



УДК 669.187.58.002.3

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ НЕЗАВИСИМЫХ ИСТОЧНИКОВ НАГРЕВА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

И. В. Шейко, Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, В. В. Степаненко

Дан анализ методов переплава отходов титана с применением независимых источников нагрева. Акцент сделан на использовании плазменно-дугового переплава и индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. Приведены технические характеристики плазменно-дуговой печи УП-100 и индукционной печи с секционным кристаллизатором ОП-117, а также химический состав титановых слитков, полученных из отходов на этих установках. Показана перспективность применения последних для утилизации отходов титана и его сплавов.

Analysis of remelting titanium waste using independent heat sources is given. Application of plasma-arc remelting and induction melting in a sectioned mould is emphasized. Technical characteristics of plasma-arc furnace of UP-100 type and induction furnace of OP-117 type with a sectioned mould, as well as chemical composition of titanium ingots produced from waste in these furnaces are described. The application of the latter is promising for utilization of waste of titanium and its alloys.

Ключевые слова: вакуумно-дуговая плавка; плазменно-дуговая плавка; индукционный переплав; плазмотрон; индуктор; кристаллизатор; шихта; слиток; структура металла

Титан и сплавы на его основе являются важными конструкционными материалами, потребность в которых возрастает, однако стоимость изделий из титана еще довольно высокая. Одна из основных причин дороговизны металлопродукции из титана — это низкий коэффициент использования металла (менее 0,3). Другая причина — трудности вовлечения в металлооборот титановых отходов, образующихся на различных этапах производства изделий из титана.

На этапе производства титановой губки образуется около 10 % отходов. Они имеют различный фракционный состав (от 1,0 до

70 мм) и повышенное содержание газовых и техногенных примесей [1, 2]. Анализ различных партий губчатого титана марки ТГ-ТВ показал, что определенное количество его (около 60 %) можно использовать при выплавке титановых слитков. Эти слитки в дальнейшем могут применяться в качестве расходных электродов, которые переплавляют в вакуумно-дуговых литейных печах и получают титановые отливки, например, корпуса и другие детали запорной арматуры для химической промышленности [3].

Анализ известных методов, используемых в области специальной электрометаллургии, — вакуумно-дугового (ВДП), электрошлакового (ЭШП), электронно-лучевого (ЭЛП) и плазменно-дугового (ПДП) переплавов выявил определенные возможности и перспективы вовлечения

Таблица 1. Химический состав губчатого титана марки ТГ-ТВ

Материал	Содержание, %						
	Fe	C	Cl	[N]	[O]	[H]	Si
Исходная шихта	0,34	0,025	0,07	0,105	0,125	0,019	0,006
ГОСТ 17746-72	2,0	0,15	0,3	0,3	—	—	—

Примечание. Приведены среднестатистические данные по 20-ти партиям губчатого титана.



Таблица 2. Содержание примесей в титановых слитках, выплавленных из 100 % отходов губчатого титана в печи УП-100

Шихта	Место отбора проб в слитке	Массовая доля, %			Объемная доля, %			Твердость, НВ
		C	Fe	Si	[N]	[O]	[H]	
Губка ТГ-ТВ (фракция 2...12 мм)	Верх	0,070	0,35	0,020	0,065	0,14	0,010	219
	Середина	0,065	0,32	0,018	0,071	0,13	0,009	213
	Низ	0,068	0,38	0,025	0,081	0,18	0,015	230
Губка ТГ-ТВ (фракция 12...50 мм)	Верх	0,065	0,28	0,150	0,058	0,13	0,009	209
	Середина	0,070	0,25	0,170	0,065	0,12	0,008	201
	Низ	0,070	0,32	0,180	0,075	0,15	0,012	215
Прессованные остатки губчатого титана	Верх	0,050	0,08	0,008	0,021	0,10	0,008	150
	Середина	0,040	0,09	0,008	0,022	0,09	0,007	160
	Низ	0,040	0,10	0,009	0,030	0,12	0,010	170

в металлооборот значительных количеств низкосортного губчатого титана путем переплава его с помощью независимых источников тепловой энергии, в первую очередь в электронно-лучевых печах и агрегатах с плазменно-дуговыми нагревателями (плазмотронами) [4, 5].

Известно, что основными критериями оценки качества титановой губки являются наличие примесей в ней и однородность металла. Данные о содержании примесей в губке марки ТГ-ТВ приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что содержание примесей в исследованных партиях титановой губки достаточно высокое, но тем не менее оно ниже уровня, допускаемого ГОСТом и, следовательно, губка может быть использована в качестве шихты при выплавке слитков.

Для утилизации отходов губчатого титана главным образом мелких фракций (2... 12 мм) на Запорожском титаномагниево-комбинате (ЗТМК) введена в эксплуатацию опытно-промышленная плазменно-дуговая печь УП-100. Ее основные технические характеристики следующие:

Размеры выплавляемых слитков, мм:	
диаметр	270; 300
длина	2500
Максимальная масса слитка (по титану), кг	
Годовая производительность, т	800
Количество одновременно выплавляемых слитков, шт.	1000
Скорость вытягивания слитков, мм/мин:	
рабочая	2
маршевая	4...40
Давление в рабочей камере во время плавки, кПа:	330
пониженное	13,3...53,0
повышенное	135
Производительность системы рециркуляции плазмообразующего газа, м ³ /ч	
Количество плазмотронов, шт.	100
Суммарная мощность плазмотронов, кВт	6
Род тока	1600
	Переменный

Максимальная сила тока на одном плазмотроне, А	3000
Количество источников питания плазмотронов типа А-1474, шт.	2
Напряжение питающей сети, В:	
силового блока	380
системы управления	220
Габаритные размеры печи, мм:	
длина	15100
ширина	7390
высота (над уровнем пола)	9300

Печь УП-100 включает следующие основные узлы и агрегаты: плавильную камеру, кристаллизаторы, бункеры для шихты, вибропитатели, механизм вытягивания слитка, плазмотроны типа ПДМ-13РМ, тележку для транспортировки слитка, систему водоснабжения, систему рециркуляции плазмообразующего газа, систему гидропривода, источники питания плазмотронов, системы блокировок и аварийной сигнализации.

Печь УП-100 позволяет вести переплав шихты одновременно в двух кристаллизаторах. Применение переменного тока дает возможность объединить плазмотроны в две группы — по три на каждый кристаллизатор. Корпус плавильной камеры представляет собой сварную водоохлаждаемую оболочку из нержавеющей стали с множеством вводов и фланцев для присоединения других узлов и агрегатов.

Плазменно-дуговая печь позволяет выплавлять титановые слитки непосредственно из кусковой шихты (губчатого титана), минуя операцию прессования расходуемых заготовок.

В дальнейшем печь УП-100 была несколько модернизирована — ее оснастили двумя кристаллизаторами прямоугольного сечения (405×215 мм). Применение прямоугольных кристаллизаторов позволило выплавлять слитки прямоугольной формы размером 400×210×2500 мм и массой до 900 кг, вследствие чего производительность печи значительно повысилась.

О качестве слитков титана, выплавленных в плазменно-дуговой печи УП-100, можно



судить по данным, приведенным в табл. 2. Из данных таблицы следует, что по высоте слитков азот, кислород и водород распределены достаточно равномерно. В то же время для азота характерна тенденция к снижению по мере наплавления слитка. Содержание кислорода и водорода повышается в донной и головной частях слитков. Повышенное содержание водорода и кислорода в донной части слитков, по-видимому, можно объяснить поглощением этих газов жидким металлом из атмосферы плавильной камеры, которая в начале плавки насыщена водяными парами, образующимися при испарении конденсированной на стенках плавильной камеры и шихте влаги под воздействием плазменных дуг.

Железо, кремний и углерод распределены в слитках равномерно и содержание их зависит от исходного содержания в губчатом титане.

Наряду с низкотемпературной плазмой одним из наиболее универсальных независимых источников нагрева является высокочастотное электромагнитное поле, создаваемое электрическим током, протекающим в индукторе. Индукционный нагрев имеет ряд характерных особенностей, которые привлекают специалистов различных отраслей, а именно:

- интенсивное перемешивание жидкого металла, обеспечивающее выравнивание химического состава и температуры в объеме ванны;

- низкий угар легирующих элементов благодаря отсутствию локального перегрева металла;

- возможность выдерживать металлический расплав в жидком состоянии неограниченное время;

- источник нагрева не зависит и не оказывает влияния на параметры техногенной среды, в которой осуществляется нагрев или плавка;

- возможность вести нагрев или плавку в вакууме или в газовой среде любого состава и давления;

- возможность создавать процессы и агрегаты с комбинированным нагревом, например индукционный в сочетании с плазменным [6 – 8];

- высокая надежность работы технологического оборудования из-за отсутствия в источнике нагрева расходующихся элементов (например электродов).

Благодаря отмеченным особенностям индукционный нагрев нашел широкое применение в различных отраслях промышленности, например, для закалки, сварки и плавки металлов [9, 10].

Однако в существующих плавильных печах с тиглем из огнеупорного материала указанные достоинства индукционного источника нагрева реализуются не в полной мере, поскольку во

время плавки жидкий металл контактирует с огнеупорной стенкой тигля и загрязняется продуктами взаимодействия (неметаллическими и газовыми примесями). Интенсивное перемешивание расплава в данном случае интенсифицирует этот процесс и способствует насыщению металла продуктами взаимодействия. Это сужает возможности применения индукционных тигельных печей для выплавки и рафинирования высокореакционных металлов, а также металлов, имеющих высокую температуру плавления.

Задача устранения источника загрязнения жидкого металла при индукционной плавке решена в плавильных агрегатах с охлаждаемым секционным кристаллизатором. Сущность индукционной плавки с формированием слитка в секционном кристаллизаторе (ИПСК) заключается в том, что вместо огнеупорного тигля применяется секционный водоохлаждаемый кристаллизатор, «прозрачный» для электромагнитного поля, в котором собственно и происходит расплавление металла и формирование слитка [11 – 13]. Во внутреннем объеме кристаллизатора, выполненном из отдельных, электрически изолированных водоохлаждаемых секций, при помощи небольшого по высоте индуктора создается высокочастотное электромагнитное поле, в котором осуществляется плавление кусковой шихты и формирование металлической ванны.

Благодаря взаимодействию токов, протекающих в секциях кристаллизатора и поверхностном слое металлической ванны, последняя отжимается от стенки кристаллизатора и ее открытая поверхность принимает куполообразную форму (рис. 1). При этом наблюдается интенсивная циркуляция жидкого металла, которая ускоряет расплавление кусковой шихты и способствует гомогенизации расплава по температуре и химическому составу. Кроме того,



Рис. 1. Форма открытой поверхности металлической ванны при ИПСК. Диаметр кристаллизатора 69 мм

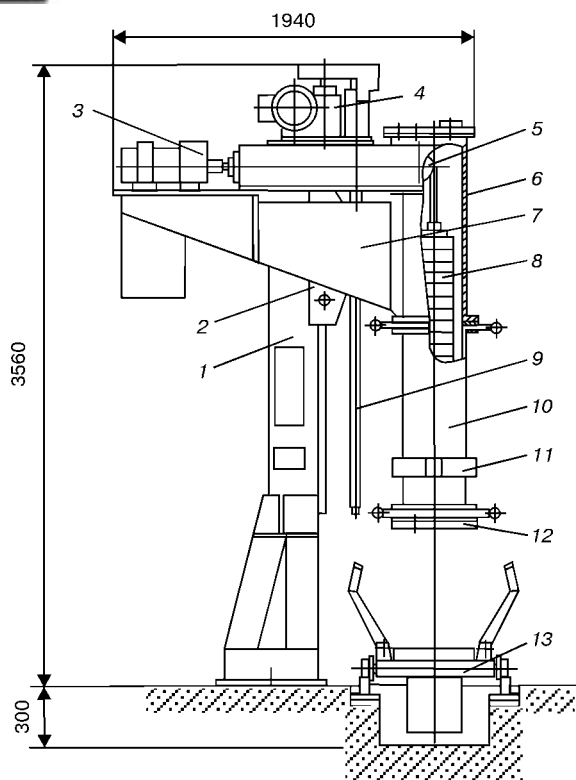


Рис. 2. Принципиальная схема опытно-промышленной установки ОП-117: 1 – колонна; 2 – каретка механизма перемещения кристаллизатора; 3 – привод перемещения расходоуемой заготовки; 4 – привод перемещения кристаллизатора; 5 – барабан привода перемещения расходоуемой заготовки; 6 – камера заготовки; 7 – подвижная траверса; 8 – расходоуемая заготовка; 9 – винт механизма перемещения кристаллизатора; 10 – секционный кристаллизатор; 11 – индуктор; 12 – поддон; 13 – тележка для приема и транспортировки слитка

отжатие металлического расплава от стенки кристаллизатора в зоне индуктора приводит к снижению тепловых потерь в системе индуктор – секционный кристаллизатор – садка.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины создана опытно-промышленная установка ОП-117 для индукционной выплавки слитков из отходов титана. Эта установка введена в эксплуатацию на одном из киевских заводов для переплава отходов титанового сплава ОТ4-2. Схема установки ОП-117

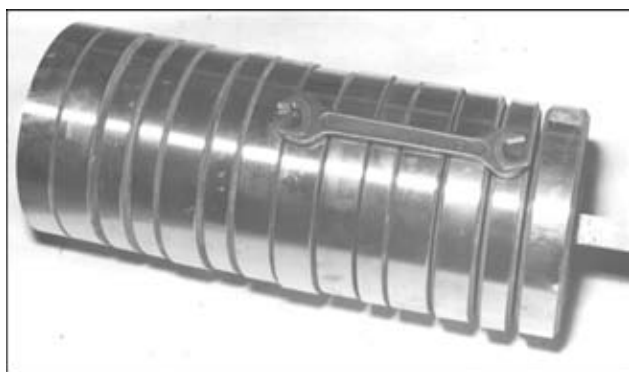


Рис. 3. Расходоуемая заготовка, собранная из отработанных титановых фланцев



Рис. 4. Внешний вид слитков ИПСК из титанового сплава ОТ4-2. Диаметр слитков 225 мм

представлена на рис. 2, а ее основные технические характеристики следующие:

Размеры секционного кристаллизатора, мм:	
диаметр	230
длина	1150
Электрическая мощность на индукторе, кВт:	
в стартовый период	300...320
во время плавки	200...250
Максимальная длина расходоуемой заготовки, мм	
1200	
Масса слитка (по титану), кг	
До 130	
Атмосфера в плавильном объеме во время плавки	
Аргон	
Скорость перемещения кристаллизатора, мм/мин:	
рабочая	2...20
маршевая	100...300

Отличительной особенностью установки ОП-117 является то, что секционный кристаллизатор с камерой заготовки образуют герметичную плавильную камеру, а последовательное наплавление слитка осуществляется путем вертикального перемещения кристал-

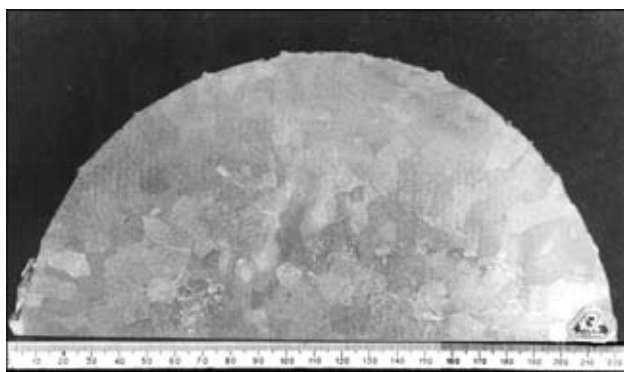


Рис. 5. Макроструктура головной части слитка (поперечный разрез)



Таблица 3. Содержание газовых примесей в слитках сплава ОТ4-2 после ИПСК

Объект исследования	Место отбора проб	Содержание, %			Твердость, НВ
		[N]	[O]	[H]	
Исходный металл	Фланцы	0,039...0,043	0,225	0,053	270...285
Слиток из неочищенных фланцев	Верх слитка	0,071...0,076	0,370	0,020	360...375
	Низ слитка	0,075...0,079	0,367	0,022	375...385
Слиток из очищенных фланцев	Верх слитка	0,050...0,053	0,248	0,013	228...248
	Низ слитка	0,053...0,057	0,252	0,013	263...277
Регламентируемое содержание газов		0,06	0,30	0,015	300

лизатора относительно неподвижного индуктора. Кристаллизатор состоит из 24-х охлаждаемых секций, выполненных из медной трубки толщиной 20 мм трапециевидной формы. Наружная цилиндрическая гильза кристаллизатора покрыта слоем стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Толщина покрытия 5 мм. Установка оснащена одновитковым разъемным индуктором высотой 55 мм.

Расходуемая заготовка (рис. 3) представляет собой пакет отработанных фланцев, сваренных аргонодуговой сваркой. Перед сваркой поверхность фланцев зачищается на дробеструйном аппарате. Особенностью заготовок является наличие осевой сквозной полости диаметром 100 мм.

Слитки вторичного титана, выплавленные на установке, имеют хорошее качество поверхности (рис. 4) и крупную дендритную структуру (рис. 5), характерную для слитков переплавных процессов. О качестве металла слитков можно судить по данным, приведенным в табл. 3.

Как видно из таблицы, в слитках, полученных переплавом заготовок, собранных из неочищенных фланцев, заметно увеличивается содержание азота и кислорода. В слитках, выплавленных из предварительно очищенных фланцев, прирост газов незначительный. Это свидетельствует о том, что основная доля примесей во время переплава вносится в жидкий металл вместе с окисными пленками на поверхности фланцев. Дробеструйная очистка поверхности фланцев позволяет существенно снизить поступление кислорода и азота в переплавляемый металл. Содержание водорода в слитках значительно ниже исходного независимо от качества подготовки фланцев к переплаву.

Результаты измерения твердости показали, что металл, выплавленный из неочищенных фланцев, имеет большую твердость, чем исходный металл. Дробеструйная зачистка фланцев позволяет получать металл, твердость которого не превышает исходную.

Эксплуатация деталей (фланцев), изготовленных из вторичного титана, показала, что их рабочий ресурс не ниже ресурса деталей, изготовленных из проката первичного титана.

Таким образом, опыт и результаты промышленной эксплуатации плавильных агрегатов с независимыми источниками тепла (плазменно-дуговым и индукционным) свидетельствуют о принципиальной возможности и перспективности их применения для переплава отходов титана и его сплавов (наряду с электронно-лучевой плавкой).

1. Гармата В. А., Гуляницкий Б. С., Крамник В. Ю. *Металлургия титана*. — М.: Металлургия, 1968. — 642 с.
2. Родяник В. В., Гегер В. Э., Скрыпнюк В. М. *Магнитотермическое производство губчатого титана*. — М.: Металлургия, 1971. — 216 с.
3. *Титановые сплавы*. Плавка и литье титановых сплавов / А. А. Андреев, А. Ф. Аношкин, К. М. Борщезовская и др. — М.: Металлургия, 1978. — 383 с.
4. *Применение независимого источника теплоты для утилизации отходов губчатого титана* / В. В. Тэлин, Ю. В. Латаш, В. С. Константинов, В. А. Шаповалов // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1989. — № 2. — С. 68 — 73.
5. *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. // Там же. — 1989. — № 3. — С. 71 — 75.
6. Шейко И. В., Латаш Ю. В., Степаненко В. В. Некоторые особенности создания плазменно-дуговых нагревателей для индукционных плавильных печей. Открытые индукционные печи // Там же. — 1996. — № 2. — С. 26 — 31.
7. Шейко И. В., Латаш Ю. В., Степаненко В. В. Некоторые особенности создания плазменно-дуговых нагревателей для индукционных плавильных печей. Вакуумно-индукционные печи // Там же. — 1996. — № 3. — С. 37 — 43.
8. Рудой А. П., Филковский Д. В. Индукционно-дуговой способ плавления металлов // *Металлофизика*. — 1976. — Вып. 65. — С. 104 — 107.
9. Глуханов Н. П., Богданов В. Н. Сварка металлов при высокочастотном нагреве. — М., Л.: Машгиз, 1962. — 191 с.
10. Демичев А. Д. Поверхностная закалка индукционным способом. — Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. — 87 с.
11. Тур Л. Л., Фомин Н. И. *Современные методы индукционной плавки*. — М.: Энергия, 1975. — 112 с.
12. Shippereit G. H., Zetherman A. F., Everts D. H. Cold-crucible induction melting of reactive metals // *J. of Metals*. — 1961. — 13, N 2. — P. 140 — 144.
13. Sheiko I. V., Latash Yu. V. Induction melting with an ingot formation in a sectional mould. Part 4, vol. 11. — Gordon and Breach Publishing Group, 1999. — P. 98.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 17.01.2001