,300	≤ 0,060	≤ 0,015



Рис. 10. Внешний вид полого слитка-заготовки (типа шайбы) диаметром 220 мм с графитовым стержнем

технология выплавки на установке ОП117 заготовок с размерами, близкими к таковым изделий. Для этого ранее используемый кристаллизатор высотой 800 мм заменен более коротким высотой 40 мм. За счет этого объем плавильной камеры, заполняемой аргоном, сократился более чем на 30 %, что способствовало экономии инертного газа и сокращению цикла выплавки заготовок.

Кроме того, установку ОП117 дополнительно дооборудовали пневматическим устройством, на котором закрепили поддон. При помощи пневмоустройства производили герметичное поджатие поддона к нижнему фланцу секционного кристаллизатора, что дало возможность значительно сократить время на подготовительные операции, связанные с загрузкой титановой шихты в кристаллизатор и извлечением слитка.

В поддоне по оси выполнили цилиндрическое углубление, в которое перед каждой плавкой устанавливали графитовый стержень диаметром 80...85 мм. Установка стержня позволила выплавлять заготовку в форме кольца, что резко уменьшило объем механической обработки и количество отходов металла в стружку.

Схема выплавки кольцевых заготовок из титанового сплава на установке ОП117 приведена на рис. 9. Внешний вид полученной кольцевой заготовки показан на рис. 10.

При выплавке кольцевых заготовок каждая плавка фактически сводится к стартовому периоду обычной плавки. При этом полное расплавление шихты (отработанных фланцев) происходит в течение 10...12 мин, а весь цикл выплавки кольцевой заготовки (от загрузки шихты до извлечения заготовки) длится около 20...22 мин.

Небольшой перегрев расплава и кратковременный контакт его с поверхностью графитового стержня не приводит к ощутимому увеличению количества углерода в сплаве и не может быть причиной отбраковки полученных изделий.

## Выводы

1. В ходе выполненных в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины технологических исследований, а также промышленного применения показано, что процесс ИПСК может с успехом использоваться для утилизации промышленных отходов титана и его сплавов на машиностроительных и металлургических предприятиях.

2. Установлено, что конструктивное исполнение плавильных установок для ИПСК, а также их обслуживание делают их конкурентоспособными, в сравнении с электронно-лучевой плавкой, а в ряде случаев и единственным экономически оправданным способом переплава титановых отходов в условиях машиностроительного предприятия.

1. *Титан* / В. Л. Гармата, А. Н. Петрунько, Н. В. Галицкий и др. — М.: Металлургия, 1983. — 559 с.
2. *Влияние технологии процесса магнетермического восстановления на остаточное содержание хлора в титановой губке*: Сб. тр. / В. В. Родякин, Б. Н. Кушкин, Э. Л. Арутюнов, А. Н. Петрунько. — М.: Металлургия, 1967. — Т. 1. — С. 112–122.
3. *Родякин В. В.* Магнетермическое производство губчатого титана. — М.: Металлургия, 1977. — 213 с.
4. *Переработка* блоков губчатого титана / Р. А. Сандлер, А. Н. Петрунько, В. А. Лихтерман, А. Н. Павлюченко. — М.: Металлургия, 1987. — 158 с.
5. *Родякин В. В., Гегер В. Э., Скриптюк В. М.* Магнетермическое производство губчатого титана. — М.: Металлургия, 1971. — 216 с.
6. *Промышленное* применение низкотемпературной плазмы при выплавке слитков электродов из низкосортного губчатого титана для производства запорной титановой арматуры / Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, В. А. Горбенко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1989. — № 3. — С. 71–75.
7. *Schipperleit G. H., Zetheman A. F., Evers D.* Cold-crucible induction melting of reactive metals // J. of Metals. — 1961. — 13, № 2. — P. 140–144.
8. *Clites P. G., Beall R. A.* Inductoslag melting of titanium // Kept. investig. bur. mines. US. Dept. Interior. — 1969. — № 7268. — P. 1–20.
9. *Chonister D.* Induction Melting of Titanium, Zirconium and reactive metals // Paper presented at the AVS/ASM vacuum metallurgy conf. (Pittsburgh, June, 1986). — Pittsburgh, 1986. — P. 2–4.
10. *Латаш Ю. В., Шейко И. В., Константинов В. С.* Плавка высокоактивных, благородных и редкоземельных металлов и сплавов в плазменных и индукционных установках с холодным тиглем-кристаллизатором // Пробл. сварки и спец. электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 281–285.
11. *Индукционный* переплав в секционном кристаллизаторе, возможности и перспективы применения его для переплава титановых отходов / Ю. В. Латаш, И. В. Шейко, В. Н. Бернадский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 2. — С. 64–70.
12. *К вопросу* о возможности переплава губчатого титана с повышенным содержанием техногенных примесей. Сообщение 1 / М. Л. Жадкевич, Ю. В. Латаш, В. С. Константинов и др. // Там же. — 1997. — № 1. — С. 55–60.
13. *К вопросу* о возможности переплава губчатого титана с повышенным содержанием техногенных примесей. Сообщение 2 / М. Л. Жадкевич, Ю. В. Латаш, В. С. Константинов и др. // Там же. — 1998. — № 2. — С. 43–45.
14. *К вопросу* о применении независимых источников нагрева для утилизации отходов титана и его сплавов / М. Л. Жадкевич, Ю. В. Латаш, В. С. Константинов и др. // Там же. — 2001. — № 1. — С. 27–31.
15. *Порошковая* металлургия титановых сплавов / Под ред. А. С. Фроуса. — М.: Металлургия, 1985. — 312 с.
16. *Дисперсные* порошки и материалы на их основе / Под ред. В. В. Скорохода. — Киев: ИПМ АН УССР, 1979. — 185 с.
17. *Сверхбыстрая* закалка жидких сплавов / Под ред. Г. Германа. — М.: Металлургия, 1986. — 373 с.
18. *Порошковая* металлургия // Итоги науки и техники. — М.: ВИНТИ, 1983. — Т. 1. — 216 с.

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

Поступила 16.03.2007