

*к.т.н. Мушегян В.О.
(НТЦ «ПАТОН-АРМЕНИЯ», г. Ереван, Армения)*

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫМ НАГРЕВОМ ПРИ ПЛАВКЕ МОЛИБДЕНА В УСТАНОВКЕ МВ-1

Розроблено устаткування та технологічну схему для ефективного керування електронно-променевим нагріванням при плавці тугоплавких металів з проміжною ємністю. Схема успішно застосовується при плавці злитків молибдену в електронно-променевій установці МВ-1 і дозволяє одержувати якісні злитки необхідного хімічного складу.

Ключові слова: молибден, злиток, електронно-променевий переплав, кристалізація.

Разработаны оборудование и технологическая схема для эффективного управления электронно-лучевым нагревом при плавке тугоплавких металлов с промежуточной емкостью. Схема успешно применяется при плавке слитков молибдена в электронно-лучевой установке МВ-1 и позволяет получать качественные слитки требуемого химического состава.

Ключевые слова: молибден, слиток, электронно-лучевой переплав, кристаллизация.

Електронно-лучева плавка (ЕЛП) наряду с вакуумно-дуговым переплавом (ВДП) является классическим методом для рафинирования расплава и получения слитков тугоплавких металлов [1, 2]. Благодаря высокой концентрации энергии, гибкости и прецизионности управления, электронный луч способен плавить и перегревать металлы с самыми высокими тугоплавкими свойствами, в том числе молибден, температура плавления которого составляет 2617 °С.

В отличие от ВДП, для которой существенно ограничен выбор переплавляемого материала как по размерам, так и по чистоте от примесей, при ЕЛП происходит максимальная очистка от вредных примесей и газов даже самого загрязненного металла, практически отсутствуют ограничения по подготовке и характеру исходного переплавляемого сырья [3]. ЕЛП молибдена традиционно производят непосредственно в кристаллизатор при вертикальной или горизонтальной подаче прутковой заготовки, чаще в виде спрессованных, а затем спеченных «штабиков» [4]. Для достижения высокой степени чистоты металла от примесей

иногда применяют двойной капельный переплав молибдена в кристаллизатор. Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) предоставляет еще большие возможности по плавке низкосортной молибденовой шихты: благодаря независимости процессов плавления и кристаллизации элементы шихты не нужно соединять между собой, а эффективность рафинирования металла от примесей повышается за счет дополнительной выдержки в промежуточной емкости [5]. Вместе с тем, для эффективного управления процессом ЭЛПЕ необходим эффективный контроль за распределением мощности электронных лучей по всем элементам технологической оснастки: зоне плавления шихты в устройстве подачи, промежуточной емкости и кристаллизаторе. Для этого применяют методы сканирования и развертки электронных лучей различной конфигурации.

На заводе ОАО «Чистое железо», г. Ереван, Армения, восстановленный из концентрата молибден в виде спеченных брикетов ТУ РА28-54-529-61-661-2007 переплавляют в электронно-лучевой установке МВ-1 (рисунок 1) в слитки диаметром от 70 до 130 мм [6]. В этой установке впервые применена технология плавки молибдена с использованием промежуточной емкости и электронных пушек тлеющего разряда [7]. Это вызвано необходимостью максимальной степени очистки нетрадиционной исходной шихты – спеченные брикеты молибдена диаметром 50 мм, длиной 50 - 100 мм, чистотой 98,5 %.

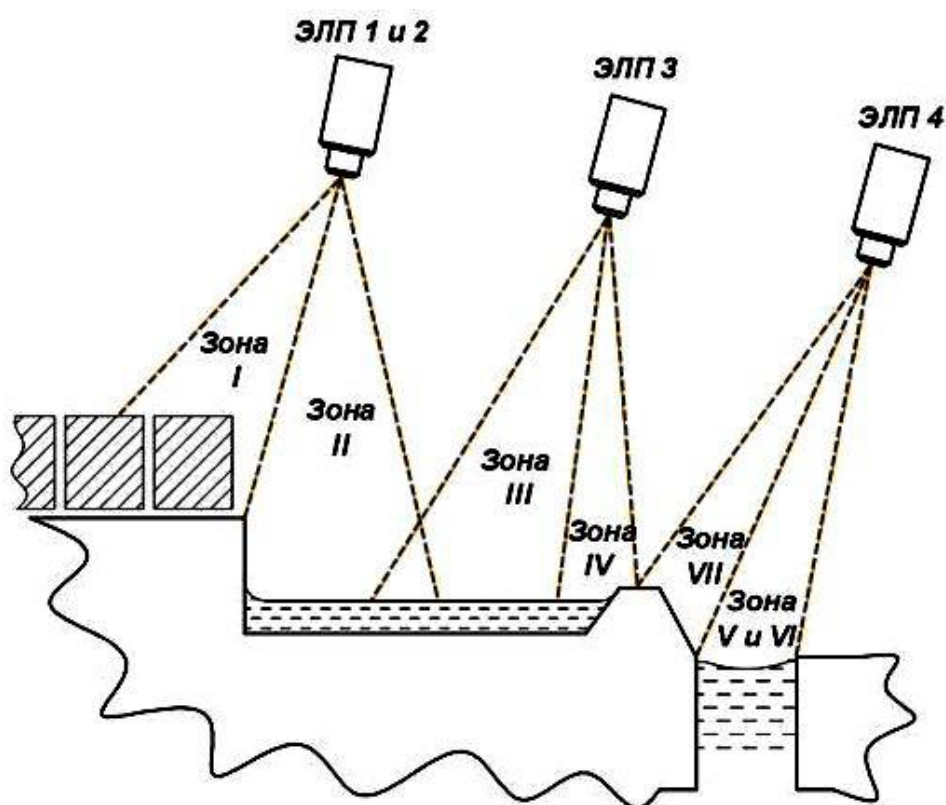


Рисунок 1 – Электронно-лучевая установка МВ-1:
пульт управления и 4 электронные пушки

Процесс переплава молибдена в установке МВ-1 можно условно разделить на несколько стадий: предварительный нагрев брикетов с целью выделения газов, плавление брикетов в промежуточную емкость и

поддержание в ней металла в расплавленном состоянии, перелив металла в кристаллизатор и нагрев поверхности металла в кристаллизаторе для формирования качественного слитка.

С учетом тугоплавкости молибдена для реализации заданных параметров производительности плавки и эффективности очистки металла от примесей установка содержит четыре электронно-лучевые пушки мощностью 100 кВт каждая, которые функционально обеспечивают указанные выше стадии нагрева в динамическом режиме. Схема нагрева металла при ЭЛПЕ молибдена в установке МВ-1 приведена на рисунке 2.



- зона I – нагрев брикетов Мо;
- зона II – плавление в промежуточной емкости;
- зона III – поддержание жидкой ванны в промежуточной емкости;
- зона IV – поддержание слива в кристаллизатор;
- зона V и VI – нагрев Мо в кристаллизаторе;
- зона VII – нагрев барьера при сливе и чистке носика

Рисунок 2 – Схема нагрева рабочих зон

Для каждой пушки или групп пушек (1, 2) имеется набор необходимых программ, которые реализуются в виде разверток электронных лучей в пределах заданных параметров и модулированием распределения мощности в соответствии с выбранным технологическим режимом плавки.

Для выбора и программирования технологических режимов управления нагревом применяется блок управления пушками ARME 01. Блок ARME 01 обеспечивает следующие режимы работы управления 4-х канальными устройствами:

- «точка» – режим формирует фокусировку лучей в точке;
- «кольцо» – режим 4-го канала формирует кольцеобразную развертку луча;
- «нагрев емкости» – режим 3-го канала формирует развертку для покрытия прямоугольной площадки;
- «нагрев кристаллизатора» – режим 4-го канала формирует последовательно кольца различного диаметра для покрытия, соответствующего развертке заполненного круга;
- «частота» – режим, при котором выбирается необходимая частота повторения развертки (диапазон частот регулируется формированием развертки от 1 до 200 Гц);
- «распределение мощности» – режим, при котором происходит перераспределение мощности между двумя видами развертки (распределение мощности между развертками выбирается в соотношении 25 % : 75 %, 50 % : 50 %, 0 % : 100 %);
- «сброс» – режим перехода программы контроллера в первоначальное состояние;
- «центр» – установка развертки в центре.

Блок-схема устройства ARME 01 приведена на рисунке 3.

Принцип формирования развертки основан на последовательном потактовом одновременном считывании кодов координат X и Y, предварительно записанных в ПЗУ и сгруппированных по фрагментам, из последовательности которых формируются траектории развертки. В состав устройства входят:

- панель управления с регуляторами;
- блок клавиатуры, установленной на панели;
- контроллер управления, установленный на блоке клавиатуры;
- блок цифро-аналоговых преобразователей в количестве 4 шт. по числу каналов;
- блок ограничителей тока;
- блок распределения питания;
- блок питания.

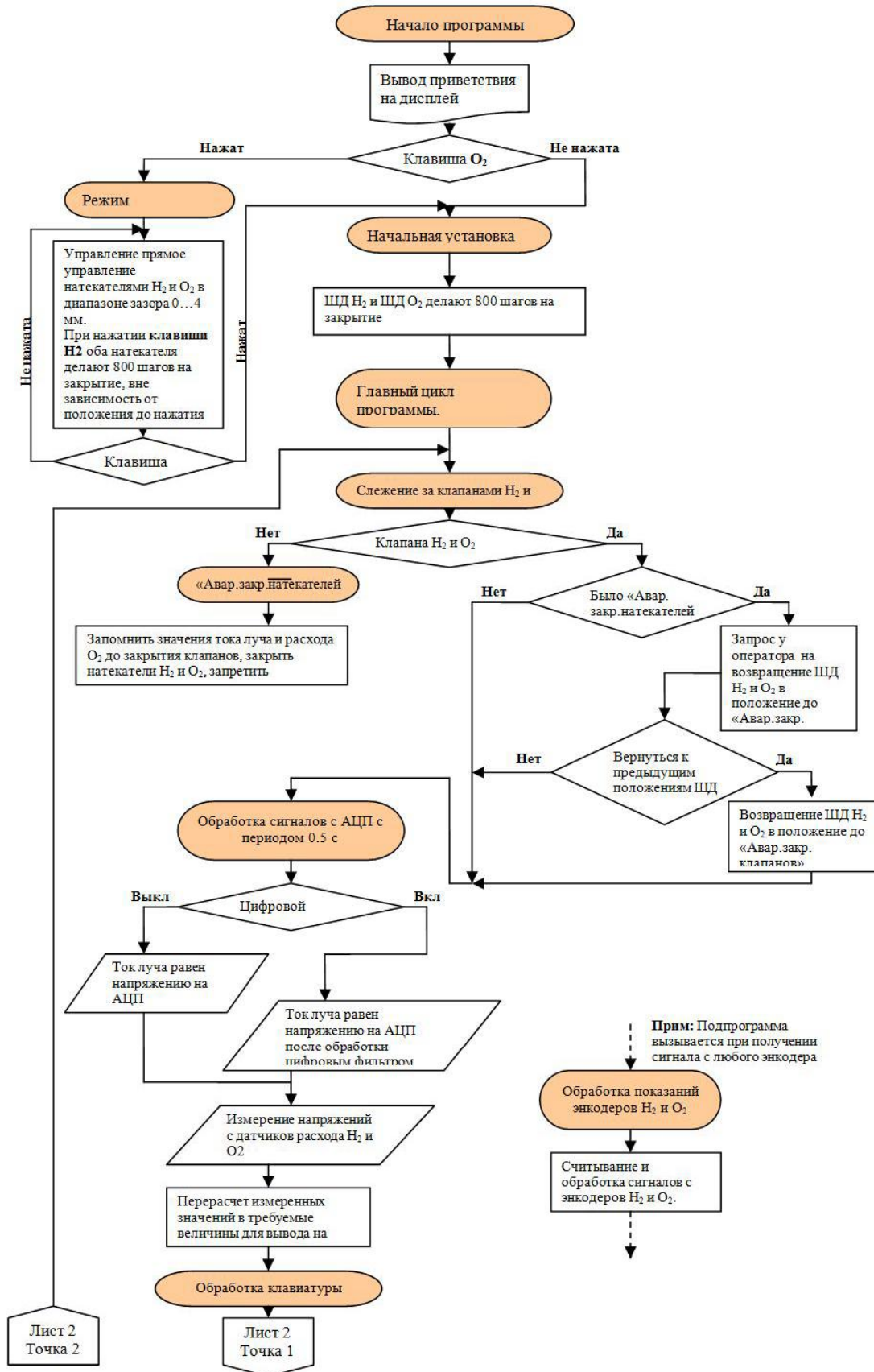
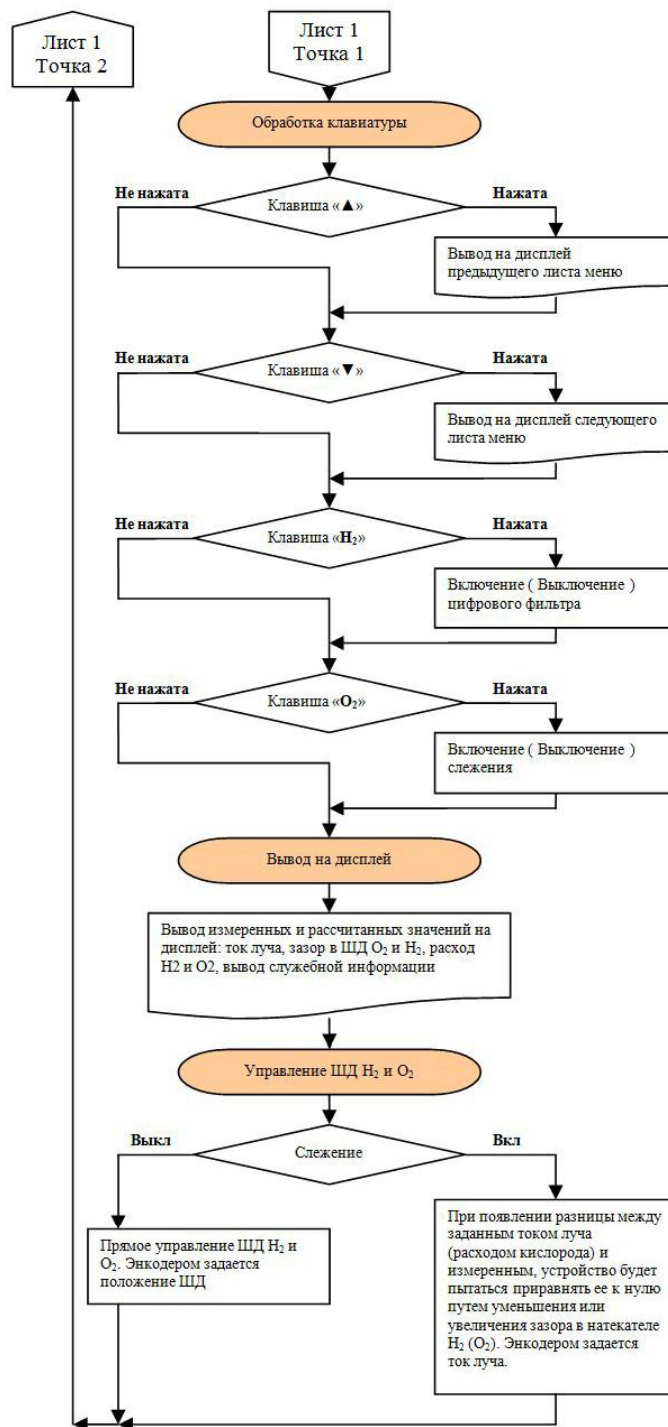


Рисунок 3 – Блок-схема описания алгоритма работы устройства ARME 01 (лист 1)



Авар.закр.натекателей – аварийное закрытие натекателей;
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
 ШД – шаговый двигатель;
 ШД H₂ – шаговый двигатель водородного натекателя;
 ШД O₂ – шаговый двигатель кислородного натекателя

Рисунок 3 – Блок-схема описания алгоритма работы устройства ARME 01 (лист 2)

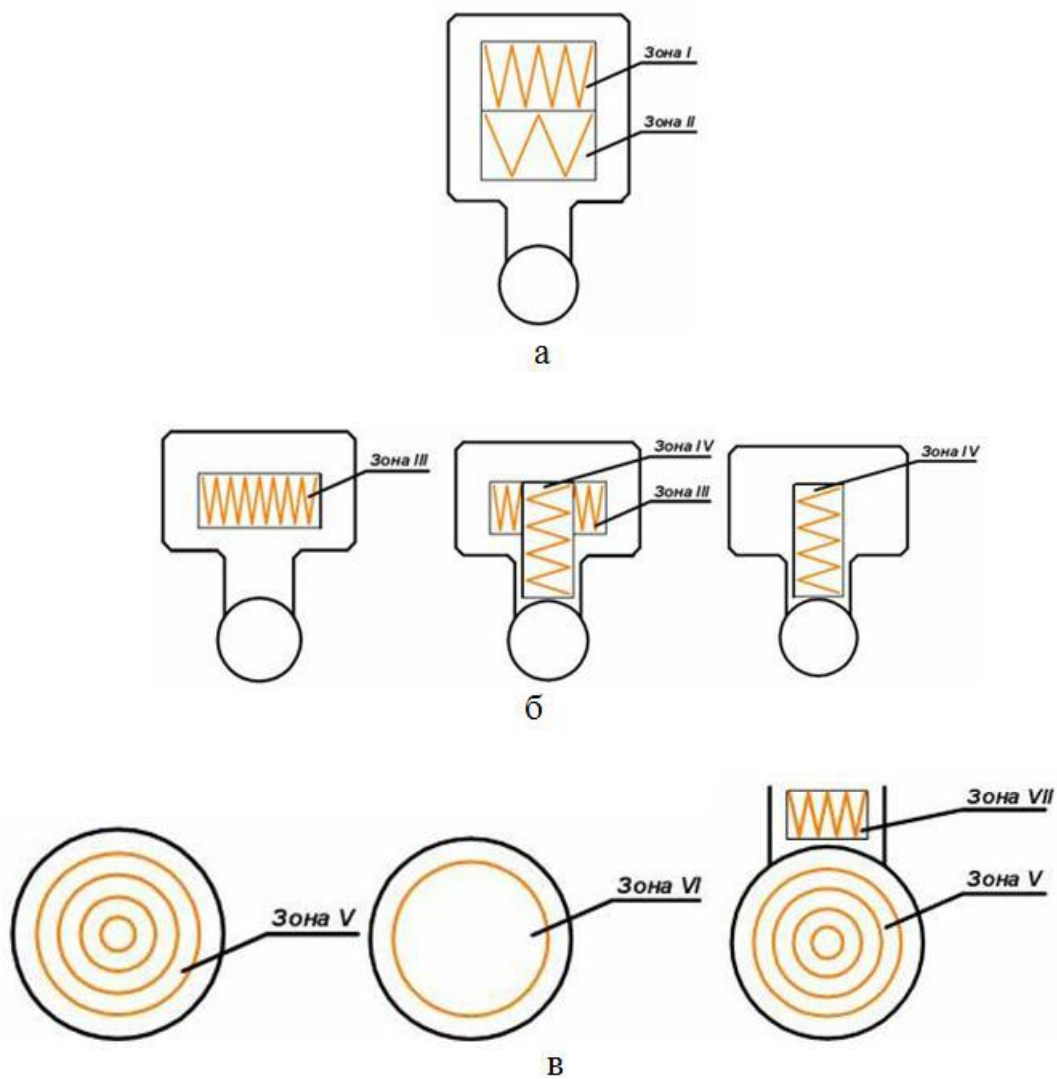
Блок клавиатуры содержит 24 клавиши со светодиодами. Нажатием клавиш оператор определяет выбор режима для формирования ортогональных напряжений. Светодиоды отображают включение/выключение режима и управляются от микроконтроллера, принимающего сигналы нажатия клавиш, установленного на плате контроллера управления. Контроллер управления предназначен для получения сигналов от клавиш, формирования сигналов индикации режимов и передачи информации о выборе одного из режимов на исполнительные блоки цифро-аналоговых преобразователей. В блоке организовано переключение между основной и дополнительной развертками, которые формируются одними и теми же цифро-аналоговыми преобразователями, и регулировка каждой развертки по отдельности.

Коды координат X и Y, поступающие от контроллера на цифровые входы цифро-аналоговых преобразователей, определяют форму ортогональных напряжений, уровень которых зависит от уровня сигнала на входе опорного напряжения цифроаналоговых преобразователей. Имеются четыре цифро-аналоговых преобразователя на базе контроллера PIC24J64GP206-I/PT фирмы Microchip.

Указанные схема и устройство блока ARME 01 позволяют реализовать технологический процесс плавки молибдена в установке МВ-1 с промежуточной емкостью для достижения требуемой степени очистки. Суть процесса управления электронно-лучевым нагревом заключается в циклическом управлении сформированными развертками в пределах заданных зон нагрева и распределении в них мощности на различных этапах процесса плавки (рисунок 4, таблица 1).

Функционально пушки 1 и 2 обеспечивают нагрев переплавляемых брикетов (зона I) и плавление их в промежуточную емкость (зона II) (рисунок 4а). В зоне I постепенно осуществляется прогрев и дегазация брикетов с последующим плавлением в зоне II, благодаря чему увеличивается производительность плавки, снижаются потери на разбрызгивание и испарение. Пушка 3 обеспечивает нагрев металла в промежуточной емкости (зона III) и периодический слив расплава из промежуточной емкости в кристаллизатор путем расплавления гарнисажного барьера в зоне IV (рисунок 4б).

Пушка 4 последовательно работает в зонах V, VI и VII, обеспечивая нагрев металла в кристаллизаторе, формирование качественной поверхности слитка и чистку носика промежуточной емкости.



а – 1,2; б – 3; в – 4

Рисунок 4 – Схемы разверток для электронных пушек

Таблица 1 – Распределение мощности в развертках (см. рисунок 4).

	Зона I	Зона II	Зона III	Зона IV	Зона V	Зона VI	Зона VII
Мощность, %	50	50	100	0	100	0	0
	25	75	75	25	75	0	25
	0	100	0	100	50	0	50
					0	100	0

Благодаря примененному оборудованию управления электронными пушками установки МВ-1 и технологической схеме зонного нагрева металла при плавке молибдена получены слитки диаметром до 130 мм. Слитки отличаются качественной поверхностью без значительных гофр и трещин. Химическая чистота полученных слитков по исследованным элементам соответствует требованиям марки молибдена МЧ (молибден чистый, Мо 99,96% масс.), применяющейся для изделий ответственного назначения [6]. При этом содержание примесей уменьшилось более чем в 3 раза, а исследованных газов – в 10-100 раз.

Данная схема в дальнейшем будет использована на более мощных многопушечных плавильных установках и комбинированных аппаратах для плавки и испарения в вакууме.

Библиографический список

1. Заборонок Г.Ф. *Электронная плавка металлов* / Заборонок Г.Ф., Зеленцов Т.И., Ронжин А.С. – М.: Металлургия, 1965. – 292 с.
2. Мовчан Б.А. *Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов* / Мовчан Б.А., Тихоновский А.Л., Курапов Ю.А. – К.: Наукова думка, 1972. – 240 с.
3. *Электронно-лучевая плавка* / [Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Козлитин Д.А., Ахонин С.В. и др.] – К.: Наукова думка, 1997. – 265 с.
4. Зеликман А.Н. *Металлургия редких металлов* / Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. – М.: Металлургия, 1991. – 432 с.
5. *Электронно-лучевая плавка титана* / [Б.Е.Патон, Н.П.Тригуб, С.В.Ахонин, Г.В.Жук] – К.: Наукова Думка, 2006. – 248 с.
6. Мушегян В.О. *Электронно-лучевая плавка восстановленного концентрата молибдена* / Мушегян В.О. // *Современная электрометаллургия*. – 2009. – № 4. – С. 26-28.
7. *Proceedings II International conferens on electron beam technologies* / Я.Я. Удрис, В.А. Чернов "Мощные электронные пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР)" // *Varna, Bulgaria, 1988*. – p. 254.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. С.Н. Петрушовым