

*к.т.н. Мушегян В.О.
(Ин-т электросварки им. Е.О. Патона
НАН Украины, г. Киев, Украина)*

ПОЛУЧЕНИЕ СЛИТКОВ МОЛИБДЕНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТЬЮ

Проведено дослідні плавки злитків молибдену в електронно-променевій печі із проміжною ємністю. Методом математичного моделювання процесу формування злитка визначений оптимальний технологічний режим переплаву. Досліджено структуру та хімічний склад злитків.

Ключові слова: *молибден, електронно-променева плавка, проміжна ємність, математичне моделювання, швидкість охолодження, злиток, макроструктура, хімічний склад.*

Проведены опытные плавки слитков молибдена в электронно-лучевой печи с промежуточной емкостью. Методом математического моделирования процесса формирования слитка определен оптимальный технологический режим переплава. Исследованы структура и химический состав слитков.

Ключевые слова: *молибден, электронно-лучевая плавка, промежуточная емкость, математическое моделирование, скорость охлаждения, слиток, макроструктура, химический состав.*

В последние десятилетия специалисты в области жаропрочных материалов уделяют повышенное внимание тугоплавким металлам – Nb, Ta, W, Mo как основе нового класса жаропрочных сплавов. Особый интерес представляет молибден. Температура плавления молибдена равна 2610 °С, т. е. приблизительно на 1000 °С выше точек плавления обычных высокотемпературных сплавов. Только вольфрам и тантал превосходят молибден по тугоплавкости. Модуль упругости молибдена при комнатной температуре равен около $0,32 \cdot 10^6$ МПа. Это — одно из самых высоких значений модуля для промышленных сплавов. С ростом температуры модуль изменяется незначительно. Так, при 870 °С он все еще приблизительно на $\frac{1}{3}$ выше модуля упругости стали при комнатной температуре. Указанные выше параметры позволяют рассматривать молибден в качестве перспективных мате-

риалов, прежде всего для элементов промышленных печей, электронных пушек, реактивных двигателей [1].

В настоящее время акцент постепенно переносится с изучения возможных областей применения и повышения служебных характеристик сплавов Мо на экономические и технологические аспекты их промышленного производства. Разработаны различные технологические схемы получения слитков молибдена – как методом спекания из порошка (металлокерамика), так и процессы получения более чистого по примесям молибдена. Это традиционная для тугоплавких металлов вакуумно-дуговая плавка (ВДП) [2]. Вакуумно-дуговой переплав в разряженной атмосфере инертного газа обладает ограниченными возможностями по очистке исходного молибденового сырья от вредных примесей и газов и требует высокой чистоты от шихтовых материалов. Ведутся исследования по получению сплавов молибдена методом электронно-лучевой плавки (ЭЛП), которая использует поверхностный источник нагрева – электронный луч. При этом возникает проблема хладноломкости слитков молибдена, обусловленная в первую очередь крупными кристаллитами, характерными для слитков ЭЛП [3].

Задача данной работы состояла в том, чтобы, основываясь на положительном опыте, накопленном в ИЭС им. Е.О. Патона в области выплавки слитков тугоплавких металлов [4], изучить возможность получения слитков молибдена заданного химического состава и с благоприятной структурой методом электронно-лучевой плавки с промежуточной ёмкостью (ЭЛПЕ).

Были проведены экспериментальные плавки восстановленного молибденового концентрата производства ОАО «Чистое железо» (Ереван, Армения) в виде брикетов. Химический состав исходного сырья приведен в таблице 1. Брикеты представляют собой цилиндры диаметром 40 и длиной 45-50 мм, средней массой 0,8 кг из восстановленного водородом молибденового порошка.

Таблица 1 – Химический состав слитков Мо ЭЛПЕ и исходного сырья

Продукция	Содержание элементов, масс.%					
	C	S	Fe	Cu	O	N
Молибден металлический в виде спеченных брикетов	0,005	0,001	0,2	0,01	0,2	0,03
Слитки ЭЛПЕ Ø 70 и 100 мм	0,002	<0,001	0,007	<0,001	0,0005	0,002

Использовано преимущество электронно-лучевого переплава молибдена перед ВДП – переплавлять металл в любом виде (брикеты, порошок стружка), тогда как при дуговой плавке необходимо приготовление расходуемого электрода.

Плавки проводили на установке МВ-1 [5]. Брикеты из восстановленного молибденового порошка загружались в нерасходуемый короб, после чего установку вакуумировали до уровня остаточного давления $5 \cdot 10^{-2}$ Па. Используя программируемые схемы разверток и сканирования электронных лучей исходные брикеты прогревали на краю промежуточной емкости, в результате чего происходило интенсивное газовыделение и брикеты становились пористыми. Продолжая увеличивать интенсивность нагрева (повышением мощности до 100 кВт), плавно переходили к плавлению брикетов и заполнению объема промежуточной емкости. По мере накопления металла в промежуточной емкости производили порционный слив расплава в медный водоохлаждаемый цилиндрический кристаллизатор.

Для исключения возникновения в процессе кристаллизации слитка структурной неоднородности и крупного зерна необходимо равномерное распределение температуры по поверхности жидкой ванны в кристаллизаторе [6]. С другой стороны, для получения гладкой поверхности слитка необходимо локальное повышение удельной мощности нагрева в периферийной части слитка [7]. Поэтому для выбора оптимальных параметров плавки молибдена были проведены расчёты в рамках математической модели процессов переноса тепла в слитке при ЭЛПЕ [8].

Моделировали режим, при котором поверхность слитка обогревается двумя электронными лучами: нагрев первым лучом (W_1) равномерно распределён по центральной части слитка, второй луч (W_2) обогревает поверхность слитка вблизи стенок кристаллизатора. В результате моделирования были определены параметры режима плавки (таблица 2), при соблюдении которых обеспечивается равномерная температура на поверхности центральной части жидкой ванны, а в периферийной области достигается минимальный перегрев ~ 50 К. При этом создаются одинаковые (по радиусу) условия кристаллизации расплава молибдена. В формируемом слитке были рассчитаны также изменяющиеся во времени температурные поля, что позволило определить скорость охлаждения расплава при кристаллизации. В указанных условиях скорость охлаждения составила 1-3 К/с.

Выплавку слитков осуществляли в соответствии с рассчитанными мощностями и конфигурацией нагрева его торца в кристаллизаторе. Электронным лучом, с помощью круговой развертки по свободной по-

верхности формируемого слитка в кристаллизаторе, поддерживали наличие постоянной жидкой ванны глубиной до 6 мм.

Таблица 2 – Параметры плавки слитка Мо Ø 100 мм

Общая мощность ЭЛ нагрева	183 кВт
Мощность в кристаллизаторе	32 кВт ($W_1=12$ кВт, $W_2=20$ кВт)
Скорость плавки	57 кг/ч
Удельный расход электроэнергии (без учета вакуумной системы)	3,21 кВт·ч/кг

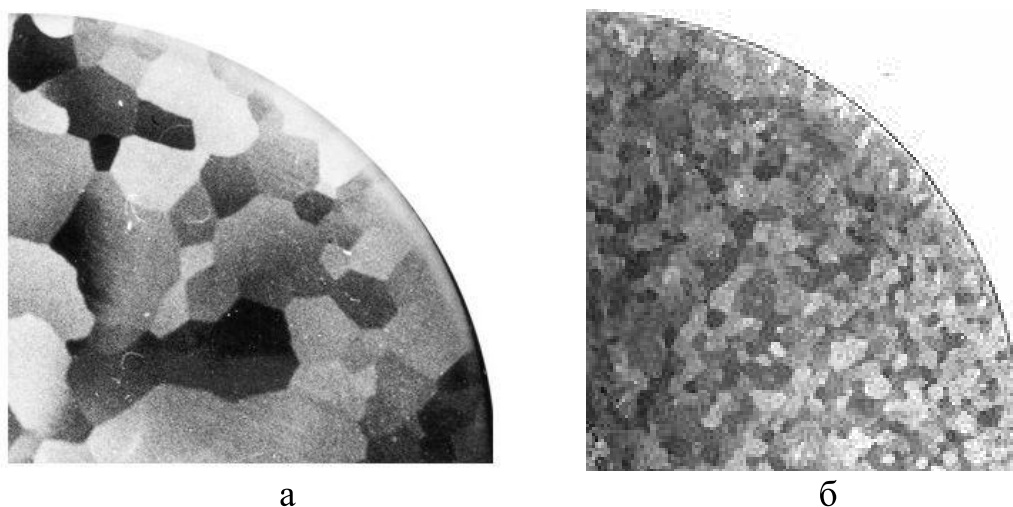
При этом программируемым сканированием лучей добивались увеличения интенсивности обогрева у стенок кристаллизатора по сравнению с центральной зоной для минимизации поверхностных дефектов при формировании слитка. После окончания плавки слиток оставался в условиях вакуума до полного остывания.

В результате плавки были получены слитки молибдена ЭЛПЕ диаметром 100 мм (рисунок 1). Поверхность слитков – гладкая, без разрывов и трещин, с небольшими гофрами.



Рисунок 1 – Слиток Мо ЭЛПЕ Ø100 мм

В отличие от слитков прямого электронно-лучевого переплава макроструктура слитков ЭЛПЕ, полученных в оптимизированном режиме характеризуется однородностью и относительно мелким зерном (рисунок 2).



а – прямой переплав, б – плавка с промежуточной емкостью

Рисунок 2 – Макроструктура слитков молибдена Ø100 мм электронно-лучевой плавки (1/4 поперечного сечения)

Химический анализ слитков показал, что в результате электронно-лучевого переплава брикетов молибдена с использованием промежуточной емкости полученный слиток очищается от подавляющего большинства примесей, в частности примесей O, N, Fe, Cu, C, S (см. таблицу 1). Измерением механических свойств металла слитков установлено, что твердость литого молибдена ЭЛПЕ HV 140-155 кг/мм² намного ниже, чем молибдена полученного после вакуумно-дугового переплава HV 176-180 кг/мм², что свидетельствует о повышении пластических свойств металла за счет очистки от примесей и уменьшения величины зерна.

Метод моделирования тепловых процессов при ЭЛПЕ с учетом физико-химических особенностей молибдена позволил рассчитать технологические параметры процесса плавки, обеспечившие получение слитков Mo заданной чистоты и кристаллического строения. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности использования метода ЭЛПЕ для получения слитков молибденовых сплавов.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение технико-экономических параметров электронно-лучевой плавки молибдена с использованием промежуточной емкости и улучшение качества получаемого слитка.

Библиографический список

1. *Geoffrey E. Spriggs A history of fine grained hardmetal / E. Geoffrey // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. - Volume 13, Issue 5, 1995. - pp. 241-255.*
2. *Тиммонс Дж. А. Дуговая плавка молибдена / Тиммонс Дж. А., Ийнлинг Р. Дж.; под ред. А.К. Натансона. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – С. 28-42.*
3. *Савицкий Е.М. Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов / Е.М. Савицкий, Г.С.Бурханов. – М.: Наука, 1971. – 356 с.*
4. *Электронно-лучевая плавка / [Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Козлитин Д.А. и др.] – К.: Наукова думка, 1997. – 265 с.*
5. *Мушегян В.О. Электронно-лучевая установка для плавки молибдена / В.О. Мушегян // Специальная электрометаллургия. – 2010. – № 1. – С. 44-47.*
6. *Тригуб Н.П. Оптимизация выплавки слитков сталей и сплавов в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью / Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1996. – № 2. – С. 12-17.*
7. *Электронно-лучевая плавка крупных слитков сложнолегированных сплавов с мелкозернистой структурой / Д.А. Козлитин, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин [и др.] // Проблемы спец. электрометаллургии. – 1994. – № 3-4. – С. 42-47.*
8. *Жук Г.В., Математическое моделирование процессов кристаллизации титанового сплава Ti-6Al-4V при ЭЛПЕ / Г.В. Жук, Л.В. Ахонина, Н.П. Тригуб // Пробл. спец. электрометаллургии. – 1998. – № 2. – С. 1-25.*

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Луценко В.А