



УДК 669.187.526:51.001.57

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА ПРИ ПЛАВКЕ МОЛИБДЕНА В УСТАНОВКЕ МВ-1

В. О. Мушегян, А. А. Тарасюк

Проведен анализ схемы электронно-лучевого нагрева при плавке тугоплавких металлов с промежуточной емкостью в установке МВ-1. Определен оптимальный режим действия перекрывающихся лучей с компенсацией перегрева. Схема применена для плавки слитков молибдена с требуемым химическим составом и качественной поверхностью.

Analysis is made of scheme of electron beam heating in melting of refractory metals with a cold hearth in the installation MV-1. Optimum condition of action of overlapping beams with a compensation of overheating is determined. The scheme was used for melting of molybdenum ingots with required chemical composition and quality surface.

Ключевые слова: молибден; слиток; электронно-лучевой переплав; электронная пушка; нагрев; кристаллизация

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) наряду с вакуумно-дуговым переплавом (ВДП) является классическим способом 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 которого существенно ограничен выбор переплавляемого материала как по размерам, так и по чистоте от примесей, при

ЭЛП происходит максимальная очистка от вредных примесей и газов даже самого загрязненного металла, практически отсутствуют ограничения по подготовке и характеру исходного переплавляемого сырья [3].

ЭЛП 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 при 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 требуется тщательный контроль за распределением мощности электронных лучей по всем элементам технологической оснастки — зоне плавления шихты в устройстве подачи, промежуточной емкости и кристаллизаторе. Для этого применяют способы 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

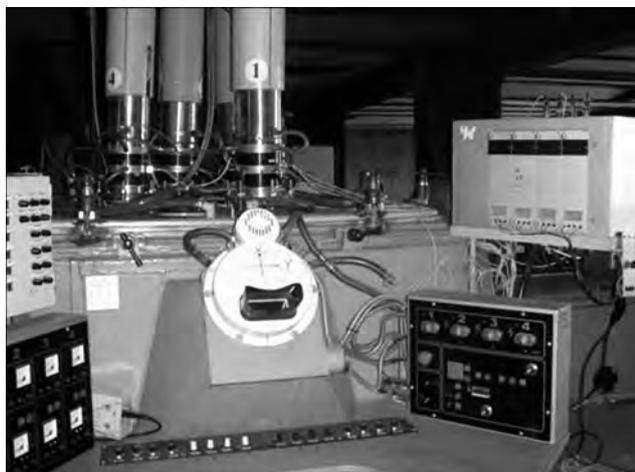


Рис. 1. Электронно-лучевая установка МВ-1 (пульт управления и четыре электронные пушки)

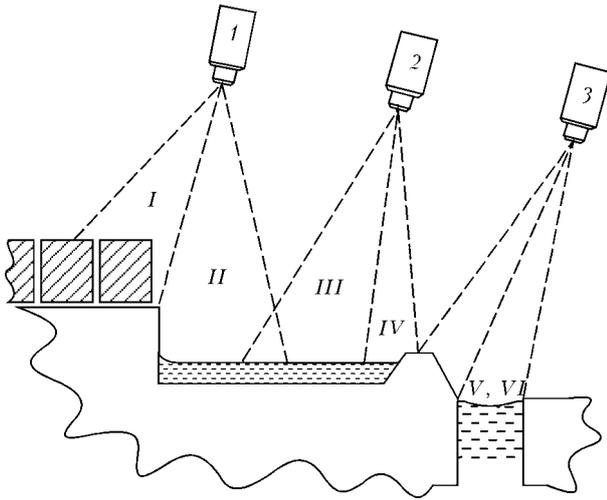


Рис. 2. Схема нагрева следующих рабочих зон: I – нагрев брикетов молибдена; II – плавление в промежуточной емкости; III – поддержание жидкой ванны в промежуточной емкости; IV – поддержание слива в кристаллизатор; V, VI – нагрев молибдена в кристаллизаторе; VII – нагрев барьера при сливе и очистке носика; 1 – ЭЛП1, ЭЛП2; 2 – ЭЛП3; 3 – ЭЛП4

установке МВ-1, созданной в НТЦ «Патон-Армения» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (рис. 1), в слитки диаметром от 70 до 130 мм [6].

В указанной установке впервые применена технология плавки молибдена с использованием промежуточной емкости и электронных пушек тлеющего разряда [7]. Это вызвано необходимостью в максимальной очистке нетрадиционной исходной шихты – спеченных брикетов молибдена диаметром 50 мм, длиной 50... 100 мм, чистотой 98,5 %.

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 распла-

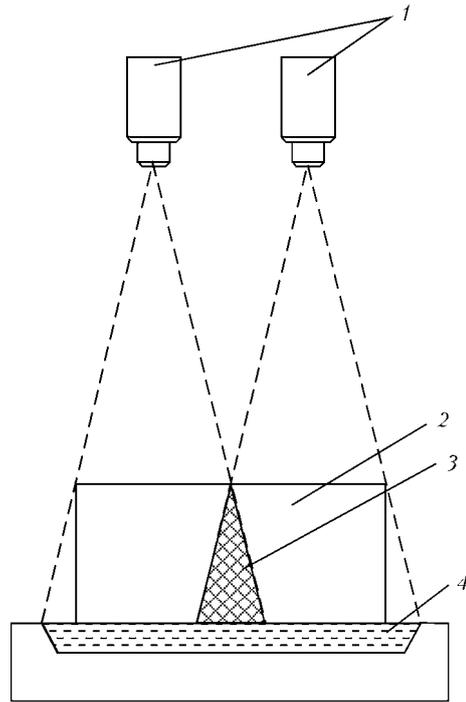


Рис. 4. Перекрытие зон действия электронных лучей: 1 – электронно-лучевые пушки; 2 – заготовка (ширина 0,8 м); 3 – зона совместного нагрева; 4 – промежуточная емкость

ленном 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 по 100 кВт каждая, которые функционально обеспечивают указанные выше стадии нагрева в динамическом режиме. Схема на-

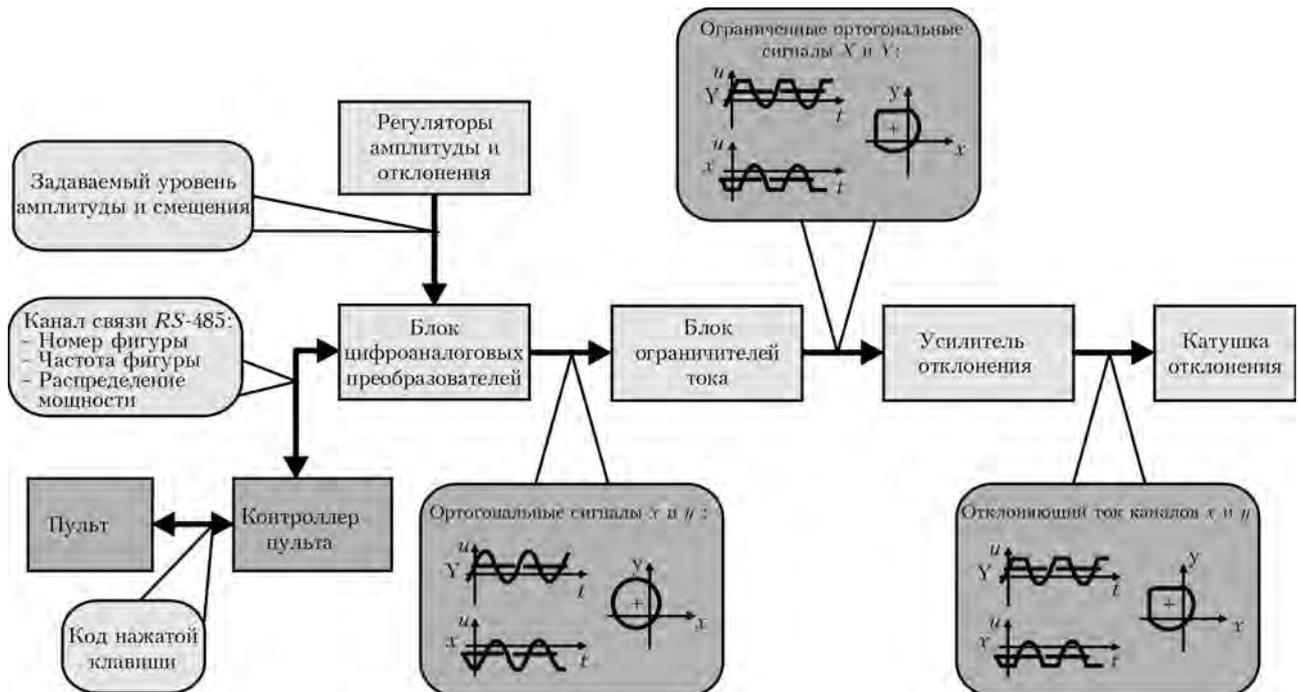


Рис. 3. Блок-схема описания алгоритма работы устройства ARME 01

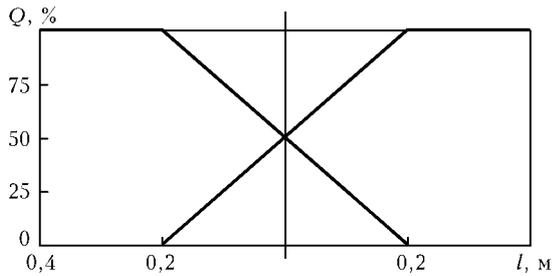


Рис. 5. Изменение мощности Q электронных пушек в зависимости от расстояния l до оси заготовки

грева металла при ЭЛПЕ молибдена в установке МВ-1 приведена на рис. 2.

Для каждой пушки или групп пушек имеется набор необходимых программ, реализуемых в виде разверток электронных лучей в пределах заданных параметров с использованием модулирования распределения мощности в соответствии с выбранным технологическим режимом плавки.

Для выбора и программирования технологических режимов управления нагревом применяют блок управления пушками ARME 01, обеспечивающий следующие режимы работы управления четырехканальными устройствами: точка — формирование фокусировки лучей в точке; кольцо — в четвертом канале образуется кольцеобразная развертка луча; нагрев емкости — в третьем канале формируется развертка для покрытия прямоугольной площадки; нагрев кристаллизатора — в четвертом канале последовательно образуются кольца различного диа-

метра для покрытия, соответствующего развертке заполненного круга; частота — выбирается необходимая частота повторения развертки (диапазон частот регулируется формированием развертки от 1 до 200 Гц); распределение мощности — перераспределение мощности между двумя видами развертки (распределение мощности между развертками выбирают в соотношении 25:75, 50:50, 0:100 и т. п.); сброс — переход программы контроллера в первоначальное состояние; центр — установка развертки в центре.

Блок-схема устройства ARME 01 приведена на рис. 3.

Функционально пушки 1 обеспечивают нагрев переплавляемых брикетов (зона I) и плавление их в промежуточную емкость (зона II). 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 2 обеспечивает нагрев металла в промежуточной емкости (зона III) и периодический слив расплава из промежуточной емкости в кристаллизатор путем расплавления гарнисажного барьера в зоне IV. Пушка 3 последовательно работает в зонах V–VII, обеспечивая нагрев металла в кристаллизаторе, формирование качественной поверхности слитка и чистку носика промежуточной емкости.

В ходе экспериментальных плавки в установке МВ-1 решали проблему перегрева металла в зонах I и II. Для плавления исходной шихты пушками 1

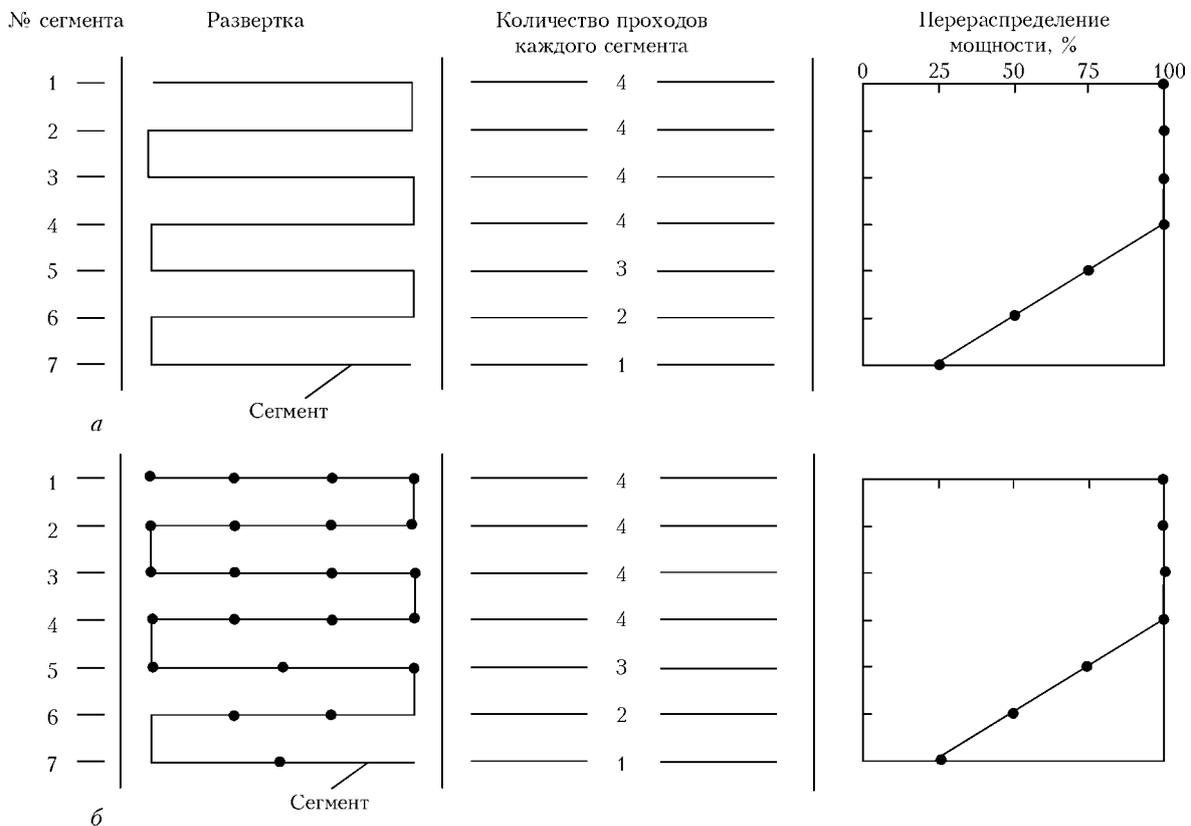


Рис. 6. Перераспределение мощности луча в его развертке путем изменения количества проходов сегмента (а) и точек (б) в сегменте



предназначена зона совместного нагрева, расположенная на торце заготовок (рис. 4). В этой зоне будет фиксироваться перегрев металла, а также более интенсивное плавление и испарение.

Для устранения перегрева следует программировать развертку электронных лучей по определенному закону. Устранение совместного перегрева заготовки происходит за счет перераспределения мощности электронного луча от 100 до 0 % при прохождении зоны совместного нагрева (рис. 5).

Для реализации взаимной компенсации лучей 1 и 2 электронных пушек применяли два варианта перераспределения мощности (рис. 6): изменение количества проходов каждого сегмента развертки и варьирование количества точек (времени пребывания луча) в каждом сегменте. Использовали оба варианта. Они дали положительный результат — равномерный нагрев сечения заготовки и промежуточной емкости в зоне действия первого и второго лучей. Для выяснения предпочтительности одного из вариантов потребуются дополнительные исследования.

Благодаря используемому оборудованию управления электронными пушками установки МВ-1 и технологической схеме зонного нагрева металла при плавке молибдена получены слитки диаметром до 130 мм, отличающиеся качественной поверхностью без значительных гофр и трещин.

Химическая чистота указанных слитков по исследованным элементам соответствует требованиям марки молибдена МЧ (молибден чистый, 99,96 % мас.), применяющейся для изделий ответственного назначения [6]. При этом содержание примесей уменьшилось более чем в 3 раза, а газов — в 10... 100 раз.

Выводы

1. Разработаны оборудование и технологическая схема для эффективного управления электронно-лучевым нагревом при плавке тугоплавких металлов с промежуточной емкостью.

2. Решена проблема неравномерности нагрева металла за счет перекрытия лучей.

3. Показано, что схема успешно применяется при плавке слитков молибдена в электронно-лучевой установке МВ-1 и позволяет получать качественные слитки требуемого химического состава.

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

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

НТЦ «Патон–Армения»

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Киевский техн. ун-т «КПИ»

Поступила 18.10.2010