

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт электросварки им. Е. О. Патона

На правах рукописи

КАЛИНЮК
Алексей Николаевич

УДК 669.187.526.001.57

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ
ТИТАНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

05.16.07 —

металлургия металлов высокой чистоты и специальных
сплавов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1995

ДВ 33.876

Работа выполнена в Институте электросварки
им. Е.О.Патона НАН Украины

Научный руководитель

- кандидат технических наук
ТРИГУБ Н.П.

Официальные оппоненты

- проф. доктор технических наук
ЗАМКОВ В.Н.
- кандидат технических наук
КУЛАК Л.Л.

Ведущее предприятие

- Николапольский Купно-трубный
завод.

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации инженера Калыника Алексея Николаевича. Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, которые интересуются темой диссертации, принять участие в заседании специализированного совета или прислать отзыв (1 экз., заверенный печатью) по адресу: 252650, Киев-5, ГСП, ул.Боженко, 11, ученому секретарю специализированного совета.

Защита состоится " 14 " февраля 1996 г. на заседании специализированного совета по защите диссертаций (шифр К 50.02.02) при Институте электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке института.

Автореферат разослан " 3 " сентября 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
д-р техн. наук

А.А. БОНДАРЕВ

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00754808 (W)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Научно-технический прогресс в машиностроении непрерывно связан с созданием новых конструкционных материалов. В аэрокосмической технике, судостроении, химической, медицинской и пищевой промышленности широко применяют титан и сплавы на его основе, обладающие высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью в агрессивных средах, жаропрочностью и жаростойкостью, удовлетворительной технологичностью и свариваемостью.

Низкий коэффициент использования металла (15-20%) при производстве изделий из титана и его сплавов обуславливает образование большого количества отходов. Проблема их утилизации и рационального использования возникла одновременно с началом промышленного применения титана. Параллельно с усовершенствованием существующих схем производства первичного металла разрабатывают технологии и оборудование для утилизации отходов титана.

Получение слитков из вторичных сплавов, соответствующих по химическому составу слиткам, получаемым из первичной шихты - наиболее рациональный и экономически выгодный способ переработки отходов, который позволяет значительно снизить себестоимость продукции из титана и сплавов на его основе. Сравнительный анализ различных переплавных процессов спецэлектрометаллургии (ПДП, ВДП, ЭМД и др.) показал, что титановые отходы целесообразно переплавлять методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). Этот метод не требует компактирования расходуемой заготовки. Применение промежуточной емкости создает благоприятные условия для рафинирования расплава металла от неметаллических включений, водорода, усреднения химического состава, исключает взаимосвязь между плавлением и кристаллизацией жидкого металла, позволяет пространственно разделить эти два процесса, а следовательно, и отдельно ими управлять.

Цель работы. Разработка технологии переработки отходов титанового производства и получения качественных слитков гарантированного химического состава из вторичного титана и титановых сплавов на основе электронно-лучевой плавки. Для достижения указанной цели поставлены такие задачи: исследовать влияние режимов плавки и оплавления поверхности на поведении легирующих элементов и примесей; исследовать процесс формирования бездефектной однородной структуры слитка; создать оборудование для электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью и оплавления боковой поверхности слитков; разработать технологию электронно-лучевого переплава титановых

отходов; разработать технологию электронно-лучевого оплавления боковой поверхности полученных слитков; исследовать служебные свойства металла, полученного из отходов; выпустить опытно-промышленные партии слитков для производства труб различного сортамента и листового проката.

Методика исследований. Изучение металлургических и технологических особенностей электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью и оплавление боковой поверхности слитков проводили на опытно-промышленной установке УЭ-182М, которая разработана и изготовлена ИЭС им. Е.О.Патона при участии автора. Содержание газов в слитках, полученных из отходов, определяли газоанализаторами РО-316, РН-3, ТН-114 фирмы "ЛЕСО". Содержание легирующих элементов и примесей в слитках определяли методами химического анализа на приборах "Сатурн-1, Сатурн-2, АН-7660, С-115". Металлофизические исследования проводили на оптическом микроскопе "МЮРИСТ-32", ПОЛИВАРМЕТ фирмы РЕЙХЕРТ, растровом электронном микроскопе JEOL -10. Выявление макроструктуры слитков электронно-лучевой плавки осуществляли методом глубокого травления в водном растворе плавиковой кислоты. Испытания служебных свойств металла слитков осуществляли в литом и деформированном состоянии на стандартных образцах в лабораторных и промышленных условиях.

Слитки: новизна. Разработана и экспериментально проверена методика расчета концентрации кислорода во вторичном металле, позволяющая прогнозировать и получать слитки гарантированного химического состава. Показано, что на содержание кислорода во вторичном металле влияет вид и степень подготовки отходов к плавке. Установлено, что при переплаве листовой обрезки с неочищенной поверхностью содержание кислорода возрастает с 0,08 до 0,16%, после галтовки - с 0,08 до 0,12%, после рубки и травления - с 0,08 до 0,10%.

В результате исследований процесса рафинирования при переплаве отходов α - и $\alpha + \beta$ титановых сплавов установлены качественные и количественные закономерности испарения алюминия. При увеличении его концентрации в исходной шихте с 4,2 до 7,8% степень испарения возрастает с 1,08 до 1,26%. В диапазоне изменения удельного расхода электроэнергии на плавку 1,50-2,70 кВт.ч/м потери алюминия испарением составляют 7-32%.

На основании анализа технологического процесса электронно-лучевого оплавления поверхностного слоя слитков установлено, что степень испарения алюминия прямо пропорциональна плотности энергии в интервале $0,58 \cdot 10^8 - 1,96 \cdot 10^8$ Дж/м².

Разработана математическая модель температурного поля слитка при переглаве отходов титана и его сплавов. Изучены теплофизические условия кристаллизации металла и показано, что плотность теплового потока в кристаллизаторе $6,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$, скорость плавки 9–12 мм/мин, отношение поперечного сечения кристаллизатора к объему сливаемого металла $0,5\text{--}1,5 \text{ см}^{-1}$ обеспечивают выплавку слитков без дефектов усадочного и ликвационного характера с однородной структурой.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

Слитки вторичного титана марки ВТИ-0 и сплавов ТД-3, ПТ-3В прошли опытно-промышленную проверку на Алчевском металлургическом комбинате (г. Алчевск, Украина), Никопольском Кяно-трубном заводе (г. Никополь, Украина), ЦНИИ КМ "Прометей" (г. Санкт-Петербург, Россия), Зеленодольском машиностроительном заводе (г. Зеленодольск, Россия).

Впервые непосредственно из литой заготовки металла ЭЛПЕ, минуя промежуточные операцииковки, были получены трубы $\varnothing 38 \times 2 \text{ мм}$.

Оборудование и технология внедрены в производственном цехе ИЭС им. Е.О. Патона.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты работы докладывались на I Международной конференции молодых ученых и специалистов в области сварки и смежных технологий (г. Киев, 1988 г.), I Международной конференции "Водородная обработка материалов" (г. Донецк, 1995 г.), а также в полном объеме работа обсуждалась на металлургическом семинаре в ИЭС им. Е.О. Патона.

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 6 статей, подано 2 заявки на предполагаемое изобретение и получено I положительное решение по заявке на изобретение из России.

На защиту выносятся: закономерности поведения легирующих элементов и примесей при ЭЛПЕ вторичного титана и его сплавов, а также ЭЛО поверхности полученных слитков; исследования однородности распределения легирующих и примесных элементов по высоте и сечению слитков; теплофизические особенности кристаллизации металла при ЭЛПЕ; технология выплавки слитков круглого и прямоугольного сечения и технология оплавления их боковой поверхности; результаты исследования качества металла ЭЛПЕ и уровня его служебных свойств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованной литературы из 192 наименований и приложения. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, имеет 73 рисунка и 31 таблицу.

Во введении обоснована актуальность работы, изложены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе дан обзор научной литературы, в котором отражено современное состояние металлургии титана и производства слитков. Проанализированы преимущества и недостатки известных и вновь создаваемых процессов для переплава отходов титана и его сплавов. Обоснована перспективность решения проблемы утилизации отходов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе изложена методика исследования качества металла, исследовано влияние вида и степени подготовки отходов к плавке на содержание газов в слитках, описана электронно-лучевая установка для реализации процесса ЭЛПЕ и ЭЛО.

В третьей главе представлены результаты исследований: теплофизических условий кристаллизации металла при ЭЛПЕ. Методом математического моделирования определены оптимальные технологические параметры, обеспечивающие получение однородной структуры слитков.

В четвертой главе приведены результаты исследований качества титановых слитков ЭЛПЕ, распределения элементов по высоте и сечению слитка, влияния технологических режимов ЭЛПЕ и ЭЛО на степень рафинирования металла, макро- и микроструктуры, коррозионных и механических свойств.

В пятой главе описана технология получения слитков методом ЭЛПЕ и технология ЭЛО боковой поверхности слитков. Приведены технологические режимы получения широкого сортамента слитков, результаты опытно-промышленной проверки металла ЭЛПЕ (получение листа и труб).

В шестой главе показана экономическая эффективность разработанной технологии переработки отходов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

При различных видах обработки (деформация, литье, резка и т.п.), титан технологически необратимо поглощает кислород и азот из воздуха. Поэтому поверхность отходов имеет определенный альфированный слой. Загрязненные примесями внедрения окрас и стружка содержат осколки режущего инструмента и являются источниками неметаллических включений: низкой (менее 4 г/см^3) и высокой (более 5 г/см^3) плотности, которые ухудшают служебные свойства металла. Для большинства существующих переплавных процессов характерно отсутствие условий рафиниро-

4.

вания жидкого металла от включений обоих типов. Некоторые процессы требуют компактирования расходуемой заготовки (придания ей определенной прочности), специальных операций по подготовке отходов к плавке (измельчение, резка, брикетирование, сварка), имеют повышенный расход электроэнергии или недостаточно подготовлены технически.

В последние годы способ электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью находит все большее применение для решения проблемы утилизации отходов титана и его сплавов. Сущность процесса ЭЛПЕ заключается в горизонтальной подаче расходуемой заготовки (отходов) в зону плавки, ее плавление электронными лучами над промежуточной емкостью. В промежуточной емкости происходит накопление жидкого металла, его рафинирование и усреднение по химическому составу. По мере наполнения расплавом промежуточной емкости жидкий металл сливается в кристаллизатор, где происходит формирование слитка необходимой длины.

В ИЭС им. Е.О.Патона для переработки титановых отходов была создана опытно-промышленная установка УЭ-182М мощностью 1200 кВт. Она позволяет выполнять различные технологические процессы:

- переплав с промежуточной емкостью;
- сплавление поверхностного слоя слитков.

За одно вакуумирование выплавляется слиток до 5 т, как круглого, так и прямоугольного сечения.

Для переплава были использованы отходы титана марки ВТ1-0 и сплавов (ТД-3, ИТ-3В, ВТ3-1, ВТ6С) в виде листовой и литниковой обрезки и стружки.

Установлена зависимость прироста концентрации кислорода в слитках ЭЛПЕ от вида и степени подготовки отходов к плавке. В условиях ЭЛПЕ происходит рафинирование расплава металла от водорода до уровня 0,0005-0,0010%. Степень рафинирования не зависит от исходного содержания водорода, вида отходов, режимов переплава в исследованном диапазоне. Содержание азота не изменялось (табл. I).

При переплаве газонасыщенных (до ~0,2% O₂) отходов можно снизить содержание примесей и получать слитки гарантированного состава, отвечающего требованиям отечественных и зарубежных стандартов, путем разбавления переплавляемой шихты титановой губкой. С увеличением в шихте доли губки марки ТТ-110 до 77% содержание кислорода в слитках титана марки ВТ1-0 снизилось с 0,16% до 0,06%, а содержание алюминия с 0,30 до 0,08%. Увеличение доли губки практически не влияет на содержание в металле ЭЛПЕ таких примесей как железо, кремний, углерод, азот (Рис. I).

Таблица I

Влияние вида шихты на содержание газов в слитках

Марка сплава	Вид отходов	Характеристика поверхности	Содержание газов, %						
			/O/		/H/		/N/		
			исходн.	ЭЛПЕ	исходн.	ЭЛПЕ	исходн.	ЭЛПЕ	
БТ1-0 ПТ-ЭВ ВТ6С ВТЗ-1	обрезь после прокатки	резка газом	катаная неочищенная, газовый рез	0,08	0,16	0,0026	0,0003	0,020	0,020
резка газом, галтовка		катаная очищенная, газовый рез	0,08	0,12	0,0030	0,0007	0,022	0,022	
травление, рубка		травленная, рез	0,08	0,10	0,0037	0,0008	0,013	0,018	
ТЛ-Э	литниковый обрезь (резка газом, дроблет)	газовый рез, литая		0,11	0,14	0,0048	0,0009	0,024	0,024
ПТ-ЭВ	отружка	-		0,35	0,35	0,0142	0,0009	0,027	0,027

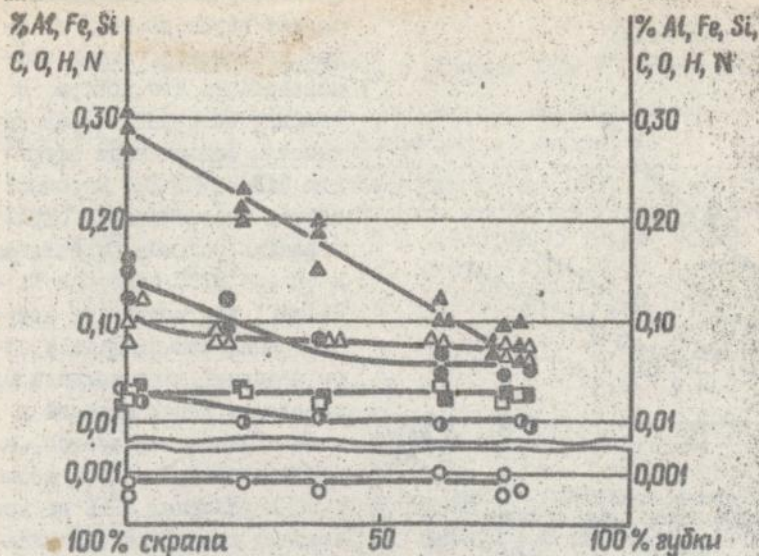


Рис. 1. Содержание примесей в титане BTI-0 после ЭЛП шихты: отходы + губка.
 Δ - Al, \triangle - Fe, \square - Si, \ominus - C, \bullet - O, \square - N, \circ - H.

Применение промежуточной емкости, раздельное протекание процессов плавления и кристаллизации создали условия для рафинирования от включений высокой и низкой плотности. ЭЛП соединила два механизма рафинирования: 1) гравитационное осаждение включений высокой плотности в гарнисаж; 2) равномерное распределение, а затем и растворение включений низкой плотности в объеме жидкого металла при его выдержке в промежуточной емкости до слива в кристаллизатор. Металлографические исследования показали полное отсутствие указанных выше включений по длине и сечению слитков ЭЛП.

Экспериментально установлено, что степень испарения алюминия $\frac{C_0}{C_1}$ зависит от технологических режимов плавки (Рис. 2) и его содержания в исходной шихте (Рис. 3). Степень испарения алюминия при ЭЛП прямо пропорциональна удельному расходу электроэнергии на плавку и исследованном диапазоне.

Проблема обеспечения заданного состава слитков титановых сплавов была решена путем выбора оптимальных параметров плавки, при которых одновременно достигались высокие технико-экономические показатели процесса и минимальные потери на испарение и вводим в шихту

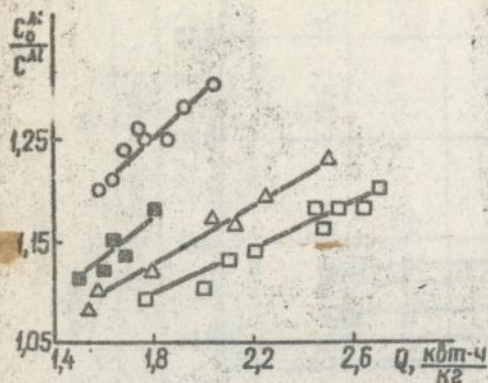


Рис. 2. Степень испарения Al при ЭШПЕ титановых сплавов
 □ - сплав TL-3; △ - PT-3B;
 ■ - BT3-1; ○ - BT6C

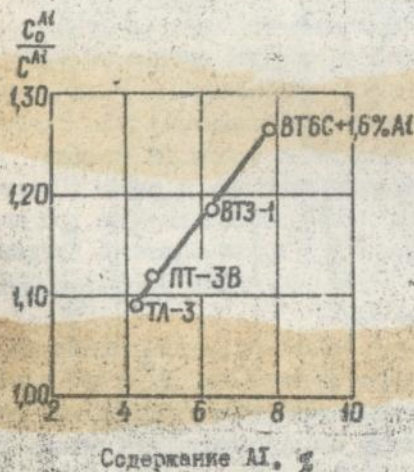


Рис. 3. Степень испарения Al при ЭШПЕ титановых сплавов
 ($Q = 1,8 \frac{kA}{cm^2}$)

и технологической оснастки и плавке; - формирование расходоуемого электрода; - процесс ЭШПЕ.

легколетучего компонента сплава перед плавкой в таком количестве, чтобы компенсировать его потери. В сплавах со сравнительно невысоким содержанием алюминия (TL-3, PT-3B) марочный состав обеспечивался оптимизацией режимов переплава. В сплаве BT6C (система Ti - 6Al-4V) для получения концентрации алюминия на уровне исходной, его вводили в заготовку перед плавкой в виде прутков или кусков, в количестве 1,6 - 1,7% абс.

В условиях ЭШПЕ не происходит испарения тугоплавких β -стабилизирующих элементов (Mo, V) титановых сплавов. Незменным оставалось содержание таких примесей как Fe, Si, C (рис. 4).

Исследования распределения легирующих и примесных элементов в слитках ЭШПЕ, полученных однократным переплавом как с долегированием расходоуемой заготовки, так и без него, показали высокую гомогенность, отсутствие участков макросеоднородности по высоте и сечению (табл.2).

Технология получения слитков в установке У8-162М включала в себя следующие этапы:

- подготовку оборудова-

Таблица 2

Распределение элементов в слитках ЭЛПЕ Ø 395 мм сплава ВТ6С.

Место отбора пробы		Содержание элементов, %							
		Al	V	Fe	Si	C	O	H	N
верх	край	6,20	4,17	0,10	0,02	0,003	0,11	0,0006	0,025
	1/2R	6,12	4,23	0,10	0,03	0,008	0,09	0,0008	0,022
	центр	6,10	4,20	0,10	0,03	0,005	0,10	0,0005	0,023
сере- дина	край	6,14	4,20	0,10	0,03	0,011	0,09	0,0007	0,023
	1/2R	6,20	4,25	0,11	0,02	0,003	0,10	0,0008	0,025
	центр	6,16	4,20	0,11	0,02	0,008	0,11	0,0009	0,028
низ	край	6,22	4,20	0,11	0,02	0,002	0,12	0,0009	0,024
	1/2R	6,05	4,08	0,11	0,03	0,008	0,10	0,0006	0,022
	центр	6,12	4,25	0,11	0,02	0,007	0,10	0,0007	0,026

Таблица 3

Технологические режимы ЭЛПЕ

Размеры кристаллизатора, мм	$P_{зг.+п.е.}$ кВт	$P_{зг.+п.е.}^{уд.}$ кВт/см ²	$P_{кр.}$ кВт	$P_{кр.}^{уд.}$ кВт/см ²	$P_{общ.}$ кВт	$V_{пл.}$ кг/ч	q_1 кВт·ч/кг	q_2 %
Ø 152	90	0,11	32	0,18	122	37	3,30	3,2
Ø 230	174	0,12	48	0,12	222	82	2,71	3,0
Ø 310	240	0,11	60	0,080	300	140	2,10	2,7
Ø 380	440	0,12	74	0,065	514	320	1,60	1,2
Ø 405	450	0,12	80	0,064	530	334	1,59	1,2
Ø 560	560	0,12	200	0,064	760	513	1,48	1,0
150x500	250	0,12	60	0,080	310	150	2,06	2,5

$P_{зг.+п.е.}$, $P_{зг.+п.е.}^{уд.}$ — соответственно, мощность и удельная мощность нагрева заготовки и промежуточной емкости;

$P_{кр.}$, $P_{кр.}^{уд.}$ — соответственно, мощность и удельная мощность, подаваемая на кристаллизатор;

$P_{общ.}$ — общая мощность;

$V_{пл.}$ — массовая скорость переплава;

q_1 — удельный расход электроэнергии;

q_2 — потери металла.

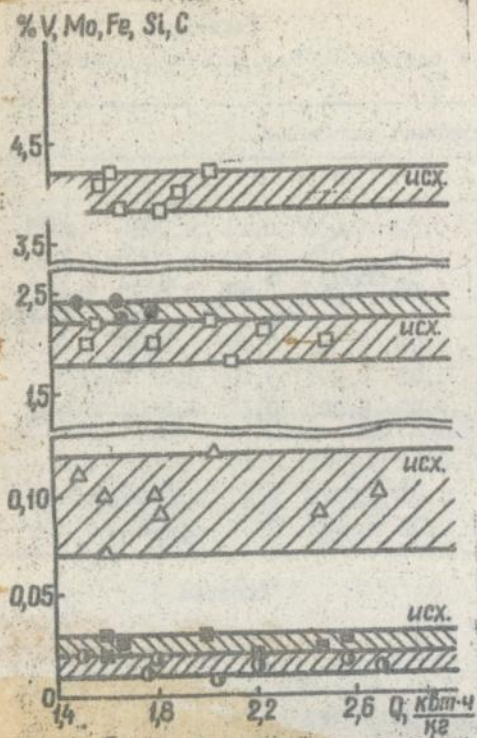


Рис. 4. Изменение содержания элементов при ЭШЕ титановых сплавов:
 □ - V; ● - Mo; ▲ - Fe; ■ - Si; ○ - C

Разработанная технология не требует специальных операций (компактирование, брикетирование, измельчение, резка) по подготовке отходов к плавке.

Технологические режимы ЭШЕ приведены в табл. 3. Выход годного при ЭШЕ обратно пропорционален удельному расходу электроэнергии на плавку (рис. 5).

Процессы затвердевания металла и формирования структуры слитка исследовали методом математического моделирования. Была разработана модель температурного поля слитка при ЭШЕ. Ее основой для цилиндрического слитка является дифференциальное уравнение теплопроводности в частных производных второго порядка:

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

где: $\lambda(T)$ - теплопроводность металла, t - текущее время,
 C_v - объемная теплоемкость с учетом теплоты фазового перехода;
 $0 < r < R_2$; $0 < z < S(t)$; $t > 0$; R_2 - внешний радиус слитка;
 $S(t)$ - высота слитка.

Для вертикального прямоугольного слитка уравнение теплопроводности имело вид:

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

где: $0 < x < \bar{l}_x$; $0 < z < S(t)$; $t > 0$; \bar{l}_x - половина толщины слитка (узкой грани).

Граничные условия: теплообмен на верхнем торце слитка, на его боковой поверхности с окружающей средой и теплообмен нижнего основания слитка с поддоном.

Определено, что слив жидкого металла из промежуточной емкости в кристаллизатор следует производить при отношении площади поперечного сечения кристаллизатора к объему сливаемого жидкого металла в промежуточной емкости, равном 0,5 - 1,5 см⁻¹. Мощность теплового потока в кристаллизаторе составляет 6,5 · 10⁵ Вт/м². При этом обеспечивается минимальная глубина жидкой ванны в кристаллизаторе, плоский фронт затвердения.

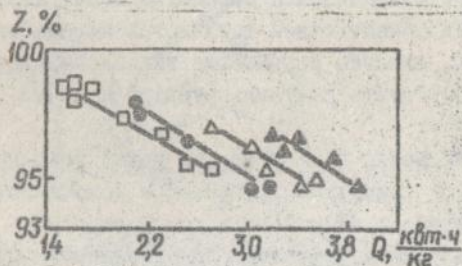


Рис. 5. Зависимость выхода годного от удельного расхода электроэнергии:
 □ - кристаллизатор \varnothing 380 (405) мм;
 ● - \varnothing 310 (150x500) мм;
 ▲ - \varnothing 230 мм; ▲ - \varnothing 162 мм.

Расчетная скорость охлаждения составляет около 10 К/с. Макроструктура слитка - плотная, без дефектов усадочного и ликвационного характера. Образована зернами размерами 3-7 мм по форме близкими к равноосным.

Металл ЭЛПЕ характеризуется высоким уровнем механических свойств в литом и деформированном состоянии (табл. 4).

Таблица 4

Механические свойства металла ЭЛПЕ

Сплав	Состояние металла		σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU_{27} МДж/м ²
ВТ1-0	ЭЛПЕ	литой	376	285	14,0	38,6	2,1
		прокат	498	340	22,8	56,5	1,6
	исходный,	прокат	462	316	27,8	61,4	1,8
ТЛ-3	ЭЛПЕ	литой	663	623	13,6	35,3	0,9
	исходный,	литой	618	546	14,6	28,6	0,8
ПТ-3Э	ЭЛПЕ	литой	586	558	9,5	26,8	1,2
		прокат	723	678	15,0	41,4	1,1
	исходный,	прокат	725	634	10,0	30,6	1,1
ВТ6С	ЭЛПЕ	литой	939	807	6,7	16,0	0,9
	исходный,	прокат	831	779	5,7	19,0	0,6

Титан марки ВТІ-0 ЭЛПЕ обладает высокими коррозионными свойствами в различных агрессивных средах (табл. 5). При этом коррозия носит сплошной равномерный характер, трещины и питтинг отсутствуют. ВТІ-0 ЭЛПЕ не склонен к коррозионному растрескиванию в растворе $\text{CH}_3\text{OH} + 0,4\% \text{HCl}$ в течение 1000 ч.

С целью исключения операции механической обработки перед дальнейшим переделом, этапом создания безотходной технологии переработки отходов титана и его сплавов, явилась разработка технологии электронно-лучевого сплавления поверхности слитков круглого и прямоугольного сечения.

Сущность процесса ЭЛО заключается в перемещении узкой зоны проплавления относительно оплаиваемой поверхности, причем в зависимости от погонной энергии в зоне действия луча металл проплавляется на глубину, превышающую глубину залегания дефектов. Для реализации процесса ЭЛО была выбрана схема, при которой электронный луч неподвижен, а объект вращается вокруг своей оси (для слитков круглого сечения) либо перемещается в горизонтальной плоскости (для слитков прямоугольного сечения) с заданной скоростью.

Исследованы закономерности испарения алюминия при ЭЛО. Степень испарения алюминия $\frac{C_{\text{исп}}}{C_{\text{исп}}}$ прямо пропорциональна поверхностной плотности энергии в диапазоне $0,58 \cdot 10^8 - 1,96 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}$. С увеличением содержания алюминия в сплаве степень его испарения возрастала (рис.6). Концентрация тугоплавких легирующих элементов (V) и примесей (Fe, Si, C) не изменяется.

Таблица 5
Скорость коррозии ВТІ-0 до и после ЭЛПЕ

Условия коррозионных испытаний	i_k , мм/год	
	исходный	ЭЛПЕ
10% H_2SO_4 , 25°C, 336 час.	0,3591	0,2814
	0,4101	0,2998
10% HCl , 25°C, 336 час.	0,2344	0,1800
	0,3202	0,1818
0,9% H_2SO_4 , 50°C, 100 час	0,0036	0,0013
Морская вода, 40°C, 1000 час	без нагрузки	0,0005
	$G = 0,90 \text{ Г т}$	0,0006
		0,0001
		0,0003

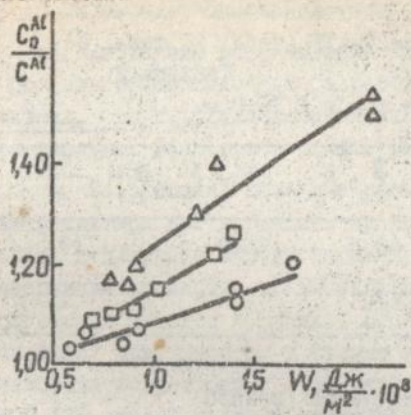


Рис. 6. Степень испарения Al при ЭЛО титановых сплавов

○ - сплав TI-3, □ - TI-3B, △ - BT6C

(табл. 6). Это связано со значительно меньшим количеством конденсата на поверхности слитков ЭЛП.

Исследования макро- и микроструктуры показали высокое качество оплавленной поверхности, отсутствие трещин, неслития, участков усадочной рыхлости, пористости, структурной неоднородности.

Технологические режимы ЭЛО слитков ЭЛП и слитков, полученных методом ВП, приведены в табл. 6. Максимальная длина обрабатываемого слитка оставалась до 2000 мм.

ЭЛО слитков ЭЛП требует меньших энергозатрат и характеризуется большей производительностью, чем ЭЛО слитков ВП

Таблица 6

Технологические режимы ЭЛО.

Вид металла	Размеры слитка, мм	Количество проходов, шт.	v обл., мм/мин	р у.д., $\frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}$	W $\times 10^8 \text{ Дж/м}^2$
ЭЛП	∅ 372	2	120	0,8	0,9
	∅ 395				
	∅ 600				
	145x495	2	105	0,8	0,8
ВП	∅ 430	5	85	0,8	1,0
	∅ 855				

v обл. — линейная скорость оплавления

р у.д. — удельная мощность нагрева

W — поверхностная плотность энергии

Служебные свойства металла, полученного по технологии ЭЛПЕ + ЭЛО соответствуют требованиям ТУ (табл. 7, табл. 8).

Таблица 7

Механические свойства труб $\varnothing 35 \times 2$ мм

Сплав	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, $\frac{МДж}{м^2}$
ЭЛПЕ	400	290	48,5	76,0	1,19
ВТИ-0 ГОСТ 22897-86	>345	>245	>24	-	-

Таблица 8

Механические свойства листового проката

Сплав	Толщина проката, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, $\frac{МДж}{м^2}$	HRB
ВТИ-0 ЭЛПЕ	6	480	395	44	67	1,85	-
	3,54	700,7	648,8	12,5	-	-	96
	3,05	728,7	648,8	15,6	-	-	98
	2,34	758,5	689,9	10,0	-	-	100
ГОСТ 22178-76	6	>370	-	>25	-	-	-
ЭЛПЕ	5	830	740	15	36	-	-
ПТЗ-В ГОСТ 22178-76	5	<880	-	>10	>25	-	-

ЭЛПЕ + ЭЛО позволяют исключить из технологической схемы получения листа и труб промежуточную ковку, механическую обработку. За счет этого расходный коэффициент для производства листа может быть снижен с 2,34 до 1,41, для производства труб с 4,93 до 2,57.

ВЫВОДЫ

1. На основе исследования процесса электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью разработана технология переработки некомпактных, слиточных, газонасыщенных отходов титана и его сплавов произвольных размеров и конфигурации.

2. Разработана методика расчета концентрации кислорода в металле слитков при переплаве кусковой шихты, позволяющая прогнозировать и получать слитки гарантированного химического состава. На содержание кислорода во вторичном металле влияет вид и степень подготовки отходов к плавке. При переплаве литовой обрезки с неочищенной поверхностью и кромками после газовой резки содержание кислорода возрастает с 0,06% до 0,16%, после галтовки - с 0,06% до 0,12%, после рубки и травления - с 0,08% до 0,10%. При переплаве литниковой обрезки после газовой резки и дробеметной обработки содержание кислорода возрастает с 0,11% до 0,14%. Происходит рафинирование от водорода до уровня 0,0005 - 0,0010%. Содержание азота не изменяется и находится на уровне исходного металла.

3. Показано, что титан, отвечающий требованиям стандартов, получает путем разбавления газонасыщенной шихты титановой губкой. При массовой доле 77% губки П-110 концентрация кислорода в слитках ВТ1-0 не превышает 0,06%.

4. Исследованы металлургические особенности электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью α - и $\alpha + \beta$ титановых сплавов. Определено, что при увеличении концентрации алюминия в исходной шихте с 4,2% до 7,6% степень испарения $\frac{C_{Al}}{C_{Al}^0}$ возрастает с 1,06 до 1,26. Установлено, что в интервале изменения удельного расхода электроэнергии на плавку 1,50 - 2,70 кВт.ч/кг потери алюминия испарением составляют 7 - 32%.

5. В результате исследования процесса испарения алюминия при переплаве отходов α - и $\alpha + \beta$ титановых сплавов оптимизированы технологические параметры, обеспечивающие получение слитков заданного химического состава. Определено, что в сплавах с концентрацией алюминия более 6%, заданный химический состав обеспечивается додегированном расходуемой заготовке алюминием в количестве 1,5 - 1,7% абс.

6. По результатам модельных и натуральных исследований тепло-физических условий кристаллизации металла установлены оптимальные параметры порционной плавки, которые обеспечивают получение слитков с однородной структурой. Отношение поперечного сечения кристаллизатора к объему сливаемого металла составляет $0,5 - 1,5 \text{ см}^{-1}$, скорость переплава - $9-12 \text{ мм/мин}$, плотность теплового потока в кристаллизаторе $6,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$, удельная мощность нагрева расходной заготовки и промежуточной емкости $0,11-0,12 \text{ кВт/см}^2$. При этом выход годного металла находится в пределах $97,3-98,6\%$.

7. Разработана технология электронно-лучевого оплавления слитков круглого и прямоугольного сечения, исключая их механическую обработку, обеспечивающая одновременную обработку поверхности слитков по всей длине на глубину до 10 мм . Определено, что степень испарения алюминия прямо пропорциональна поверхностной плотности энергии в интервале $0,58 \cdot 10^8 - 1,96 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^2$.

8. Технология электронно-лучевого оплавления позволяет обрабатывать слитки со скоростью $85-120 \text{ мм/мин}$, удельной мощностью нагрева $0,8 \text{ кВт/см}^2$, плотностью энергии $0,6 \cdot 10^8 - 1,0 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^2$ и повышает коэффициент использования металла на $7,5-10\%$.

9. Опытно-промышленная проверка вторичного металла показала, что за счет сокращения количества операций по переделу повышается коэффициент использования металла в $1,6$ раза при производстве листа и в $1,9$ раза при производстве труб. Механические свойства полученных полуфабрикатов полностью соответствуют требованиям стандартов.

10. Разработана опытно-промышленная установка УЗ-182М модульного типа для переработки некомпактного скрапа, сыпучей шихты и выплавки слитков вторичного титана и его сплавов, оплавления боковой поверхности производительностью 250 т в год.

Основное содержание диссертации напечатано в работах:

1. Утилизация отходов титанового производства методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // А.Н. Калинин, А.Л. Техоновский, Н.П. Тригуб, А.Я. Дереча, В.И. Уртьев, А.Л. Гереславский // Пробл. спец. электрометаллургии. - 1991. - № 1. - С. 59-63.

2. Electron beam technology in the automotive industry / В.Е. Paton, Н.Р. Trigub, Р.А. Pap, S.V. Akhoniin, А.Н. Kalinyuk // Automotive Manufacturing Int'94. - 1994. - P. 135-139.

3. Поверхностная обработка титановых сплавов электронным лучом /А.Н.Калинюк, А.А.Держач, Н.І.Тригуб // Пробл. спец. электрометаллургии. - 1995. - № 1. - С. 29-31.

4. Математическое моделирование процессов рафинирования металлов от газов при электронно-лучевом переплаве с промежуточной емкостью /С.В.Ахонин, Н.П.Тригуб, А.Н.Калинюк, С.В.Цвелодуб // Пробл. спец. электрометаллургии. - 1995. - № 2. - С. 35-42.

5. Калинюк А.Н. Утилизация отходов титановых сплавов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ). доклад на I Междунар. конф. молодых ученых в области сварки и смежных технологий. ИЭС им. Е.О.Патона, Киев, 16-20 мая 1995 г.

6. Ахонин С.В., Тригуб Н.П., Калинюк А.Н. К вопросу о механизме удаления водорода из титана в процессе электронно-лучевой плавки. Доклад на I Междунар. конф. "Водородная обработка материалов". ДТУ. Днепропетровск, 20-22 сентября 1995 г.

Личный вклад автора. В работах, выполненных в соавторстве, основной вклад в проведение экспериментов и анализ результатов принадлежит автору. В работе / 1, 3, 5/ изучены особенности рафинирования от элементов с высокой упругостью пара, тугоплавких β - стабилизирующих элементов и примесей при ЭЛПЕ и ЭЛО, механические свойства металла в литом и деформированном состоянии, структура слитков. В / 2 / автор исследовал коррозионные свойства металла ЭЛПЕ. В / 1 / - предложил способ переплава титановой стружки расплавом металла в промежуточной емкости. В / 4, 6 / - изучил рафинирование металла от водорода при ЭЛПЕ.

Калинюк О.М. "Электронно-променева технологія переробки титанових відходів". Рукопис дисертації на здобування наукового ступеня кандидата технічних наук. Спеціальність 05.16.07 - металургія металів високої чистоти та спеціальних сплавів. ІЕС ім. Е.О.Патона НАН України, м. Київ, 1995 р.

Вивчені закономірності поведінки легіруючих елементів в високій пружності пари, тугоплавких β - стабілізуючих елементів, домішок, умов кристалізації металу при електронно-променевому переплаві в проміжній місткості (ЕПМ) і електронно-променевому сплавленні бічної поверхні зливків (ЕПО) титала та титанових сплавів.

Розроблена електронно-променева технологія переробки відходів титана та його сплавів у вигляді листових та ливарних обрізків, стружки. Технологія включає в себе одержання хімічно та фізично однорідних злиwkів марочного складу методом ЕШМ з подальшим їх ЕПО для виключення операції механічної обробки перед прокаткою. Дозволяє значно збільшити вихід годного при виробництві напівфабрикатів (листа, труб).

Ключові слова: електронно-променева плавка, проміжна місткість, електронно-променеве сплавлення, титан, титанові сплави, відходи, рафінування, легіруючі елементи, домішки.

Kalinyuk A.N. "The electron beam technology of the titanium scrap recycling". The manuscript of the thesis for the doctor of science degree obtaining. Speciality 05.16.07 - the high pure metals and special alloys metallurgy. E.O.Paton EWI NAS of Ukraine, Kiev, 1995.

The behaviour of high resilient vapour alloying elements, refractory β -stabilizing elements, impurities, solidification conditions at the electron-beam cold hearth melting (EBCHM) and electron-beam surface glazing (ESBG) of titanium and titanium alloys ingots was studied.

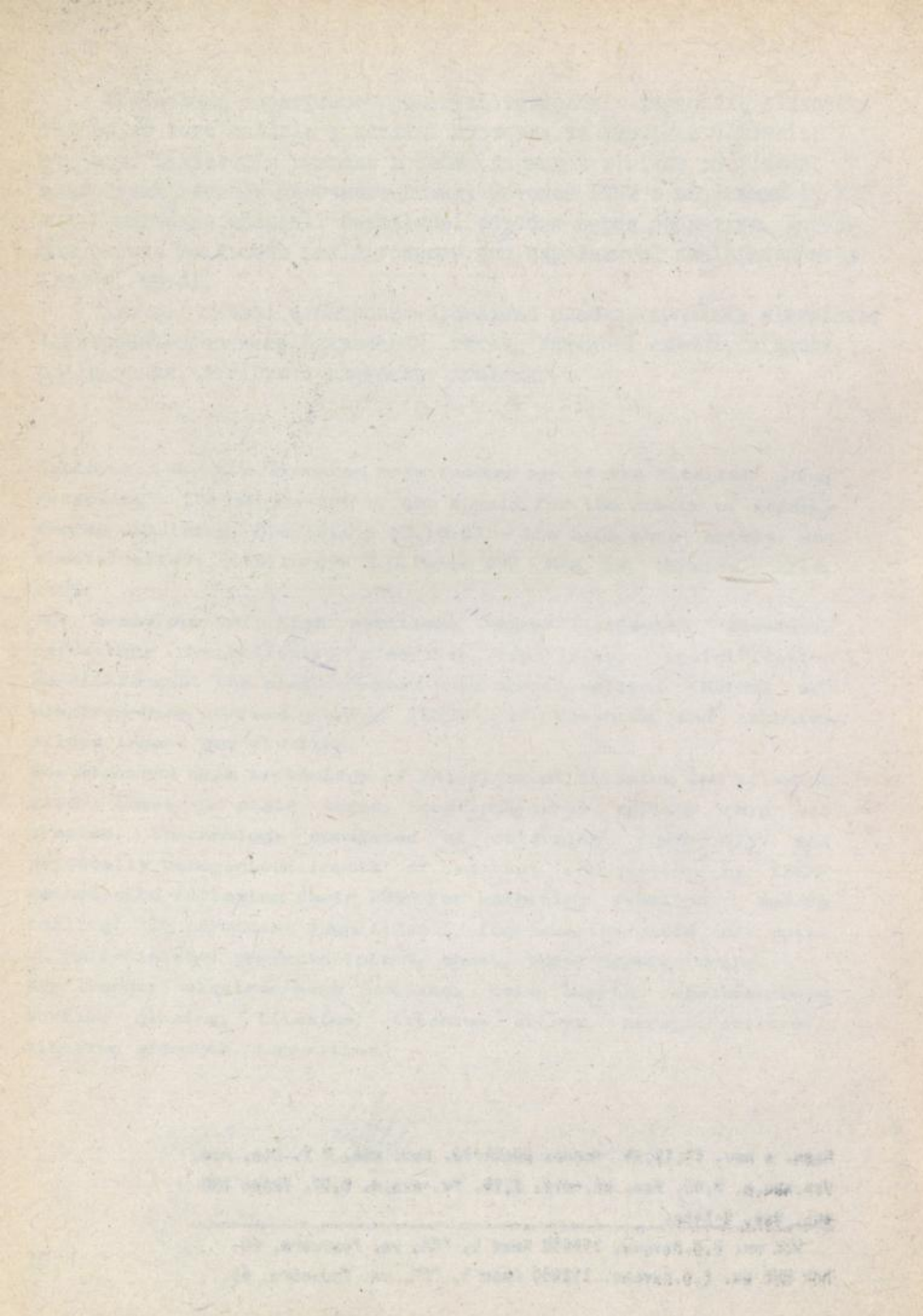
The electron beam technology of recycling of titanium and titanium alloys sheet and plate scrap, casting scrap machine chip was created. Thechnology consisted of obtaining chemically and physically homogenous ingots of warrant composition by EBCHM method with following their EBSG for machining exeption before rolling. It permesses significantly increase the yield of metal at half-finished products (plate, sheet, tube) manufacturing.

Key words: electron-beam melting, cold hearth, electron-beam surface glazing, titanium, titanium alloys, scrap, refining, alloying elements, impurities.



Подп. в печ. 15.12.95. Формат 60x84/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ.
Усл.печ.л. 0,93. Усл. кв.-отт. 1,16. Уч.-мед.л. 0,97. Тираж 100
экз. Зак. 5-341р.

ИЗС им. Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.
ПОП ИЗС им. Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.



1556541

AB 33.876