

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ ТИТАНА В УКРАИНЕ

С. В. АХОНИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведен анализ основных тенденций развития специальной электрометаллургии титана в Украине, которая является одной из пяти стран мира, имеющей полный цикл производства титана: от добычи титаносодержащих руд, их обогащения и производства губчатого титана до выплавки слитков титановых сплавов и производства практически полного спектра титановых полуфабрикатов. Metallургический передел губчатого титана в слитки в Украине основан на технологии электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью, которая находит широкое применение в мире при выплавке слитков-слябов. Данная технология обеспечивает гарантированное удаление тугоплавких включений и дает возможность получать слитки различного поперечного сечения за один переплав из шихтовых материалов низкой стоимости, что обеспечивает высокие технико-экономические показатели процесса плавки. На предприятиях Украины из слитков титановых сплавов, полученных методом электронно-лучевой плавки, организовано производство полуфабрикатов титановых сплавов: отливок, поковок, прутков, горячекатаных и холоднокатаных труб, механические свойства которых соответствуют требованиям стандартов. В настоящее время в Украине организовано конкурентоспособное на мировых рынках производство высококачественных слитков и слитков-слябов титана и сплавов на его основе, которое имеет большие перспективы для дальнейшего развития. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: титан, электронно-лучевая плавка, слиток, качество, тугоплавкие включения

Титан и сплавы на его основе являются уникальными конструкционными материалами, которые позволяют существенно повысить эксплуатационные характеристики новой техники. Благодаря высокой удельной прочности и хорошей коррозионной стойкости они нашли широкое применение в ракетно- и самолетостроении, энергетическом и химическом машиностроении, судостроении и производстве медицинской техники, в том числе эндопротезов и имплантов.

Украина является одной из пяти стран мира, которые имеют полный цикл производства титана: от добычи титаносодержащих руд, их обогащения и производства губчатого титана до выплавки слитков титановых сплавов и производства практически полного спектра титановых полуфабрикатов: отливок, поковок, прутков, труб и проволоки.

Основные месторождения титаносодержащих руд сосредоточены в Днепропетровской и Житомирской областях. Их обогащение осуществляют на Вольногорском горно-металлургическом комбинате и Иршанском ГОКе, соответственно. Эти комбинаты не только полностью обеспечивают сырьем украинских производителей губчатого титана и пигментного диоксида титана, но и поставляют титановые концентраты на экспорт.

Производство губчатого титана в Украине на Запорожском титаномагниеком комбинате основывается на технологии плавки ильменитовых концентратов в рудно-термических печах с получением титановых шлаков с содержанием TiO_2

как в рутиловых концентратах, причем стоимость таких шлаков приблизительно в 1,5 раза ниже стоимости рутила. После хлорирования шлаков в солевых хлораторах восстановлением тетраоксида титана магнием получают губчатый титан. В настоящее время на ЗТМК освоено производство блоков губчатого титана массой 0,7 и 3,8 т за цикл и выплавка слитков титана на электронно-лучевой установке, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона.

Хотя технология вакуумно-дугового переплава (ВДП) титана является традиционным и наиболее распространенным в промышленности способом получения слитков титана и сплавов на его основе, в последние годы все большее применение в металлургии титана находит технология электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛП). Последняя отличается рядом преимуществ по сравнению с традиционным способом получения слитков — вакуумно-дуговым переплавом:

- полное исключение из технологического цикла операции прессования расходуемого электрода, которая требует специального прессового оборудования большой мощности, либо специализированного сварочного оборудования;

- возможность производства слитков не только круглого, но и слитков-слябов прямоугольного сечения, используемых в качестве заготовки для производства листового проката;

- гарантированное удаление тугоплавких неметаллических включений в промежуточной емкости, повышение за счет этого качества металла слитков;

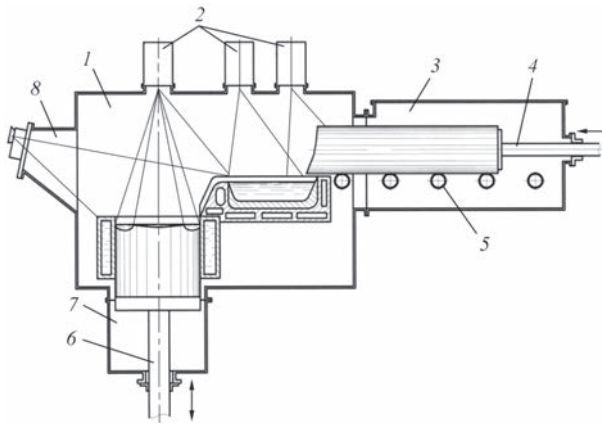


Рис. 1. Схема установки: 1 — камера плавки; 2 — электронные пушки; 3 — камера заготовки; 4 — механизм подачи заготовки; 5 — рольганг; 6 — механизм вытягивания слитка; 7 — камера слитка; 8 — смотровая система

– получение структурно- и химически однородных слитков с равноосной структурой;

– увеличение выхода годного металла за счет сокращения количества переплавов (один вместо двух-трех).

Процесс ЭЛП осуществляется в высоком вакууме в камере электронно-лучевой установки (давление остаточных газов в камере плавки поддерживают в диапазоне 0,01...1,00 Па) и заключается в последовательном расплавлении исходной шихты в промежуточную емкость под действием нагрева электронными лучами, рафинировании расплава в промежуточной емкости и его сливе в медный водоохлаждаемый проходной кристаллизатор, где происходит формирование слитка (рис. 1).

В настоящее время в промышленной эксплуатации в Китае, США, Японии и Украине находится 32 электронно-лучевых установки мегаваттного класса, еще три — в стадии строительства. По одной электронно-лучевой установке мегаваттного класса для выплавки слитков титана имеется в Германии и Казахстане. Такое широкое применение технологии ЭЛП обусловлено как хорошим качеством получаемого металла, так и высокими технико-экономическими показателями процесса, особенно при выплавке слитков-слябов прямоугольного сечения. Использование слитков-слябов позволяет исключить из технологической цепочки получения титанового проката капиталоемкую и энергозатратную операцию перековывания цилиндрических слитков на слябы. Механические свойства горячекатаного листа, полученного из слитков-слябов титана, целиком отвечают требованиям отечественных и зарубежных стандартов.

Важной проблемой при производстве титановых слитков и полуфабрикатов является задача удаления из металла тугоплавких включений с повышенным содержанием стабилизирующих α -фазу примесей внедрения: азота, кислорода и углерода, которые состоят из твердых частиц α -титана,

насыщенных этими примесями, а также из химических соединений этих элементов с титаном: нитридов, оксидов и карбидов [1]. Кроме того, серьезную проблему в слитках титана представляют также включения, образованные химическими соединениями с большой плотностью и высокой температурой плавления. Источниками их образования, как правило, являются осколки режущего инструмента на основе карбидов тугоплавких металлов (WC, MoC и др.), которые попадают в металл вместе с шихтовыми компонентами, чаще всего, со стружкой [2]. Наличие таких тугоплавких дефектов в изделиях из титана значительно снижает усталостные характеристики металла.

Одним из основных механизмов удаления тугоплавких включений из титана является их гравитационное осаждение: в процессе плавки жидкий металл в промежуточной емкости течет горизонтально, тогда как включения с более высокой плотностью, чем плотность жидкого титана, под действием силы тяжести опускаются вниз (рис. 2), осаждаются на поверхность гарнисажа и вмораживаются в него.

Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины исследования показали, что в процессе ЭЛП практически все тугоплавкие включения, за исключением диоксидов титана, будут осаждаться на дно промежуточной емкости и удаляться из расплава. Установленные зависимости позволяют определить габариты промежуточной емкости, которые обеспечат гарантированное удаление тугоплавких включений из титана путем их осаждения (рис. 3).

Хотя температура плавления тугоплавких включений низкой плотности может существенно превышать температуру плавления титана и, следовательно, температуру расплава, при попадании таких включений в расплав титана начинается процесс их растворения. Механизм растворения включений LDI в расплаве титана был изучен как экспериментально [3], так и теоретически [4] и обуславливается процессами диффузии примесей внедрения (азот, кислород или углерод) из объема включения в расплав.

Исследование процесса растворения тугоплавких включений показало, что характер рас-

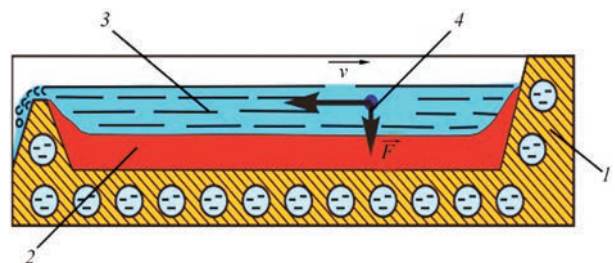


Рис. 2. Схема процесса осаждения тугоплавкого включения: 1 — промежуточная емкость; 2 — гарнисаж; 3 — расплав; 4 — тугоплавкое включение

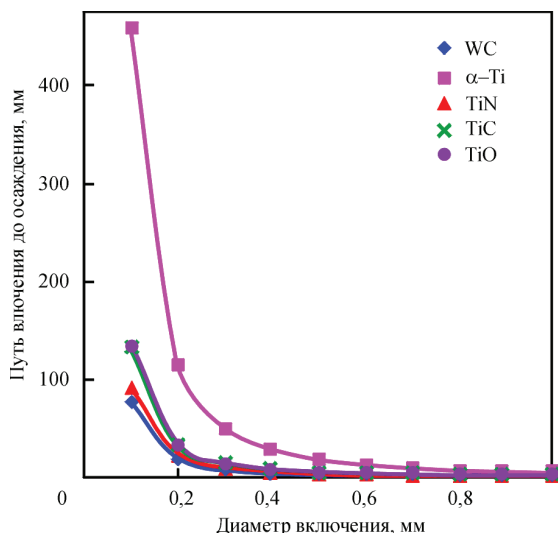


Рис. 3. Зависимость пути тугоплавкого включения до осаждения на поверхность гарнисажа от его размера

творения этих включений существенно зависит от температуры расплава [5]. Так, например, при перегреве расплава титана выше температуры плавления титана на 59°C частица α -титана растворяется практически с постоянной скоростью (скорость перемещения межфазной поверхности составляет около 28 мкм/с), тогда как при перегреве на 9°C скорость растворения такой частицы существенно нелинейная: на начальном этапе размеры включения остаются практически неизменными, а затем его размеры начинают уменьшаться с увеличивающейся скоростью вплоть до полного растворения (рис. 4).

Также было определено время полного растворения включений для твердых частиц разного химического состава и размеров. Таким образом, исследование процессов растворения тугоплавких включений (частицы α -титана, нитрида, карбида или оксида титана) в жидком титане позволило рассчитать скорость их растворения и определить время полного растворения таких включений в зависимости от химического состава и начальных размеров.

Технология ЭЛП обеспечивает не только высокую очистку от вредных примесей и неметалли-

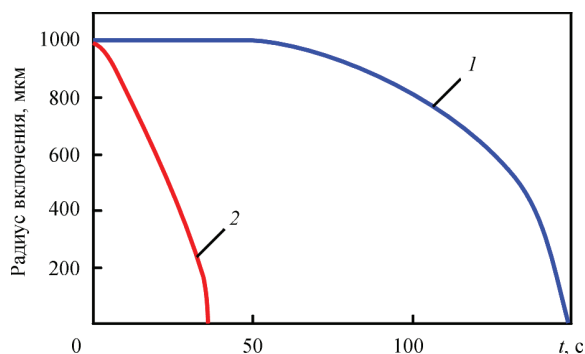


Рис. 4. Зависимость радиуса включения α -Ti от времени пребывания в расплаве: 1 — $T = 1950$; 2 — 2000 К

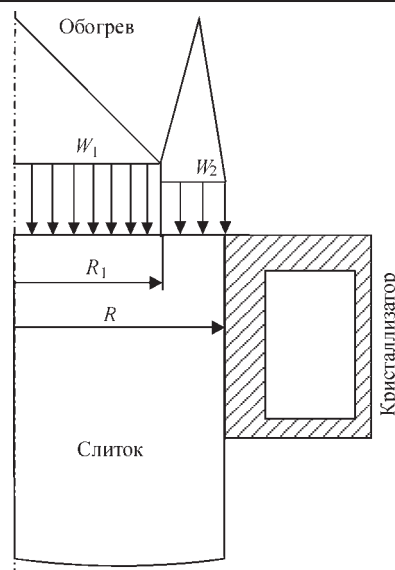


Рис. 5. Схема моделирования процесса формирования цилиндрического слитка при ЭЛП

ческих включений, но и значительное улучшение структуры слитка. Это обусловлено разделением процессов плавления и рафинирования металла в промежуточной емкости и затвердения металла в кристаллизаторе.

Для определения закономерностей кристаллизации слитков титановых сплавов в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины была разработана математическая модель тепловых процессов при ЭЛП [6]. Данная математическая модель позволяет получить распределение температур в слитке в любой момент времени, а следовательно, конфигурацию жидкой ванны и зоны твердо-жидкого состояния металла в зависимости от технологических параметров электронно-лучевой плавки — производительности процесса, периодичности заливки расплава в кристаллизатор и мощности электронно-лучевого нагрева.

В модели рассматривается процесс формирования слитка в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе (рис. 5).

Поверхность слитка обогревается двумя электронными лучами, причем мощность одного из них равномерно распределена в центральной зоне ($0 < r < R_1$), а другого — в периферийной зоне ($R_1 < r < R$). В математической модели контролируемые технологическими параметрами являются: мощности центрального и периферийного лучей W_1 и W_2 , величина порции, периодичность заливки, производительность плавки. Процесс переноса тепла описывается уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат (r, θ, z) для случая осевой симметрии, где ось OZ совпадает с осью слитка (ось симметрии), а ось OR — с радиальным направлением. Начало координат задано на нижнем торце слитка. Уравнение теплопроводности в этом случае имеет следующий вид:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$0 < r < R; 0 < z < s(t); t > 0,$$

где T — температура; C — удельная теплоемкость; ρ — плотность материала; λ — теплопроводность; $s(t)$ — текущее положение верхнего торца слитка.

На верхнем торце слитка происходит подвод тепла за счет обогрева электронными лучами и излучение тепла по закону Стефана–Больцмана. Граничное условие на верхнем торце слитка представлено в виде

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=s(t)} = -\varepsilon \sigma (T^4 - T_{cp}^4) + w(r, t), \quad (2)$$

при этом удельная мощность электронно-лучевого нагрева $w(r, t)$ распределяется следующим образом:

$$\begin{aligned} w(r, t) &= w_1(t) \text{ при } r < R_1; \\ w(r, t) &= W_2(t) \sin^2 \pi \left(\frac{r - R_1}{R - R_1} \right) \\ &\text{при } R_1 < r < R. \end{aligned} \quad (3)$$

На боковой поверхности слитка, контактирующей со стенками кристаллизатора и с поддоном, теплообмен происходит по закону Ньютона-Рихмана:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha(T - T_{cp}), \quad (4)$$

где α — коэффициент теплопередачи между слитком и медной водоохлаждаемой стенкой; T_{cp} — температура среды, обменивающейся теплом со слитком.

На свободной боковой поверхности слитка теплопередача описывается законом Стефана-Больцмана:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{cp}^4). \quad (5)$$

Как показали результаты расчетов по математической модели тепловых процессов в слитке ти-

тана при ЭЛП, изменяя мощность электронно-лучевого нагрева свободной поверхности расплава в кристаллизаторе и скорость плавки, можно изменять объем ванны жидкого металла и форму фронта кристаллизации, управляя, тем самым, формированием структуры слитка [6]. Проведенные натурные эксперименты по выплавке слитков титана на различных технологических режимах показали высокую степень адекватности построенных моделей и подтвердили возможность получения слитков титана и его сплавов с мелкодисперсной равноосной структурой при проведении плавки на оптимальных технологических параметрах (рис. 6).

При выплавке слитков титановых сплавов методом ЭЛП возникает проблема обеспечения заданного химического состава металла. Это вызвано тем, что при ЭЛП легирующие элементы с упругостью пара, превышающей упругость пара титана, испаряются более интенсивно, чем при ВДП. К таким элементам относятся алюминий, хром, марганец и др. Но в первую очередь эта проблема касается алюминия, так как он является легирующим элементом практически всех титановых сплавов.

Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона фундаментальные исследования процессов испарения компонентов сплавов из расплава в вакууме в условиях нагрева поверхности электронным лучом позволили построить математические модели процессов испарения компонентов сплавов при ЭЛП [6, 7], которые устанавливают зависимость концентрации легирующих элементов в титановом слитке от технологических параметров плавки и концентрации этих элементов в расходуемой заготовке:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_j} \rho [X_i]_j dV = m_{j-1} [X_i]_{j-1} - S_j \pi_j^i - m_j [X_i]_j;$$

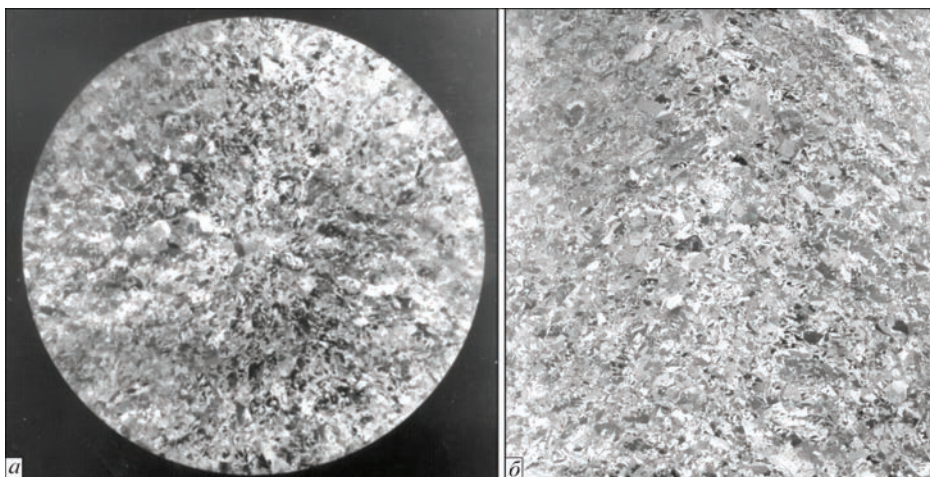


Рис. 6. Макроструктура слитка титанового сплава ВТ6 в поперечном (а) и продольном (б) сечениях

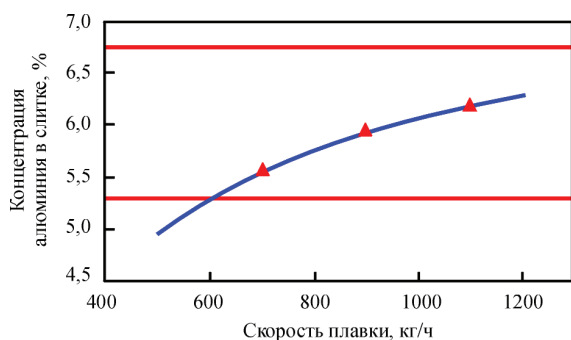


Рис. 7. Зависимость содержания алюминия в слитке ЭЛП сплава VT6 от скорости плавки (сплошная линия — расчет; точки — эксперимент)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_j} \rho [\text{Ti}]_j dV = m_{j-1} [\text{Ti}]_{j-1} - S_j \pi_j^{\text{Ti}} - m_j [\text{Ti}]_j, \quad (6)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ обозначают легирующие элементы; $j = 1, 2, 3$ — зоны плавки (пленка жидкого металла на торце расходуемой заготовки, ванны жидкого металла в промежуточной емкости и в кристаллизаторе); V_j — объем жидкого металла в j -ой зоне плавки, м^3 ; ρ — плотность расплава, $\text{кг}/\text{м}^3$; $[X]_j$ — концентрация i -го легирующего элемента в j -ой зоне плавки, мас. доля; $[\text{Ti}]_j$ — концентрация титана в j -ой зоне плавки, мас. доля; S_j — площадь свободной поверхности жидкого металла в j -ой зоне плавки, м^2 ; π_j^i и π_j^{Ti} — удельные потоки легирующих элементов и титана через межфазную поверхность в паровую фазу в j -ой зоне плавки, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; m_{j-1} — массовая скорость поступления расплава в j -ую зону плавки, $\text{кг}/\text{с}$; m_3 — массовая скорость затвердевания расплава в кристаллизаторе, $\text{кг}/\text{с}$.

На примере испарения алюминия из расплава титанового сплава Ti-6Al-4V (мас. %) в вакууме с использованием математической модели (4) были построены зависимости содержания алюминия в слитке от скорости плавки. Сравнение данных экспериментальных плавок слитков титанового сплава Ti-6Al-4V с полученными зависимостями показали высокую точность описания построенной математической моделью реального процесса испарения алюминия при ЭЛП (рис. 7).

Использование этих моделей позволяет прогнозировать химический состав выплавляемых слитков титановых сплавов и обеспечивает получение слитков с гарантированным химическим составом. Компенсация потерь компонентов сплавов с высокой упругостью пара при ЭЛП осуществляется дополнительным легированием этими элементами исходной шихтовой заготовки. Большое значение при выплавке слитков титановых сплавов имеет однородность распределения легирующих элементов по объему слитков. В условиях ЭЛП это обеспечивается однородностью шихтовой расходуемой заготовки, постоянством техноло-

гических параметров в процессе плавки и специальными технологическими приемами.

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований процесса ЭЛП позволил разработать технологию получения высококачественных слитков высокопрочных и жаропрочных титановых сплавов диаметром до 840 мм и создать оборудование для их промышленной реализации (рис. 8, 9).

Для оценки качества металла полученных слитков проводилось исследование химического состава образцов, отобранных по длине слитка с верхней, средней и нижней части. Результаты анализа химического состава металла полученных слитков (таблица) показали, что распределение легирующих элементов по длине слитков равномерное и соответствует марочному составу. В выплавленных методом ЭЛП слитках титановых сплавов отсутствуют несплошности, неметаллические включения размером больше 1 мм, а также плотные скопления более мелких включений. Структура металла плотная, кристаллическая неоднородность и зональная ликвация в слитке отсутствуют.

В процессе получения слитков по ряду причин, обусловленных металлургическими и технологическими особенностями, их поверхностный слой оказывается пораженным дефектами. Для устранения таких дефектов поверхность полученных слитков и литых заготовок подвергают механической обработке, в результате которой количество отходов может достигать до 15 % массы обрабатываемого слитка.

Для сокращения потерь металла вместо механической обработки в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология электронно-лучевого оплавления боковой поверхности слитков как круглого, так и прямоугольного сечений электронными лучами и создано соответствующее оборудование для ее реализации (рис. 10). Разработанная технология позволяет эффективно удалять поверхностные дефекты на глубину до 10 мм, обеспечивая при этом качество боковой поверхности и соответствие химического состава оплавленного слоя на уровне требований стандартов, увеличивая при этом выход годного металла на 7...15 % в зависимости от сечения и габаритов слитка [8].

Проверка качества полуфабрикатов в виде прутков и поковок, изготовленных из слитков ЭЛП, показали, что их механические свойства отвечают всем требованиям, которые предъявляются промышленностью к качеству титановых сплавов. При этом полуфабрикаты изотропны по механическим свойствам.

Распределение легирующих элементов и примесей по длине слитков титановых сплавов, полученных ЭЛП, мас. %

Марка сплава	Часть слитка	Al	Mo	V	Fe	Zr	Cr	O	N
BT23	Верхняя	4,5	2,0	4,7	0,5	0,01	0,9	0,11	0,012
	Средняя	4,6	2,1	5,0	0,6	0,01	0,9	-	-
	Нижняя	4,3	1,9	4,7	0,5	0,01	0,9	-	-
ОСТ190013-81		4,0...6,3	1,5...2,5	4,0...5,0	0,4...1,0	<0,3	0,8...1,4	<0,15	<0,05
BT22	Верхняя	5,1	4,2	4,9	0,90	0,01	1,3	0,11	0,012
	Средняя	5,2	4,5	4,7	1,0	0,01	1,4	-	-
	Нижняя	5,0	4,1	5,0	1,0	0,01	1,4	-	-
ГОСТ 19807-91		4,4...5,7	4,0...5,5	4,0...5,5	0,5...1,5	<0,3	0,5...1,5	<0,15	<0,05
BT20	Верхняя	6,85	1,60	2,05	0,10	1,60	<0,1	0,08	0,019
	Средняя	6,90	1,63	2,05	0,11	1,63	<0,1	-	-
	Нижняя	6,70	1,63	2,08	0,11	1,60	<0,1	-	-
ГОСТ 19807-91		5,5...7,0	0,5...2,0	0,8...2,5	<0,25	1,5...2,5	<0,1	<0,15	<0,05

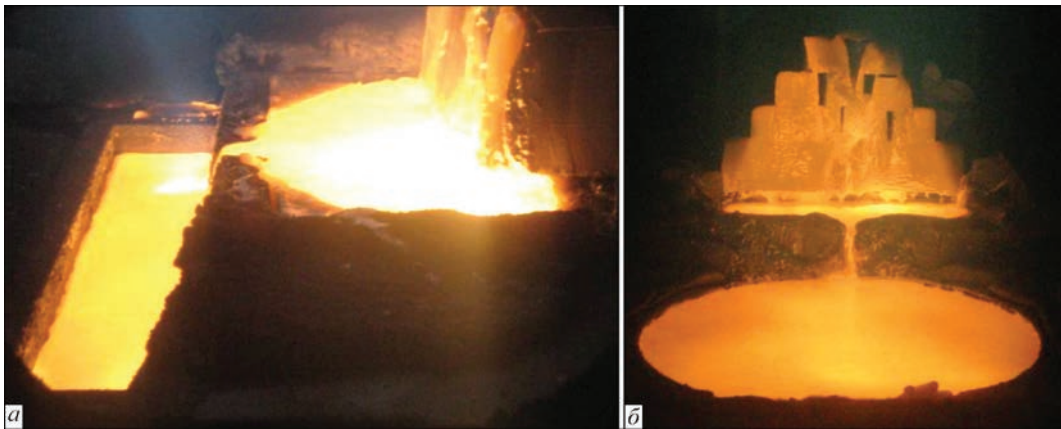


Рис. 8. Процесс ЭЛП: а — слитка-сляба титанового сплава BT23; б — слитка диаметром 400 мм титанового сплава BT22

В кооперации с предприятиями-партнерами, из слитков титановых сплавов, полученных методом ЭЛП, в Украине организовано производство горячекатаных и холоднокатаных труб, качество которых полностью соответствует требованиям стандартов.

Разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технологические процессы электронно-лучевой плавки дают возможность получать высококачественные слитки титана и его сплавов с однородной бездефектной структурой. Разработанные технологии позволяют за счет использо-

вания более дешевого исходного сырья и увеличения сквозного выхода годного металла снизить себестоимость титановых полуфабрикатов, и, следовательно, повысить конкурентоспособность и расширить области применения титана в различных отраслях промышленности.

Реализация технологии ЭЛП в условиях промышленных предприятий позволила организовать в Украине конкурентоспособное на мировых рынках производство высококачественных слитков и слитков-слябов титана, которое имеет большие перспективы для дальнейшего развития.



Рис. 9. Внешний вид промышленной электронно-лучевой установки УЭ5812

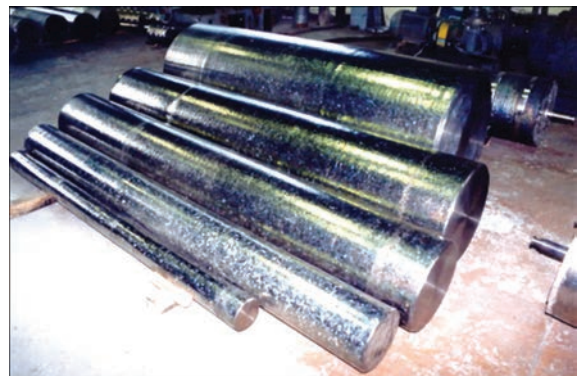


Рис. 10. Внешний вид слитков титановых сплавов диаметром 100...600 мм с оплавленной боковой поверхностью

Список литературы

1. Кошелап А. В., Райченко А. И. (1999) О возможности измельчения структуры литого титана и его сплавов за счет их модифицирования частицами нитрида титана. *Процессы литья*, **3**, 44-52.
2. Mitchel A. (1987) The production of high-quality materials by special process. *Journal Vac. Technol.*, **4** (Jul./Aug.), 2672-2677.
3. Bewley B. P., Gigliotti M. F. X. (1977) Dissolution rate measurements of TiN in Ti-6242. *Acta mat.*, **45**, **1**, 357-370.
4. Bellot J. P., Mitchell A. (1994) Hard-Alfa particle behavior in a titanium alloy liquid pool. *Light Metals*, **2**, 1187-1193.
5. Ахонин С. В., Кругленко М. П., Костенко В. И. (2011) Математическое моделирование процесса растворения кислородсодержащих тугоплавких включений в расплаве титана. *Современная электрометаллургия*, **1**, 17-21.
6. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В., Жук Г. В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
7. Akhonin S. V., Trigub N. P., Zamkov V. N., Semiatin S. L. (2003) Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron-beam cold-hearth melting of Ti-6Al-4V ingots. *Metallurgy and Materials Transactions B*, **34**, August, 447-454.
8. Ахонин С. В., Березос В. А., Пикулин А. Н. и др. (2014) Электронно-лучевое оплавление поверхности слитков сплавов титана. *Современная электрометаллургия*, **2**, 21-25.

References

1. Koshelap, A.V., Rajchenko, A.I. (1999) On possibility of structure refining of cast titanium and its alloys due to their modification with titanium nitride particles. *Protsessy Litya*, **3**, 44-52 [in Russian].
2. Mitchel, A. (1987) The production of high-quality materials by special process. *J. Vac. Technol.*, **4** (Jul./Aug.), 2672-2677.
3. Bewley, B.P., Gigliotti, M.F.X. (1977) Dissolution rate measurements of TiN in Ti-6242. *Acta Mat.*, **45**(1), 357-370.
4. Bellot, J.P., Mitchell, A. (1994) Hard-alfa particle behavior in a titanium alloy liquid pool. *Light Metals*, **2**, 1187-1193.
5. Akhonin, S.V., Kruglenko, M.P., Kostenko, V.I. (2011) Mathematical modeling of process of dissolution of oxygen-containing refractory inclusions in titanium melt. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 17-21 [in Russian].
6. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Akhonin, S.V., Trigub, N.P., Zamkov, V.N., Semiatin, S.L. (2003) Mathematical modeling of aluminum evaporation during electron-beam cold-hearth melting of Ti-6Al-4V ingots. *Metall. and Mater. Transact. B*, **34** (August), 447-454.
8. Akhonin, S.V., Berezos, V.A., Pikulin, A.N., et al. (2014) Electron beam melting of surface of titanium alloy ingots. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 21-25 [in Russian].

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СПЕЦІАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ТИТАНУ В УКРАЇНІ

С. В. АХОНІН

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено аналіз основних тенденцій розвитку спеціальної електрометалургії титану в Україні, яка є однією з п'яти країн світу, що має повний цикл виробництва титану: від видобутку титаномістких руд, їх збагачення і виробництва губчатого титану до виплавки злитків титанових сплавів і виробництва практично повного спектру титанових напівфабрикатів. Металургійний переділ губчатого титану в злитки в Україні заснований на технології електронно-променевої плавки з проміжною ємністю, яка знаходить широке застосування в світі при виплавці злитків-слябів. Дана технологія забезпечує гарантоване видалення тугоплавких включень і дає можливість отримувати злитки різного поперечного перерізу за один переплав з шихтових матеріалів низької вартості, що забезпечує високі техніко-економічні показники процесу плавки. На підприємствах України зі злитків титанових сплавів, отриманих методом електронно-променевої плавки, організовано виробництво напівфабрикатів титанових сплавів: виливків, поковок, прутків, гарячекатаних та холоднокатаних труб, механічні властивості яких відповідають вимогам стандартів. В даний час в Україні організовано конкурентоспроможне на світових ринках виробництво високоякісних злитків і злитків-слябів титану і сплавів на його основі, яке має великі перспективи для подальшого розвитку. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: титан, електронно-променева плавка, злиток, якість, тугоплавкі включення

TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF SPECIAL ELECTROMETALLURGY OF TITANIUM IN UKRAINE

S.V. AKHONIN

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The analysis was carried out on the main tendencies of development of special electrometallurgy of titanium in Ukraine. It is one of five countries, having complete cycle of titanium production from extraction of titanium-containing ores, their enrichment and production of spongy titanium to melting of titanium ingots and production of virtually complete spectrum of titanium semi-finished products. Metallurgical processing of spongy titanium into ingots in Ukraine is based on technology of electron-beam melting with intermediate crucible, which finds wide application in the world for melting of ingot-slabs. This technology provides guaranteed removal of refractory inclusions and provides the possibility to get the ingots of various cross section per one melting from charge materials of low price that provides high technical-economical indices of melting process. Production of semi-finished products of titanium alloys from the ingots was organized at the Ukrainian enterprises. There are castings, forgings, rods, hot and cold-rolled pipes, mechanical properties of which correspond to requirements of the standards. Today Ukraine has got a competitive for the world's markets production of high-quality ingots and ingot-slabs from titanium and alloys on its basis, which has large perspectives for further development. 8 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: titanium, electron-beam melting, ingot, quality, refractory inclusions

Поступила в редакцію 08.08.2018