

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

Б. Е. Патон, С. В. Ахонин, В. А. Березос

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

Показано, что технология электронно-лучевой плавки является наиболее перспективным процессом получения качественных особо чистых слитков металлов и сплавов. Работы по созданию этих технологий начаты в ИЭС им. Е. О. Патона в 1960-е годы. Для практической реализации технологии электронно-лучевой плавки в ИЭС им. Е. О. Патона созданы специализированные электронно-лучевые установки разнообразных конструкций. Разработаны математические модели процессов рафинирования, испарения и кристаллизации при электронно-лучевой плавке. Проведенные исследовательские работы показали, что технология электронно-лучевой плавки является наиболее эффективным и экономически оправданным способом получения особо чистых ниобия, тантала, ванадия, циркония, меди и многих других металлов. Разработаны технологии для промышленного применения данного способа при получении слитков цветных металлов и их сплавов. Ведутся работы по усовершенствованию существующих и разработке новых сплавов для нужд отечественной промышленности, медицины и оборонного сектора, а также технологии их выплавки способом электронно-лучевой плавки. Библиогр. 33, табл. 12, ил. 21.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; слиток; цветные металлы; рафинирование; химический состав; структура; механические свойства; оборудование

Примеси в металлах и сплавах оказывают значительное влияние на их физико-химические свойства [1]. Многие из примесей относятся к вредным, резко ухудшающим свойства металлических материалов. Современная промышленность нуждается в полуфабрикатах из металлов и сплавов с минимальным содержанием газов и примесей. Разработка эффективных способов удаления вредных примесей в процессе получения и дальнейшей обработки металлов и сплавов является одной из основных проблем современной металлургии. Следует отметить, что достаточно большая потребность в особо чистых, высококачественных металлических материалах возникла в связи с развитием атомной энергетики, авиации, ракетно- и судостроения, электроники и химического машиностроения [2, 3]. Потребности указанных отраслей промышленности в металлах и сплавах с высокими эксплуатационными характеристиками могут быть удовлетворены путем совершенствования существующих технологических процессов, а также поиска и разработки новых, наиболее прогрессивных процессов производства и обработки металлов и сплавов.

Возможности по решению задач повышения качества конструкционных материалов заключены в процессах, протекающих при высоких температурах в условиях вакуума. Практическая реализация этих процессов требует применения

мощных источников нагрева с большой удельной плотностью энергии. Способы специальной электрометаллургии — вакуумно-индукционная (ВИП) и вакуумно-дуговая (ВДП) плавки имеют ограниченные возможности применительно к получению металлов и сплавов высокой степени чистоты в результате загрязнения огнеупорными материалами или относительно небольшую степень рафинирования от вредных примесей и неметаллических включений из-за недостаточной регулируемости технологического процесса. В настоящее время самыми перспективными для осуществления химико-металлургических процессов в указанных условиях являются электронно-лучевые технологии [4].

Технология электронно-лучевой плавки (ЭЛП) — процесс получения качественных особо чистых слитков металлов и сплавов. Высокий вакуум в камере электронно-лучевой установки является одним из основных достоинств, определяющих высокую эффективность рафинирования, а также защитной средой. Высокая концентрация энергии электронного луча обеспечивает нагрев поверхности металлической ванны выше температуры плавления металла [5], что, в свою очередь, положительно влияет на процессы рафинирования. Благодаря высокому разрежению газовой фазы над расплавом осуществляется быстрый отвод образовавшихся молекул от межфазной по-

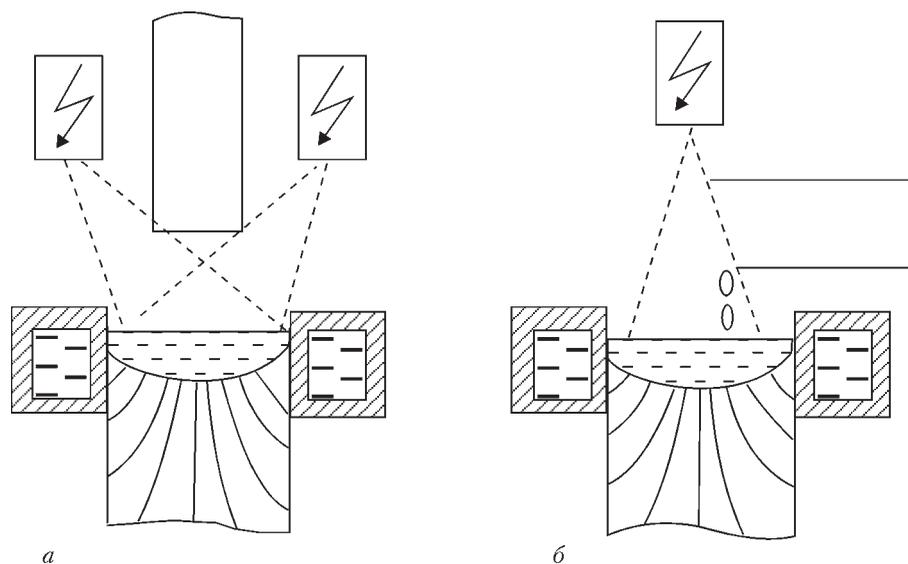


Рис. 1. Технологические схемы ЭЛП непосредственно в кристаллизатор: *а* — с вертикальной подачей расходуемой заготовки; *б* — горизонтальной

верхности, что улучшает условия гетерогенных процессов дегазации. Одним из основных факторов, определяющих полноту удаления примесных элементов и неметаллических включений из металла, является длительность выдержки жидкого металла в вакууме. При ЭЛП возможно регулирование скорости плавления слитка в широких пределах благодаря независимому источнику нагрева, что позволяет регулировать продолжительность пребывания металла в перегретом состоянии и эффективно удалять из металлов многие легкоплавкие примеси (свинец, цинк, висмут, олово и т. д.), а также снизить общее количество неметаллических включений [6].

Работы по созданию технологий ЭЛП были начаты в ИЭС им. Е. О. Патона в 60-е годы прошлого века [7]. Для практической реализации ЭЛП созданы специализированные электронно-лучевые установки (ЭЛУ) разнообразных конструкций [8–13].

Классической схемой электронно-лучевой плавки является прямой переплав расходуемой заготовки непосредственно в медный водоохлаждаемый кристаллизатор, где происходит затвердевание металла. За рубежом эта технология получила название «капельная плавка» [14].

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины опробованы технологические схемы ЭЛП непосредственно в кристаллизатор, которые позволяют подавать в зону плавки расходуемую заготовку как вертикально, так и горизонтально (рис. 1).

Технологическая оснастка установки для прямого переплава состоит из медного водоохлаждаемого проходного кристаллизатора и медного водоохлаждаемого поддона (рис. 2). Так как жидкий металл имеет высокую температуру и интенсивно излучает тепло, для защиты от перегрева стенки

вакуумной камеры и технологические узлы установки охлаждаются проточной водой.

Расходуемую заготовку подают в зону плавки с помощью штокового или цепного механизма подачи. Под влиянием бомбардировки ускоренными электронами осуществляется нагрев и плавление торца расходуемой заготовки, а расплавленный металл стекает при этом в водоохлаждаемый медный кристаллизатор, где создается ванна жидкого металла, подогреваемая электронными лучами. По мере плавления расходуемой заготовки осуществляют вытягивание формируемого слитка со скоростью, обеспечивающей поддержание постоянного уровня жидкой ванны в кристаллизаторе.

Для реализации процессов ЭЛП в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны плосколучевые пушки П-104 мощностью 100 кВт [4]. В основу этих пушек положена электронно-оптическая система Пирса, формирующая плоский поток электронов. В ЭЛУ обычно несколько плосколучевых пушек для рассматриваемого типа объединяют в один блок — нагреватель [4].

Появление нового электрометаллургического процесса создало предпосылки для глубокого изучения его возможностей при получении многих металлов и сплавов.

Железо. Для получения железа высокой степени чистоты, особенно с низким содержанием углерода и кислорода, в ходе исследовательских работ было установлено, что в процессе ЭЛП происходит снижение углерода, кислорода и серы, причем содержание первых двух понижается приблизительно в два раза по сравнению с металлом ВИП. Поэтому в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработан способ обезуглероживания технически чистого железа и малоуглеродистой стали —

Таблица 1. Содержание примесей в слитках железа, мас. %

Марка железа	Состояние	C	O ₂	Si	S	Mn	Cu	N ₂
Армко	Исходное	0,04	0,008	0,15	0,02	0,1	0,15	0,01
	После ЭЛП	0,002	0,002	0,05	0,008	<0,01	<0,01	0,006
Сталь 0,8 кп	Исходное	0,06	–	0,01	0,03	0,3	–	0,008
	После ЭЛП	0,004	0,0009	–	0,009	<0,01	–	0,0008

Таблица 2. Содержание примесей в слитках никеля, мас. %

Марка никеля	Состояние	C	Cu	Fe	Si	Mg	Mn	Zn	Pb	[O]	[N]	[H]
Н0	Исходное	0,005	0,0003	0,001	0,0006	0,0003	–	0,0002	0,0003	0,003	0,0015	0,0003
	После ЭЛП	0,01	»-»	0,002	0,0007	»-»	–	–	–	0,0002	0,0003	0,0001
Н1	Исходное	0,008	0,003	0,02	0,0008	»-»	–	0,0004	0,0002	0,005	0,002	0,0004
	После ЭЛП	0,012	0,002	0,005	0,0005	»-»	–	–	–	0,0004	0,0003	0,0001
НП-2	Исходное	0,05	0,04	0,03	0,1	0,005	0,002	0,005	0,0006	0,002	–	0,002
	После ЭЛП	0,04	0,02	0,02	0,002	–	–	–	0,00008	0,0008	–	0,0001

ЭЛП. С помощью этого способа достигнуто низкое содержание кислорода и примесей (серы, кремния, меди, марганца, азота, водорода и т. д.) при рафинировании технически чистого железа (армко) и стали 0,8 кп (табл. 1).

Никель. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведен комплекс исследований по повышению степени чистоты, улучшению структуры и свойств никеля способом ЭЛП.

В качестве шихты использовали пластины катодного никеля марки Н0, Н1, а также никель марки НП-2. Сравнительный анализ содержания газов в никеле, переплавленном разными способами плавки, показал, что при ЭЛП достигается значительно более высокая степень удаления газов (табл. 2, 3).

Кроме содержания газов при ЭЛП никеля снижается содержание металлических примесей (табл. 2). Анализ полученных данных показал, что магний, марганец, цинк и свинец интенсивно испаряются из никеля вследствие более высокой упругости пара. Примеси кремния, железа и меди менее летучи, однако их содержание также снижается.

Структура слитков никеля ЭЛП плотная, крупнозернистая с четко выраженными границами зерен (рис. 3).

Никель ЭЛП обладает высокой пластичностью и легко деформируется при нормальных условиях.

Таблица 3. Содержание газов в слитках никеля полученных различными способами, %

Марка никеля	Способ получения	[O]	[H]
Н0	Электролиз	0,005...0,017	0,0007...0,0035
НВК	ВИП	0,002	0,0003
НВ	ВДП	»-»	»-»

Ниобий. В настоящее время способ ЭЛП является наиболее эффективным и экономичным процессом

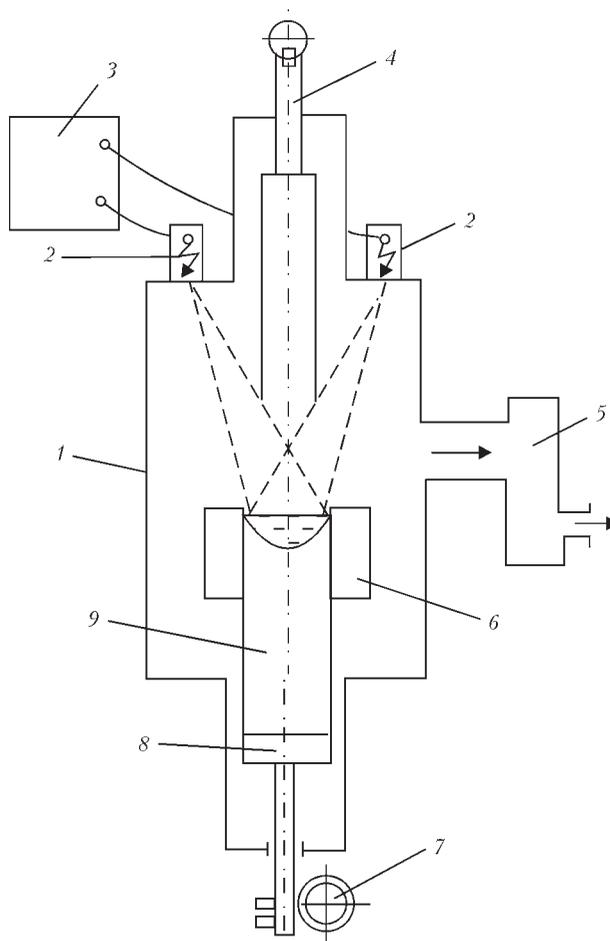


Рис. 2. Принципиальная схема ЭЛУ для прямого переплава: 1 — вакуумная камера с водоохлаждаемым кожухом; 2 — электронно-лучевые пушки; 3 — источник высокого напряжения и система управления разверток лучей; 4 — система загрузки сплавляемой заготовки; 5 — вакуумная система; 6 — технологическая оснастка; 7 — механизм вытягивания слитка; 8 — поддон; 9 — слиток

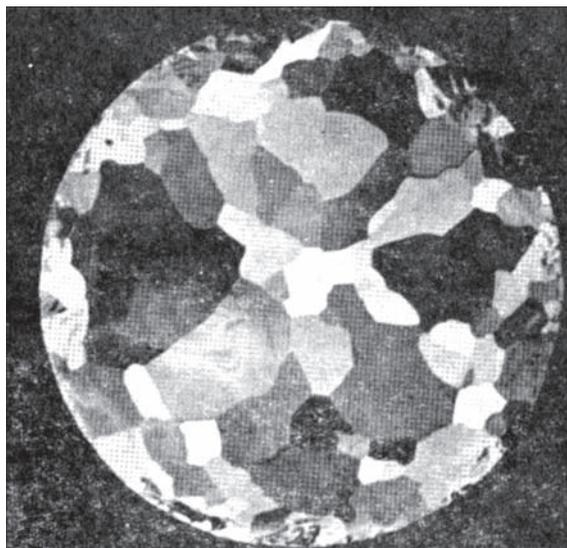


Рис. 3. Макроструктура слитка никеля

получения компактных особо чистых ниобия и тантала. Достаточно полное удаление большой гаммы примесей при ЭЛП этих материалов обусловлено физико-химическими процессами, протекающими на границе жидкий металл–вакуум. Основным критерием качества слитков ниобия является содержание в них вредных примесей, а также однородность их распределения по объему слитка. Как показали результаты экспериментальных исследований, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, наиболее трудно удаляемой примесью при ЭЛП ниобия является азот [15]. Для его удаления необходимы более низкие скорости плавки или более низкое исходное его содержание в переплавляемой заготовке. Если заданный технологический режим обеспечивает удаление азота до требуемого уровня, то и остальные примеси также удаляются до значений, определяемых требованиями стандартов [15]. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в условиях промышленных предприятий разработана технология ЭЛП слитков ниобия. Слитки ниобия выплавля-



Рис. 4. Слиток ниобия диаметром 200 мм

Таблица 4. Содержание газов в слитках ниобия, полученных способом ЭЛП, %

Состояние	O ₂	N ₂	H ₂
Исходное	0,10	0,08...0,17	0,01
После ЭЛП	0,001	0,005...0,007	0,0001

ли в кристаллизатор диаметром 200 мм, которые в дальнейшем использовались как исходные заготовки для изготовления листа, фольги, проволоки (рис. 4).

Результаты газового анализа опытно-промышленных плавок слитков ниобия показали значительное снижение кислорода, водорода и азота после ЭЛП (табл. 4).

Большое значение имеет структура слитков и отсутствие внутри слитка и на его поверхности дефектов в виде пор, несплошностей и неметаллических включений.

Структура металла слитков ниобия плотная, однородная, с отсутствием различно травящихся зон по сечению слитка (рис. 5). Кристаллическое строение металла одинаковое по всей его длине, при этом зона равноосных кристаллов отсутствует, а зона столбчатых кристаллов занимает практически весь объем слитка. Дефекты в виде пор, раковин и трещин не обнаружены.

Проведенные исследования микроструктуры показали, что в ниобии, полученном способом ЭЛП, неметаллические включения (мелкие дисперсные частицы неправильной формы типа карбонитридов) встречаются редко, их размеры находятся в диапазоне от 3 до 13 мкм. Объемная доля неметаллических включений не превышает 0,007 %.

Для слитков товарного ниобия одним из наиболее важных требований к механическим характеристикам металла является твердость. Обработка результатов прокатки промышленных партий ниобиевой фольги и прутка позволили сделать вывод о том, что при твердости металла слитков ниобия более 800 МПа по Бринеллю (ГОСТ 9012–59) потери и отбраковка проката резко возрастают. Определение твердости показало, что у всех товарных слитков ниобия, полученных способом ЭЛП, твердость ниже 800 МПа.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили высокое качество слитков ниобия, полученных по разработанной технологии ЭЛП.

Тантал. Сочетание таких физико-химических свойств тантала, как высокая температура плавления, высокая эмиссионная способность, низкое давление пара и малая скорость испарения при высоких температурах (до 2000 °С) делают его уникальным конструкционным материалом для электровакуумных приборов [16]. Из танталовых листов и проволоки изготавливают аноды, катоды прямого и косвенного накала, пружины и другие

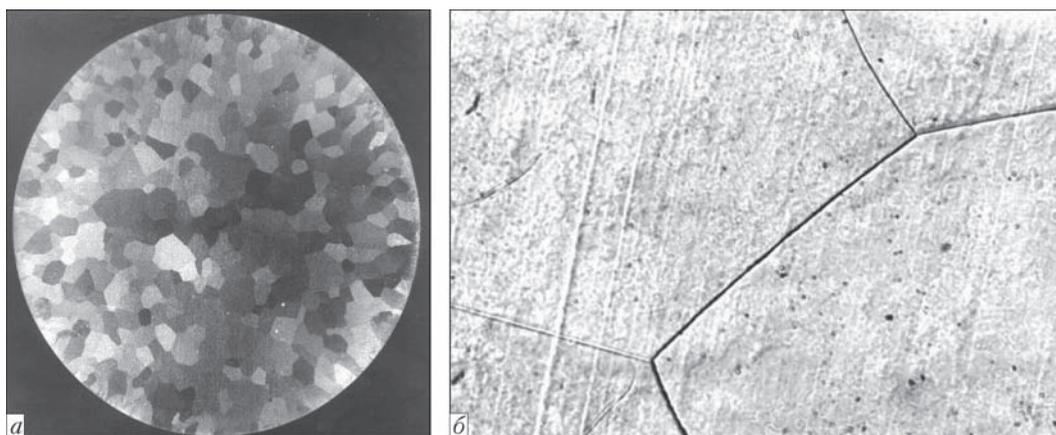


Рис. 5. Структура слитка ниобия после ЭЛП: *а* — макроструктура; *б* — микроструктура (×100)



Рис. 6. Слитки тантала, полученные способом ЭЛП, мм: *а* — диаметром 134; *б* — 70×150; *в* — 150×200

детали. Кроме чистого тантала для тех же целей применяют тантало-ниобиевые сплавы.

В ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины проведены работы по отработке технологии ЭЛП получения слитков тантала диаметром 134 мм, 70×150 и 150×200 мм (рис. 6). Полученные слитки ЭЛП использовали для производства танталовых конденсаторных порошков, а также направляли на дальнейший передел для изготовления листа и фольги.

В процессе ЭЛП тантала по разработанной технологии содержание таких примесей внедрения как кислород и углерод в товарных слитках не возрастает, а концентрация азота даже несколько уменьшается (табл. 5).

Структура слитков тантала характеризуется крупнозернистым кристаллическим строением с аксиальной направленностью кристаллов. Зона равноосных кристаллов отсутствует, а зона столбчатых занимает практически весь объем слитка. Микроструктурные исследования показали, что пористость в слитках отсутствует.

Анализ различных методов рафинирования тантала показал, что наиболее перспективным способом выплавки танталовых слитков, в том числе при утилизации лома тантала, является технология ЭЛП, которая обеспечивает наибольшую степень рафинирования при наименьших затратах [17, 18].

Следующим шагом к дальнейшему развитию процесса ЭЛП явилось использование в технологической схеме электронно-лучевой плавки про-

межуточной емкости, которая позволила практически полностью разделить процессы плавления и рафинирования, а также затвердевания металла в кристаллизаторе [10, 19, 20]. Это позволило более полно использовать такое преимущество процесса ЭЛП, как возможность плавно и в широких пределах изменять мощность электронного пучка и конфигурацию зон нагрева [21, 22]. Создавая на поверхности слитка или расплава в кристаллизаторе температурные поля специального профиля, можно эффективно влиять на процессы кристаллизации металла [23].

Кроме этого снижаются требования к исходной заготовке, что позволяет использовать даже некомпактированную шихту [24].

Для ЭЛП с промежуточной емкостью используют электронно-лучевые установки, которые конструктивно состоят из камер плавки, загрузки и слитка (рис. 7). Установки также оснащены блоками электропитания, вакуумными системами, системами управления и стабилизации луча.

Для реализации разработанных технологий ЭЛП в Институте электросварки им. Е. О. Пато-

Таблица 5. Среднее содержание элементов в слитках тантала, полученных способом ЭЛП, %

Состояние	N	O	C	Fe
Исходное	0,012	0,03	0,0035	0,012
После ЭЛП	<0,003	<0,01	0,0025	<0,005

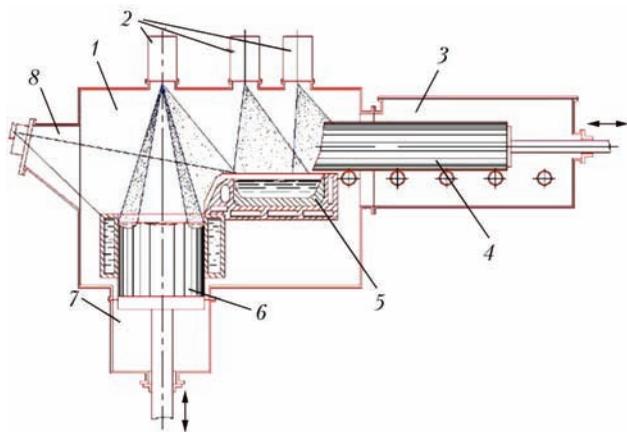


Рис. 7. Схема ЭЛУ с промежуточной емкостью: 1 — камера плавки; 2 — электронные пушки; 3 — камера заготовки; 4 — шихтовая заготовка; 5 — промежуточная емкость; 6 — слиток; 7 — камера слитка; 8 — смотровая система

на НАН Украины создана аксиальная электронная пушка «Патон-300» (рис. 8) мощностью 300 кВт.

Технические характеристики пушки «Патон-300»

Номинальная мощность, кВт.....	300
Ускоряющее напряжение, кВ.....	30
Максимальная частота развертки, Гц.....	1000
Максимальная сила тока, А.....	10
Угол отклонения пучка от оси пушки, град.....	0...35

Пушка состоит из катодного узла с вольфрамовым электродом, установленного на высоковольтном изоляторе, анодного водоохлаждаемого узла, магнитной линзы, отклоняющей системы, лучевода и оснащена индивидуальной системой вакуумирования [25, 26]. Электропитание пушки осуществляется с помощью высоковольтного источника постоянного напряжения мощностью 30 кВ, состоящего из коммутационной пускоза-

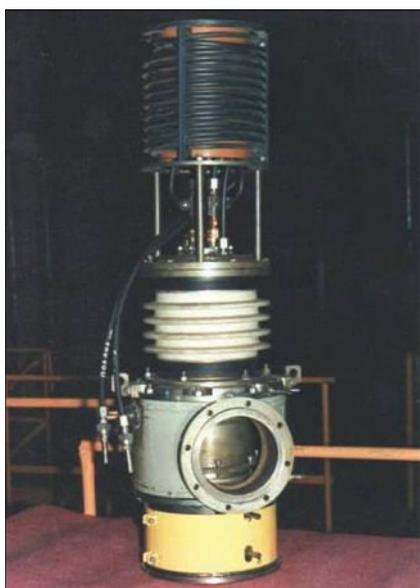


Рис. 8. Внешний вид плавильной электронной пушки «Патон-300»

щитной аппаратуры, тиристорного ключа, дросселя, трансформатора, выпрямителя и источников накала катодов пушек. Система управления обеспечивает стабилизацию тока электронного луча путем введения обратной связи в цепь автоматической регулировки тока накала катода.

Как уже отмечалось, электронно-лучевые плавильные установки могут иметь одну или несколько электронных пушек той или иной конструкции с различным расположением их относительно кристаллизатора и переплавляемого материала. Причем по условиям рафинирования металла установки с несколькими электронными пушками намного превосходят установки с одной электронной пушкой.

Медь. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведены промышленные исследования получения слитков меди высокой степени чистоты способом ЭЛП. Предварительные лабораторные исследования показали, что обычная электронно-лучевая плавка электролитических пластин меди малоэффективна. Слитки содержат повышенное количество кислорода и большое количество микропор. В результате проведенных работ разработана специальная технология раскисления меди углеродом в процессе ЭЛП и опробована в полупромышленных масштабах.

Технология выплавки слитков способом ЭЛП заключалась в следующем. После загрузки шихтовой заготовки установку вакуумировали до уровня остаточного давления, необходимого для устойчивой работы электронно-лучевых пушек ($10^{-1} \dots 10^{-2}$ Па). Затем заготовку сплавляли в промежуточную емкость до ее заполнения и периодически сливали жидкий металл в кристаллизатор. В процессе плавки применяли промежуточную емкость, рабочая область которой имела графитовую футеровку. Кроме того, корпус и сливной носок промежуточной емкости разделены между собой перфорированным графитовым барьером, на котором закреплена графитовая подина, а пространство между подиной и футеровкой промежуточной емкости заполнено древесным углем [27]. Такая конструкция промежуточной емкости, за счет введения угольного фильтра, позволила увеличить площадь взаимодействия меди с графитом, что способствовало высокой очистке металла от кислорода, водорода, оксидных пленок и неметаллических включений. Для выплавки слитков использовали медный водоохлаждаемый проходной кристаллизатор требуемых размеров и сечения, оснащенный вертикально перемещаемым поддоном с углублением в виде «ласточки хвоста»



Рис. 9. Слитки меди, полученные способом ЭЛП, диаметром, мм: а — 200; б — 400

или с предварительно установленными «закладными». Первыми порциями слива формировали заправку будущего слитка. Затем на постоянном технологическом режиме выплавляли слиток необходимой высоты. Обогрев слитка в кристаллизаторе производили путем сканирования его поверхности электронным лучом.

После плавки слиток находился в камере в условиях вакуума до полного его охлаждения.

Результаты газового, спектрального и химического анализов большого числа плавок показали, что в установках ЭЛП можно получать слитки меди диаметром 100...400 мм высокой чистоты (рис. 9, табл. 6).

Макроструктура слитков меди, полученных способом ЭЛП, крупнозернистая, усадочные раковины отсутствуют. Границы зерен тонкие, чистые, посторонних включений не обнаружено. После горячего прессования слитков ЭЛП меди микропоры в прутках не обнаружены.

Электросопротивление, определенное по ГОСТ 193-60, колеблется в пределах 0,01703...0,01710 Ом·мм²/м, что на 1,0...1,5 % меньше стандартного (0,01724 Ом·мм²/м). Испытания по ГОСТ 1688 показали, что медь ЭЛП не склонна к водородной хрупкости.

Из проведенных в ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины работ следует, что ЭЛП позволяет получать слитки особо чистой меди вплоть до марок М001 с высокой плотностью, электропроводностью и стойкостью против водородной хрупкости.

Сплавы на основе никеля. Одной из основных тенденций развития современной металлургии является получение структуры и свойств металла слитка, которые максимально благоприятствуют его дальнейшей деформации и механической обработке. Задачами, которые необходимо решать при выплавке таких слитков, являются измельчение структуры, преодоление структурной и химической макро- и микронеоднородности. При этом необходимо обеспечить высокую чистоту металла слитков от газов, вредных примесей и включений. Необходимый уровень чистоты обеспечивают технологии, которые используют вакуум как защитную среду. Структурообразование слитка определяется в основном марочным составом сплава, теплофизическими условиями его кристаллизации, а также содержанием в нем примесей. Теплофизические условия в кристаллизаторе решающим образом влияют на структуру слитков.

Широкие возможности по регулированию нагрева поверхности слитка металла в кристаллизаторе обеспечивает ЭЛП с промежуточной емкостью благодаря применению независимого источника нагрева — электронного луча. Наличие промежуточной емкости позволяет эффективно рафинировать расплав металла и обеспечивать его подачу в кристаллизатор необходимыми порциями с заданной частотой. ЭЛП позволяет, за счет разделения процессов плавки и кристаллизации, в широких границах изменять условия нагрева металла в кристаллизаторе при неизменной скорости плавки. В условиях установившейся технологиче-

Таблица 6. Содержание элементов в слитках меди, полученных способом ЭЛП, %

O ₂	H ₂	N ₂	Sb	Pb	Sn	As	Ni	Bi	Zn	Fe	P	S
0,0002... ... 0,0004	0,00002... ... 0,00008	—	0,0007	0,0002	—	0,0002	0,0006	—	0,0007	0,0008	0,0002... ... 0,0008	0,0008... ... 0,0012

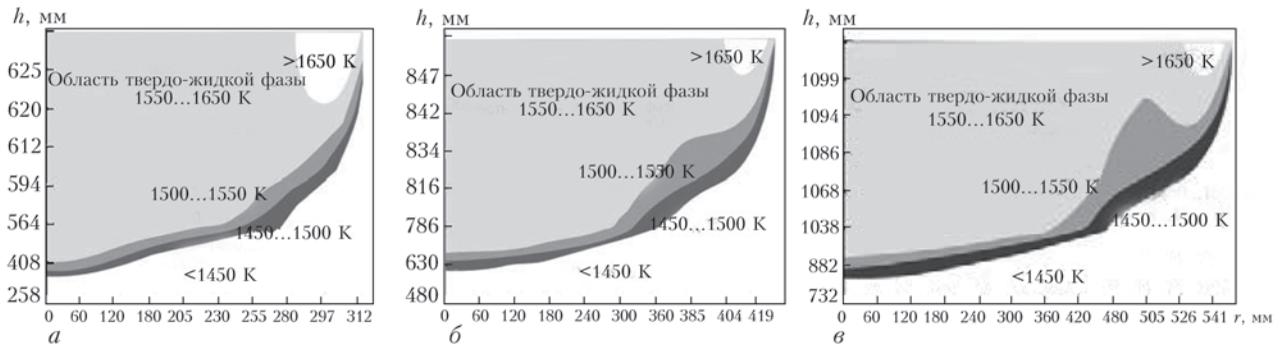


Рис. 10. Температуры поля слитков диаметром 630 мм (а), 850 (б) и 1100 (в) из жаропрочного сплава на основе никеля ЭП-975 в процессе ЭЛП

ской схемы производства слитков особое значение приобретает исследование процесса кристаллизации и сопутствующих ему явлений, определяющих строение и, в сочетании с составом шихты, свойства слитков и деформированных изделий. Вместе с тем, процессы структурообразования слитка при ЭЛП изучены недостаточно.

В этой связи, изучение особенностей тепловых процессов в слитках никелевых сплавов при ЭЛП способами математического моделирования позволило определить технологические режимы ЭЛП, при которых происходит значительное улучшение кристаллической структуры слитков и значительное улучшение их качества [28].

Для определения оптимального технологического режима плавки слитков жаропрочных сплавов на основе никеля способом ЭЛП с помощью математического моделирования были рассчитаны температурные поля в слитках диаметром 630, 850 и 1100 мм (рис. 10). Расчетные данные показали, что получение способом ЭЛП слитков сплавов на основе никеля с мелкокристаллической структурой достигается при небольшом удельном расходе электроэнергии (1,5...2,5 кВт·ч/кг). Эти значения практически находятся на уровне показателей для

прямого переплава заготовки в кристаллизатор с площадью поперечного сечения такой же, как в промежуточной емкости.

С целью изучения степени очистки сложнолегированных жаропрочных сплавов на основе никеля и отработки технологии их производства в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведены работы по выплавке партии слитков марок ЭП708, ЭИ648 и ЭИ698.

Слитки получали по технологии ЭЛП с промежуточной емкостью и порционной подачей жидкого металла в водоохлаждаемый кристаллизатор. Уменьшение мощности электронно-лучевого нагрева торца слитка в кристаллизаторе при ЭЛП позволяет перейти от режима плавки с развитой жидкой ванной к режиму с твердо-жидким состоянием поверхности слитка. Для слитков ЭЛП этот переход, за счет увеличения скорости охлаждения и кристаллизации расплава, позволяет изменить структуру слитков со столбчатой на равноосную. В качестве исходной шихты применяли слитки первичного индукционного переплава.

На базе ранее проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины фундаментальных исследований процессов испарения компонентов сплавов из рас-

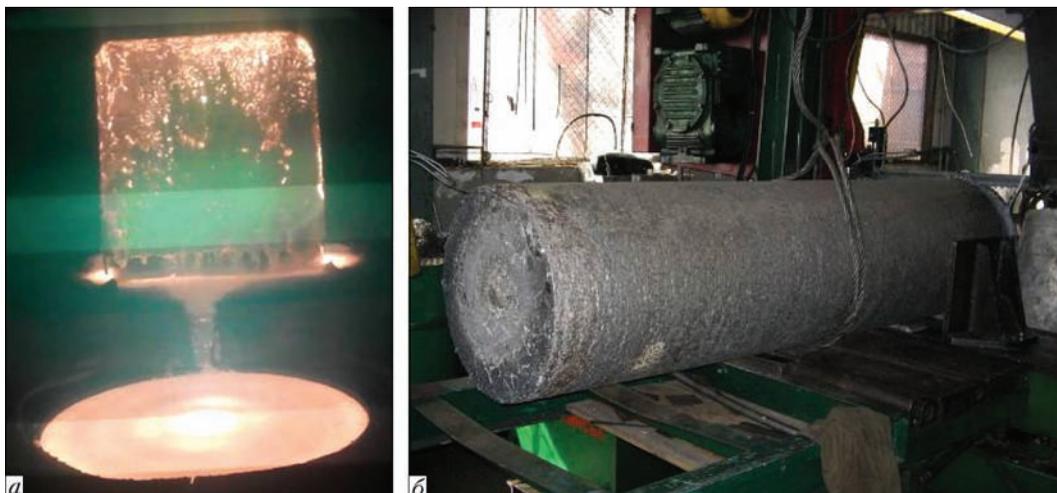


Рис. 11. Процесс ЭЛП (а) и слиток диаметром 500 мм жаропрочного сплава на основе никеля ЭП648 (б)

Т а б л и ц а 7. Средние значения содержания химических элементов по длине слитка жаропрочного сплава на основе никеля, мас. %

Марка сплава	Образец	C	Ti	Cr	Si	Fe	Nb	Mo	W	Al	Mn	S
ЭП648	Шихта	0,08	1,34	34,4	0,03	0,87	0,89	2,75	4,83	1,5	–	–
	ЭЛП	0,06	0,98	31,8	0,01	0,60	0,90	2,8	4,8	0,9	–	–
	ТУ	≤ 0,1	0,5...1,1	32...35	<0,4	<4,0	0,5...1,1	2,3...3,3	4,5...5,3	0,5...1,1	–	–
ЭП708	Шихта	0,09	1,8	18,0	0,46	3,3	–	4,9	5,7	2,2	0,60	0,014
	ЭЛП	0,08	1,6	19,0	0,45	2,9	–	4,8	5,8	2,0	0,20	0,005
	ТУ	0,05...0,1	1,0...1,4	17,5...20,0	<0,4	<4,0	–	4,0...6,0	5,5...7,5	1,9...2,3	<0,5	<0,015
ЭИ698	Шихта	0,06	2,8	14,0	0,51	2,0	2,0	2,8	–	1,6	0,48	0,008
	ЭЛП	–»–	2,65	15,5	0,5	1,6	–»–	2,9	–	1,45	0,21	0,004
	ТУ	0,03...0,07	2,35...2,75	13,0...16,0	<0,5	<2,0	1,8...2,2	2,3...3,2	–	1,45...1,8	<0,4	<0,007

плава в вакууме проводились расчеты прогнозируемого химического состава выплаваемого слитка, по результатам которых осуществлялась корректировка составляющих шихтовой заготовки [29, 30].

В результате проведенных работ получен слиток диаметром 500 мм (рис. 11). С целью оценки качества металла полученного слитка проводились сравнительные исследования химического состава образцов, отобранных по длине слитка с верхней, средней и нижней частей, и исходной шихтовой заготовки. Результаты исследований (табл. 7) показали, что распределение легирующих элементов по длине слитка жаропрочного сплава на основе никеля равномерное и соответствует марочному составу, наблюдается понижение содержания титана, хрома, кремния и железа, а также углерода незначительно.

По результатам анализа металла слитков сплава ЭП648 электронно-лучевой плавки установлено, что содержание кислорода после ЭЛП снижается на 75 %, а азота — на 60 % (табл. 8).

Сравнительный анализ химического состава металла слитков сплавов до и после ЭЛП показал, что при электронно-лучевом переплаве происходит рафинирование металла слитков от серы в 2...3 раза, наблюдается незначительное понижение содержания железа, а углерода, кремния и тугоплавких элементов (молибдена, ниобия, вольфрама) практически не изменяется. Электронно-лучевой переплав отходов жаропрочных сплавов ЭП708 и ЭИ698 в виде обрезки сопровождается нежелательным эффектом удаления таких легирующих элементов,

как хром и алюминий, однако их потери можно компенсировать повышением их содержания в исходной шихтовой заготовке, либо использовать для переплава сырье с содержанием хрома и алюминия на верхнем пределе марочного состава.

Был также проведен сравнительный анализ содержания газов в металле слитков сплава ЭИ698 после ДСП, ВИП, ВДП и ЭЛП (табл. 9). Анализируя данные таблицы можно отметить, что электронно-лучевой переплав жаропрочных сплавов на основе никеля дает возможность дальнейшего повышения их чистоты. Так, ЭЛП обеспечивает снижение содержания газов в жаропрочных сплавах на основе никеля по отношению к другим видам переплава: кислорода в 1,5...2,0 раза, азота в 2...3 раза.

Оценку загрязненности металла слитка жаропрочного сплава ЭИ698 неметаллическими включениями проводили на образцах, вырезанных из слитка по ГОСТ 1778–70. Было установлено, что размеры неметаллических включений в слитке ЭЛП значительно меньше, чем в исходном металле жаропрочного сплава ЭИ698. Максимальный размер включений в сплаве в исходном состоянии составлял 16...18 мкм; после ЭЛП — 8...10 мкм. Включения мелкодисперсные и равномерно распределены по объему металла.

Оценка загрязненности неметаллическими включениями представлена средним баллом, как среднеарифметическое из максимальных оценок для отдельных образцов (табл. 10).

Т а б л и ц а 8. Содержание газов в металле слитка сплава ЭП648 до и после ЭЛП

Состояние	Содержание газов, %	
	[O]	[N]
Исходное	0,004	0,04
После ЭЛП	0,001	0,015

Т а б л и ц а 9. Содержание газов в металле сплава ЭИ698 различных видов плавки

Способ выплавки	Содержание газов, %	
	[O]	[N]
ДСП	0,0035	0,039
ВИП	0,0022	0,035
ВДП	0,0017	0,026
ЭЛП	0,0015	0,012

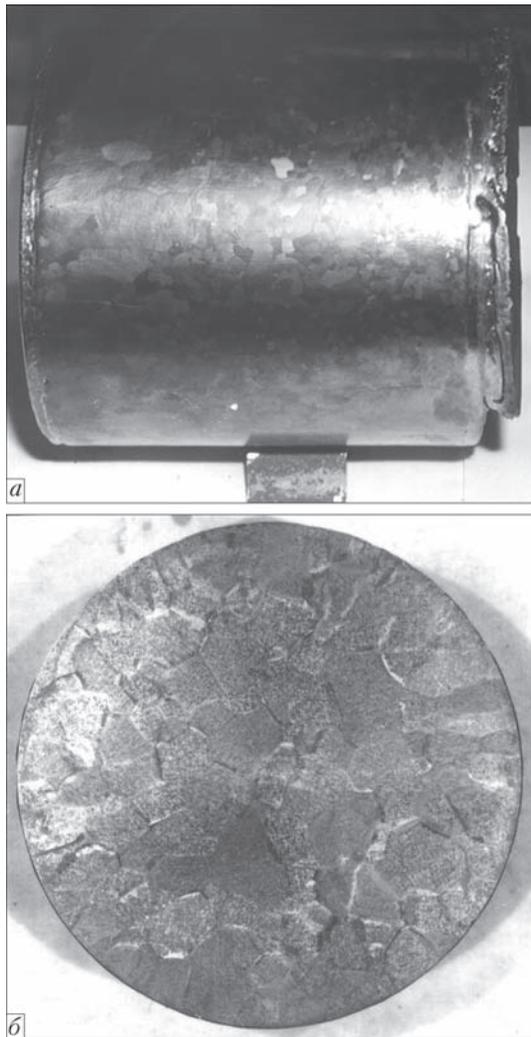


Рис. 12. Слиток циркония диаметром 110 мм, полученный способом ЭЛП (а) и его макроструктура (б)

Таким образом, проведенные работы показали, что электронно-лучевой переплав является высокоэффективным способом для получения качественных слитков жаропрочных сплавов на основе никеля, полностью удовлетворяющим требованиям стандартов, и которые характеризуются пониженным содержанием газов и неметаллических включений.

Таблица 10. Степень загрязненности неметаллическими включениями металла жаропрочного сплава ЭИ698, балл

Образец	Максимальный	Средний
Исходный	3	2
После ЭЛП	1	0,5

Цирконий. Цирконий — один из ключевых конструкционных материалов для ядерной энергетики, так как является основным компонентом сплавов, используемых для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Добыча и переработка циркониевой руды, а также производство циркониевого сплава и проката для производства тепловыделяющих сборок является одним из составляющих звеньев ядерного топливного цикла реакторов АЭС. Поэтому с целью организации в Украине производства изделий из сплавов циркония для нужд отечественной атомной энергетики проводятся исследования по разработке оптимальных технологий производства, которые обеспечат необходимые требования по качеству и структуре полуфабрикатов.

Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины экспериментальные исследования процесса рафинирования циркония при ЭЛП показали, что с уменьшением скорости плавки и увеличением удельной мощности электронно-лучевого нагрева происходит интенсификация рафинирования циркония от таких вредных примесей, как кислород, углерод, железо, никель и др., однако при этом снижается выход годного из-за увеличения испарения основного металла. В результате проведенных опытных плавки по получению слитков определены оптимальные параметры процесса ЭЛП кальцийтермического циркония.

Для оценки качества выплавленных способом ЭЛП слитков циркония (рис. 12) изучали их макро- и микроструктуру, содержание примесных

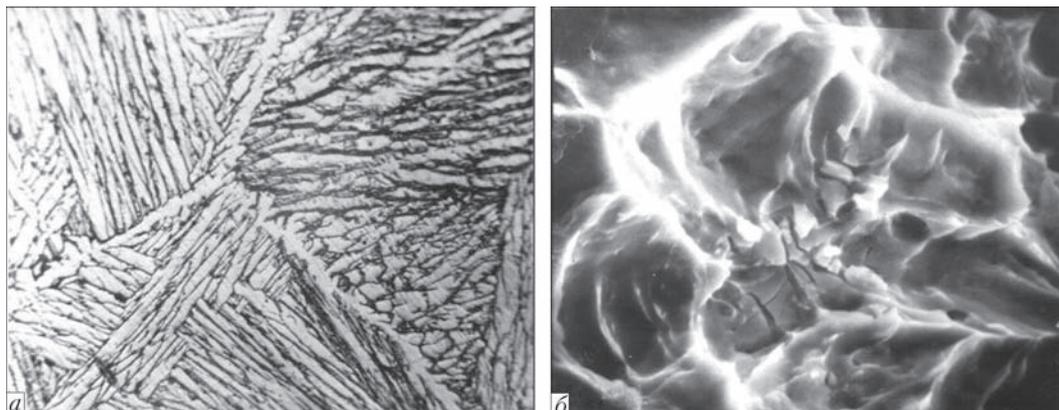


Рис. 13. Микроструктура литого циркония после ЭЛП (а, $\times 200$) и внешний вид излома (б, $\times 4000$)

Таблица 11. Распределение примесей по объему слитка циркония, полученного способом ЭЛП

Место отбора проб		Средняя концентрация элементов, %								
		O	N	C	Fe	Ni	Si	Cr	Al	Mn
Верх	Центр	0,10	0,017	0,01	0,010	0,011	0,001	0,003	0,002	0,0006
	1/2R	0,09	0,018	0,03	0,009	0,009	0,003	0,001	->-	<0,0003
	Край	0,12	0,014	->-	0,008	0,010	0,002	0,002	->-	0,0007
Середина	Центр	0,06	0,016	0,02	0,012	0,013	->-	<0,001	0,003	0,0003
	1/2R	0,08	->-	0,01	0,007	0,016	0,004	0,003	->-	0,0007
	Край	0,10	0,019	0,03	0,010	0,011	0,003	0,002	0,002	0,0004
Низ	Центр	->-	->-	0,02	0,009	0,009	0,001	0,001	->-	<0,0003
	1/2R	->-	0,016	->-	->-	0,018	0,002	<0,001	0,003	0,0004
	Край	0,11	0,017	0,04	0,008	0,016	->-	0,002	->-	0,0008

элементов и их распределение по объему слитка, а также твердость выплаваемого металла.

Проведенные исследования показали, что структура литого металла равномерная, крупнозернистая, равноосная по сечению, с небольшой зоной столбчатых кристаллов на периферии слитка (рис. 12, б). С увеличением подводимой к ванне жидкого металла мощности электронно-лучевого нагрева структура слитков становится еще более крупнозернистой. Дефекты в виде пор, раковин и трещин не обнаружены.

Микроструктура литого циркония после ЭЛП крупнопластинчатая, напоминающая корзиночное плетение (рис. 13, а). Матричной фазой является α-фаза циркония, а по границам зерен расположена β-фаза циркония. Разницы в микроструктуре по сечению слитка не наблюдается.

Во всех слитках циркония наблюдаются мелкие включения, расположенные как по границам зерен в виде вытянутых цепочек, так и в теле зерен в виде точечных включений, вид и форма расположения которых позволяет идентифицировать их как карбиды циркония. Однако следует отметить, что в результате ЭЛП циркония содержащиеся в нем карбидные включения значительно измельчаются. Анализ содержания примесных элементов показал достаточно равномерное их распределение по объему слитка циркония (табл. 11).

Таким образом, в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработана технология получения литых заготовок из циркония способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью и при этом качество получаемых слитков находится на высоком уровне.

Для реализации технологии ЭЛП в условиях промышленных предприятий в ИЭС им. Е. О. Патона созданы многоцелевые плавильные электронно-лучевые установки с промежуточной емкостью типа УЭ-5812, УЭ-185М, УЭ-121 [25], а также специализированная ЭЛУ УЭ-185, предназначенная для оплавления поверхностного слоя слитков (рис. 14).

Основной тенденцией в развитии оборудования для ЭЛП является создание больших многофункциональных ЭЛУ мегаватного класса, рассчитанных на выплавку слитков весом 8 т и более. Электронно-лучевые установки последнего поколения позволяют за счет достаточно простой операции (замены оснастки), осуществлять практически все технологические схемы электронно-лучевых плавков. К такому типу установок относится специализированная плавильная ЭЛУ УЭ-5810, предназначенная для ЭЛП недробленых блоков губчатого титана (рис. 14, з).

Сплавы на основе титана. Развитие современной техники в значительной степени зависит от

Технические характеристики промышленных электронно-лучевых установок конструкции ИЭС им. Е. О. Патона

	УЭ-121	УЭ-5812	УЭ-185	УЭ-5810
Назначение	плавка	плавка	оплавление	плавка + оплавление
Мощность ЭЛН, кВт	900	1500	900	2100
Ускоряющее напряжение, кВ	30	30	30	30
Количество пушек, шт.	3	5	3	7
Наибольшие размеры заготовки, м:				
длина	2,2	3,4	—	4,0
диаметр	0,6	0,6	—	1,2
Наибольшие размеры слитков, м:				
длина	2,2	3,5	3,5	4,0
диаметр	0,6	0,8	0,8	1,2
ширина к толщине.....	1,0×0,42	1,0×0,42	1,0×0,42	1,32×0,42
Производительность откатной системы, л/с	30000	30000	30000	60000



Рис. 14. ЭЛУ, созданные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины: а — УЭ-121; б — УЭ-5812; в — УЭ-185; г — УЭ-5810

применения в изделиях машиностроения новых металлических материалов с высокой удельной прочностью при различных температурах эксплуатации, устойчивостью при работе в агрессивных средах, не магнитностью и рядом других специальных свойств. К таким материалам относятся титан и сплавы на его основе.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины проведены исследования процессов удаления тугоплавких неметаллических включений высокой и низкой плотности при ЭЛП с промежуточной емкостью.

Проведенные исследования показали, что в процессе ЭЛП практически все тугоплавкие включения высокой и низкой плотности (LDI и HDI соответственно), за исключением диоксидов титана, осаждаются на дно промежуточной емкости и удаляются из расплава. Установленные зависимости позволяют определить габариты промежуточной емкости, которые обеспечат гарантированное удаление тугоплавких включений из титана путем их осаждения (рис. 15).

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 [31], так и теоретически [32] и обуславливается процессами диффузии примесей

внедрения (азот, кислород или углерод) из объема включения в расплав.

Для определения закономерностей растворения тугоплавких включений в расплаве титана построена математическая модель. Исследование процесса растворения кислородсодержащих включений с помощью математической модели показало, что характер растворения насыщенной кислородом частицы α -титана существенно зависит от температуры расплава. При перегреве расплава титана выше температуры плавления 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, т. е. на начальном этапе размеры включений остаются практически неизменными, а затем начинают уменьшаться с увеличивающейся скоростью вплоть до полного растворения (рис. 16).

Также данная математическая модель позволяет определить время полного растворения кислородсодержащих включений для твердых частиц разного химического состава и размеров. Установлено, что с ростом начальной концентрации кислорода в частице скорость ее растворения уменьшается, а время полного растворения, соответственно, увеличивается (рис. 17).

Таким образом, построенные математические модели процессов растворения тугоплавких вклю-

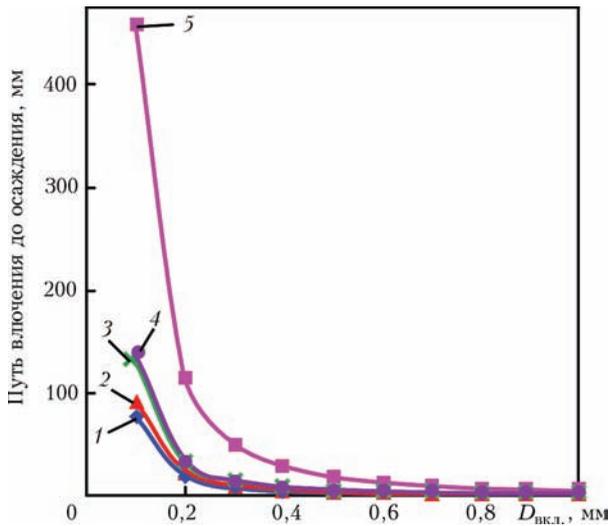


Рис. 15. Зависимость пути включения низкой плотности до осаждения на поверхность гарнисажа от его размера: 1 — WC; 2 — TiN; 3 — TiC; 4 — TiO; 5 — α-Ti

чений LDI (частицы α-титана, нитрида, карбида или оксида титана) в жидком титане позволяют рассчитать скорость их растворения и определить время полного растворения таких включений в зависимости от химического состава и начальных размеров.

Одной из проблем применения технологии ЭЛП для получения слитков титановых сплавов с гарантированным химическим составом является испарение из расплава в процессе плавки легирующих компонентов с высокой упругостью пара. С целью минимизации потерь легирующих элементов при ЭЛП разработана математическая модель процесса испарения легирующих компонентов титанового сплава в слитке, полученном способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью, зависящего от технологических параметров плавки, химического состава исходной шихты и физико-химических констант титанового сплава [33]. Расчеты по математической модели позволяют прогнозировать химический состав выплавляемых слитков титановых сплавов. Проведенные расчеты в рамках разработанной математической модели и проведенные опытные плавки позволили разработать методику выбора технологических режимов ЭЛП сплавов на основе титана и расчета химического состава исходной шихты, гарантирующую получение слитков с заданным химическим составом [25].

На основе проведенных исследований в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработано оборудование, создана технология ЭЛП титана и его сплавов, которая реализована в промышленных масштабах. При этом впервые в мировой практике:

способ ЭЛП использован для получения слитков высоколегированных сплавов титана (рис. 18);

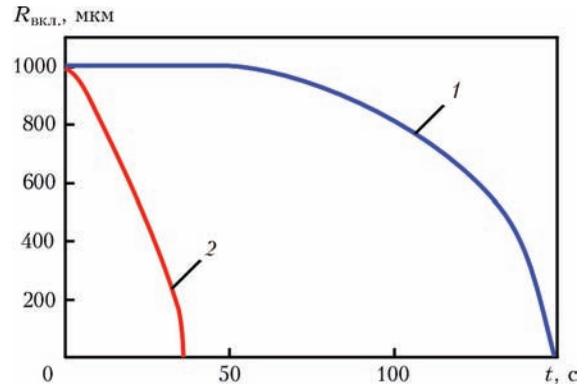


Рис. 16. Зависимость радиуса включения α-титана от времени пребывания в расплаве при температурах испытаний, К: 1950 (1) и 2000 (2)

создана и внедрена в производство технология выплавки слитков недробленых блоков губчатого титана массой до 5 т каждый, которая обеспечивает повышение на 20 % технико-экономических показателей по сравнению с ЭЛП губчатого титана фракции 12..70 мм (рис. 19);

для снижения себестоимости производства плит и горячекатаного листа из титана и его сплавов разработана технология выплавки в ЭЛУ с промежуточной емкостью слитков-слябов максимальным поперечным сечением до 165×950 мм и длиной до 4000 мм (рис. 20);

создана технология получения высококачественных крупногабаритных слитков диаметром до 1200 мм (рис. 21);

освоена выплавка полых слитков для производства крупногабаритных титановых труб;

создано оборудование и технология оплавления боковой поверхности слитков, которая успешно применяется вместо механической обработки

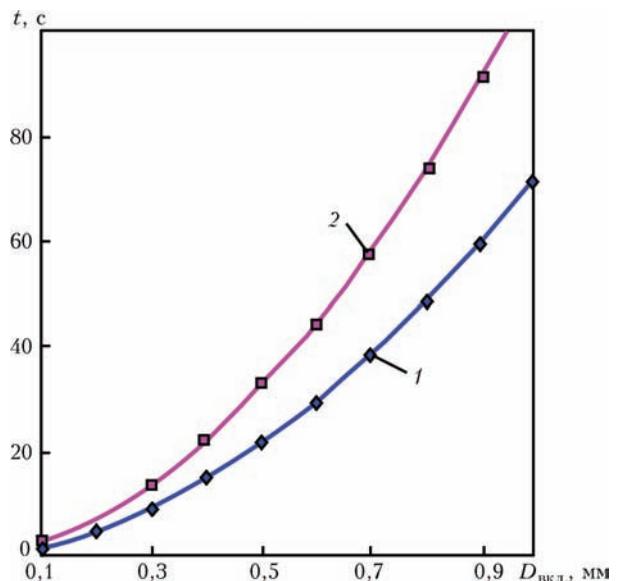


Рис. 17. Зависимость времени растворения включений α-титана (1) и оксида титана (2) от их размеров



Рис. 18. Слитки ЭЛП диаметром 100...600 мм титана и его сплавов

и позволяет достичь экономии металла до 15 % в зависимости от массы оплавленного слитка.

По разработанной технологии на ГП «НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины» организовано промышленное производство слитков титановых сплавов марок BT1-0, ПТЗВ, ПТ1М, ПТ7М, BT6, BT3-1, BT8, BT9, BT20, BT22, BT25У и Grade 2, 5, 9, 12. Исследование химического состава по объему слитков титановых сплавов (табл. 12) показало, что распределение легирующих элементов по длине и поперечному сечению слитков равномерное, а их содержание находится в пределах требований стандартов.

Таким образом, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины технологические процессы ЭЛП позволяют получать высококачественные слитки титана и его сплавов с однородной бездефектной структурой, снизить се-



Рис. 19. Процесс плавки слитка диаметром 840 мм из блоков губчатого титана



Рис. 20. Внешний вид слитков-слябов из титана марки BT1-0 размерами 165×950×2000 мм

бестоимость титановых полуфабрикатов за счет использования более дешевого исходного сырья и увеличения сквозного выхода годного металла, а следовательно, повысить конкурентоспособность и расширить области применения титана в различных отраслях промышленности.

Реализация технологии электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью в условиях промышленных предприятий позволила организовать в Украине конкурентоспособное на мировых рынках производство высококачественных слитков и слитков-слябов титана. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины ведутся работы по усовершенствованию существующих и разработке новых сплавов титана для нужд отечественной промышленности, медицины и оборонного сектора, а также технологий их выплавки и обработки.

В настоящее время ЭЛП все шире используется в промышленности, конкурируя со способами вакуумной плавки. Из рациональных областей применения ЭЛП внимания заслуживают получение особо чистых металлов и сплавов на их основе, улучшение существующих сплавов. Эти материалы нужны для разных отраслей техники. Поэтому



Рис. 21. Слиток титана диаметром 1100 мм

Таблица 12. Содержание легирующих элементов в слитках титановых сплавов, полученных способом ЭЛП

Марка сплава	Место отбора проб	Средние значения концентрации элементов, %						
		Al	V	Zr	Mo	Cr	Fe	Si
ПТ-7М	Верх	2,25	<0,1	2,33	2,33	<0,1	0,10	<0,1
	Середина	2,29	-»-	2,25	2,25	-»-	0,12	-»-
	Низ	2,30	-»-	2,29	2,18	-»-	0,10	-»-
ГОСТ 19807-91		1,8...2,5	-»-	2,0...3,0	2,0...3,0	-»-	<0,25	<0,12
ПТ-3В	Верх	4,30	1,80	<0,1	<0,1	-»-	0,08	<0,1
	Середина	4,45	1,60	-»-	-»-	-»-	0,11	-»-
	Низ	4,50	1,60	-»-	-»-	-»-	0,06	-»-
ГОСТ 19807-91		3,5...5,0	1,2...2,5	<0,30	<0,30	-»-	<0,25	<0,12
ВТ3-1	Верх	6,20	<0,1	<0,1	2,80	1,70	0,48	0,18
	Середина	6,50	-»-	-»-	2,90	1,60	0,50	0,17
	Низ	6,40	-»-	-»-	2,80	1,80	0,49	0,18
ГОСТ 19807-91		5,5...7,0	-»-	<0,50	2,0...3,0	0,8...2,0	0,2...0,7	0,15...0,4
ВТ20	Верх	6,85	2,05	1,60	1,60	<0,1	<0,10	<0,1
	Середина	6,90	-»-	1,63	1,63	-»-	<0,11	-»-
	Низ	6,70	2,08	1,60	-»-	-»-	-»-	-»-
ГОСТ 19807-91		5,5...7,0	0,8...2,5	1,5...2,5	0,5...2,0	-»-	<0,25	<0,15
ВТ22	Верх	5,20	4,8	<0,1	4,20	1,20	1,30	<0,1
	Середина	5,40	4,90	-»-	4,50	1,30	1,29	-»-
	Низ	5,30	4,70	-»-	4,30	1,10	1,32	-»-
ГОСТ 19807-91		4,4...5,7	4,0...5,5	<0,30	4,0...5,5	0,5...1,5	0,5...1,5	<0,15

объемы выплавляемого способом ЭЛП металла непрерывно возрастают. Причиной расширения технологии ЭЛП является исключительно высокое качество металла, которое зачастую не может быть достигнуто другими способами плавки. Технология ЭЛП является наиболее эффективным и экономически оправданным способом получения особо чистых ниобия, тантала, ванадия, циркония, меди и многих других металлов.

Список литературы

1. Мальцев М. В., Клячко Л. И., Доронькин Е. Д., Абалахин А. В. (1981.) *Вакуумная металлургия тугоплавких металлов и твердых сплавов*. Москва, Металлургия.
2. Воеводин В. Н. (2007) Конструкционные материалы ядерной энергетики — вызов 21 века. *Вопросы атомной науки и техники*, 2, 10–22.
3. Рогов В. А., Соловьев В. В., Копылов В. В. (2008) *Новые материалы в машиностроении*. Москва, РУДН.
4. Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А. (1972) *Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов*. Киев, Наукова думка.
5. Ладохин С. В., Корнюшин Ю. В. (1988) *Электронно-лучевая гарнисажная плавка металлов и сплавов*. Киев, Наукова думка.
6. Тихоновский А. Л., Тур А. А. (1984) *Рафинирование металлов и сплавов способом электронно-лучевой плавки*. Киев, Наукова думка.
7. Бэншоу Р. Ф. (1965) *Введение в технологию электронно-лучевых процессов*. Москва, Металлургия.
8. Башенко В. В. (1972) *Электронно-лучевые установки*. Ленинград, Машиностроение.
9. Schiller S., Forster H., Bakish R. (1985) A new phase in electron beam melting. *Proc. of 8th Int. Conf. on Vacuum Metallurgy, Linz, Austria, Sept. 30–Oct. 4, 1985*. Linz, Brucknerhaus, pp. 1292–1309.

10. Кравец А. Н., Дереча А. Я., Тригуб Н. П. и др. (1985) Установки для электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. *Спец. электрометаллургия*, 59, 74–85.
11. Bakish R. (1983) Hoehlistungs-Eleektronenkanonen aus der DDR in USA. *LEW-Nachr.*, 32, 12–13.
12. Hunt C., Harrison C. (1971) Arco's facility for steel refining and casting with induction furnaces and electron beam. *Iron and Steel Eng.*, 8, 85–88.
13. Melanie L. (1990) A JM's new furnace cleans up alloys. *Metal Bull. Mon.*, Sept., 30–31.
14. Shiller S., Heisig U., Panzer S. (1976) *Elektronenstrahltechnologie*. Forschungsinst. Manfred von Ardenne. Dresden, LEW.
15. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. (2008) *Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреакционных металлов*. Киев, Наукова думка.
16. Зеликман А. Н., Коршунов Б. Г., Елютин А. В., Захаров А. М. (1990) *Ниобий и тантал*. Москва, Металлургия.
17. Варич И. Ю., Ахонин С. В., Тригуб Н. П. (2005) Утилизация лома тантала способом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*, 3, 44–46.
18. Ахонин С. В. (2000) Эффективность рафинирования и потери на испарение при электронно-лучевой плавке тантала. *Пробл. спец. электрометаллургии*, 3, 33–37.
19. Romberg M., Schumann R., Stephan H., Stump H. (1986) Electron Beam Melting and Refining of Superalloys for Ingot and bar stick production. *Proc. Conf. Electron Beam Melting and Ref. State-of-the Art 1986*. N.-Y., Bakish Mat. Corp., pp. 260–276.
20. Harker H. R., Entriken C. H. (1988) EB cold hearth melting (EBCHM) of space age metals. *2nd Int. Sampe Metals and Metals Process. Conf., Dayton, Ohio, August 2–4, 1988*. Calif., Corina, 2, pp. 128–134.
21. Bakish R. (1984) Electron beam melting — state of the art 1984. *J. Metals*, 6, 42–44.
22. Tien J. K., Nardone V. C. (1984) The US superalloy industry — status and outlook. *Ibid.*, 9, 52–57.
23. Патон Б. Е., Тихоновский А. Л., Тригуб Н. П. и др. (1990) Получение мелкокристаллических гомогенных слитков

- при ЭЛП с промежуточной емкостью. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 57–61.
24. Тригуб Н. П., Калинюк А. Н., Тихоновский А. Л. и др. (1991) Утилизация отходов титанового производства способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. *Там же*, **1**, 59–63.
 25. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В., Жук Г. В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
 26. Тригуб М. П., Ишук Ю. Т., Ахонин С. В. та ін. (2002) *Електронна гармата для плавки металів*, Україна, Пат. 51752.
 27. Тригуб М. П., Пап П. А., Жук Г. В., Хомутський С. В. (2003) *Проміжний тигель для отримання безкисневої міді в електронно-променевих установках*, Україна, Пат. 56309 C22B9/22, B22D41/00, C22B15/14.
 28. Тригуб Н. П., Жук Г. В., Ахонин С. В. (2004) Электронно-лучевая плавка жаропрочных сплавов с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, **1**, 10–15.
 29. Тихоновский А. Л., Ахонин С. В. (1991) Расчетный способ обесчистки заданного состава сплавов при ЭЛП. *Физико-химические основы металлургических процессов*. Ч. 2. Москва, Черметинформация, сс. 16–18.
 30. Тригуб Н. П., Ахонин С. В. (1996) Оптимизация выплавки слитков сталей и сплавов в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **2**, 12–17.
 31. Bewley B. P., Gigliotti M. F. X. (1977) Dissolution rate measurements of TiN in Ti-6242. *Acta Mater.*, **45**, **1**, 357–370.
 32. Bellot J. P., Mitchell A. (1994) Hard-Alfa particle behaviour in a titanium alloy liquid pool. *Light Metals*, **2**, 1187–1193.
 33. Akhonin S. V., Kalinuk O. M., Semiatin S. L. (2004) Modeling of the EBCHM process for titanium alloys. *Ti-2003 science and technology. Proc. of the 10th World Conf. on Titanium*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, **1**, pp. 197–204.
 11. Bakish, R. (1983) Hoehlistungs-Elektronenkanonen aus der DDR in USA. *LEW-Nachr.*, **32**, 12–13.
 12. Hunt, C., Harrison, C. (1971) Arco's facility for steel refining and casting with induction furnaces and electron beam. *Iron and Steel Eng.*, **8**, 85–88.
 13. Melanie, L. (1990) A JM's new furnace cleans up alloys. *Metal Bull. Mon.*, **Sept.**, 30–31.
 14. Shiller, S., Heisig, U., Panzer, S. (1976) Elektronenstrahltechnologie. *Forschungsinst. Manfred von Ardenne*. Dresden, LEW.
 15. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2008) *Electron beam melting of refractory and highly reactive metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
 16. Zelikman, A.N., Korshunov, B.G., Elyutin, A.V., Zakharov, A.M. (1990) *Niobium and tantalum*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
 17. Varich, I.Yu., Akhonin, S.V., Trigub, N.P. (2005) Utilization of tantalum scrap by means of electron beam melting. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 40–42 [IN Russian].
 18. Akhonin, S.V. (2000) Efficiency of refining and losses on evaporation in electron beam melting of tantalum. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **3**, 33–37 [in Russian].
 19. Romberg, M., Schumann, R., Stephan, H., Stump, H. (1986) Electron beam melting and refining of superalloys for ingot and bar stick production. In: *Proc. of Conf. on Electron Beam Melting and Ref. State-of-the Art 1986*. N.-Y., Bakish Mat., 260–276.
 20. Harker, H. R., Entriken, C. H. (1988) EB cold hearth melting (EBCHM) of space age metals. In: *Proc. of 2nd Int. Sampe Metals and Metals Process. Conf.* (Dayton, Ohio, August 2–4, 1988. Calif., Corina, **2**, 128–134.
 21. Bakish, R. (1984) Electron beam melting — state of the art 1984. *J. Metals*, **6**, 42–44.
 22. Tien, J. K., Nardone, V. C. (1984) The US superalloy industry — status and outlook. *Ibid.*, **9**, 52–57.
 23. Paton, B.E., Tikhonovsky, A.L., Trigub, N.P. et al. (1990) Producing of fine-crystalline homogeneous ingots in electron beam melting with cold hearth. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 57–61 [in Russian].
 24. Trigub, N.P., Kalinyuk, A.N., Tikhonovsky, A.L. et al. (1991) Recycling of waste of titanium production by method of electron beam melting with cold hearth. *Ibid.*, **1**, 59–63 [in Russian].
 25. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
 26. Trygub, M.P., Ishchuk, Yu.T., Akhonin, S.V. et al. (2002) *Electron gun for melting of metals*. Pat. 51752, Ukraine [in Ukrainian].
 27. Trygub, M.P., Pap, P.A., Zhuk, G.V., Khomutsky, S.V. (2003) *Cold hearth for producing of oxygen-free copper in electron beam units*. Pat. 56309, Ukraine, Int. Cl. C22B9/22, B22D41/00, C22B15/14 [in Ukrainian].
 28. Trigub, N.P., Zhuk, G.V., Akhonin, S.V. (2004) Electron beam melting of heat-resistant alloys using an intermediate crucible. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 9–14.
 29. Tikhonovsky, A.L., Akhonin, S.V. (1991) Calculation method for providing of set composition of alloys in EBM. In: *Physical and chemical principles of metallurgical processes*. Pt 2. Moscow, Chermetinformatiya, 16–18 [in Russian].
 30. Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (1996) Optimization of melting of steels and alloys ingots in electron beam unit with cold hearth. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **2**, 12–17 [in Russian].
 31. Bewley, B. P., Gigliotti, M. F. X. (1977) Dissolution rate measurements of TiN in Ti-6242. *Acta Mater.*, **45**, **1**, 357–370.
 32. Bellot, J.-P., Mitchell, A. (1994) Hard-Alfa particle behaviour in a titanium alloy liquid pool. *Light Metals*, **2**, 1187–1193.

References

33. Akhonin, S. V., Kalinuk, O. M., Semiatin, S. L. (2004) Modelling of the EBCHM process for titanium alloys. Ti-2003

science and technology. In: *Proc. of the 10th World Conf. on Titanium*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1, 197–204.

**РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЙ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ МЕТАЛІВ
В ІЕЗ ім. Є. О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ**

Б. Є. Патон, С. В. Ахонін, В. О. Березос

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Показано, що технологія електронно-променевої плавки є найбільш перспективним процесом отримання якісних особливо чистих зливків металів і сплавів. Роботи зі створення цих технологій розпочаті в ІЕЗ ім. Є. О. Патона в 1960-і роки. Для практичної реалізації технології електронно-променевої плавки в ІЕЗ ім. Є. О. Патона створені спеціалізовані електронно-променеві установки різноманітних конструкцій. Розроблено математичні моделі процесів рафінування, випаровування і кристалізації при електронно-променевій плавці. Проведені дослідні роботи показали, що технологія електронно-променевої плавки є найбільш ефективним і економічно виправданим способом одержання особливо чистих ніобію, танталу, ванадію, цирконію, міді і багатьох інших металів. Розроблено технології для промислового застосування способу електронно-променевої плавки при отриманні зливків кольорових металів та їх сплавів. Ведуться роботи з удосконалення існуючих і розробці нових сплавів для потреб вітчизняної промисловості, медицини та оборонного сектора, а також технології їх виплавки способом електронно-променевої плавки. Бібліогр. 33, табл. 12, іл. 21.

Ключові слова: електронно-променева плавка; зливки; кольорові метали; рафінування; хімічний склад; структура; механічні властивості; обладнання

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES OF ELECTRON BEAM MELTING OF METALS
AT THE E.O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE OF THE NAS OF UKRAINE**

B. E. Paton, S. V. Akhonin, V. A. Berezos

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

It is shown that the technology of electron beam melting is the most challenging process for producing of quality extra-pure ingots of metals and alloys. The works on the development of these technologies were started at the E.O. Paton Electric Welding Institute in the 60s of the last century. To realize the technologies of electron beam melting in practice, the specialized electron beam installations of various designs were designed and manufactured at the E.O. Paton Electric Welding Institute. Mathematical models of the processes of refining, evaporation and solidification in electron beam melting were developed. The carried out research works showed that the technology of electron beam melting is the most effective and economically justified method of producing extra-pure niobium, tantalum, vanadium, zirconium, copper and many other metals. The technologies were developed for industrial application of this method for producing ingots of non-ferrous metals and their alloys. The works are carried out for the improvement of existing and development of new alloys for the needs of domestic industry, medicine and defense sector, as well as technology of their melting by the electron beam melting method. Ref. 33, Tabl. 12, Fig. 21.

Key words: electron beam melting; ingot; non-ferrous metals; refining; chemical composition; structure; mechanical properties; equipment

Поступила 26.09.2018