



УДК 669.187.526:51.001.57

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛПЕ НА СВОЙСТВА СЛИТКОВ МОЛИБДЕНА И СПЛАВОВ НА ЕГО ОСНОВЕ

**В. О. Мушегян**

НТЦ «Патон-Армения» ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.  
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11.  
E-mail: paton.armenia@gmail.com

Разработана технология электронно-лучевой плавки слитков сплавов на основе молибдена на электронно-лучевой установке МВ-1, приспособленной для тугоплавких металлов и сплавов на их основе. В качестве исходных материалов использовали первичные брикеты молибдена и легирующие добавки в виде карбидов. Добавки получены в электронно-лучевой установке по оригинальной технологии совместного испарения. В процессе плавки применяли современный способ периферийного нагрева слитка в кристаллизаторе. Исследованы слитки мало- и среднелегированных сплавов молибдена, полученные как традиционным способом ЭЛПЕ, так и с применением периферийного нагрева в кристаллизаторе. Определено влияние режимов плавки на структуру, температуру хладноломкости и механические свойства металла. Библиогр. 8, табл. 2, ил. 4.

**Ключевые слова:** молибден; слиток; электронно-лучевой переплав; кристаллизация; структура; рафинирование; ударная вязкость

Электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) позволяет эффективно рафинировать тугоплавкие металлы, а также разделять во времени и пространстве процессы плавления шихты, рафинирования и формирования, кристаллизации слитков. Это и возможность ведения плавки при низком остаточном давлении создаст условия для эффективной дегазации металла. Указанные преимущества ЭЛПЕ позволяют достигать заданной чистоты металла слитков даже при использовании загрязненного шихтового материала. Вместе с тем, процессы рафинирования от примесей и включений, кристаллизации слитков молибдена при ЭЛПЕ изучены недостаточно, а плавка первичных концентратов молибдена не исследовалась вообще. В связи с этим актуальным является исследование указанных процессов и создание промышленных технологий получения качественных слитков молибдена в Украине.

Исследования процессов рафинирования и кристаллизации молибденовых слитков при ЭЛПЕ проводились в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством академика Б. А. Мовчана. Показано положительное влияние легирования молибдена (до 0,1 % углерода) на структуру слитка по механизму высокотемпературной гетерогенизации [1]. В работе [2] установлены количественные характеристики удаления примесей из тугоплавких металлов в процессе электронно-лучевой плавки. В публикации [3] исследованы особенности затвердевания металла слитков сталей и сплавов при ЭЛПЕ.

Установлены феноменологические зависимости структуры слитков от теплофизических условий их формирования: сдвиг максимума электронно-лучевого нагрева слитка в кристаллизаторе в сторону его периферийной части и применение так называемой порционной плавки.

В работе [4] установлены зависимости влияния теплофизических условий формирования слитков на их структуру через скорости охлаждения расплава при кристаллизации. В частности, смещение максимума обогрева в периферийную зону кристаллизатора (так называемый периферийный обогрев — ПО) способствует выравниванию условий кристаллизации по диаметру слитка и скорости охлаждения расплава. Вместе с тем применение указанных зависимостей к слиткам молибдена из-за особенностей их кристаллизации и наличия порога хладноломкости требует дальнейших исследований.

В ИЭС им. Е. О. Патона и НТЦ «Патон-Армения» совместно с ГП НИТИ им. Я. Е. Сады проведены исследования слитков, выплавленных способом ЭЛПЕ [5], в том числе с применением оптимизированного режима периферийного обогрева (ЭЛПЕ ПО) [6].

Экспериментальные плавки проводили на электронно-лучевой установке МВ-1 (рис. 1), главной технической особенностью которой является ее приспособленность к плавке тугоплавких металлов (высокая удельная мощность электронно-лучевого нагрева относительно объема камеры плавки и конструктивные решения технологической оснастки, позволяющие эффективно производить дегазацию и плавку исходного сырья). При не-

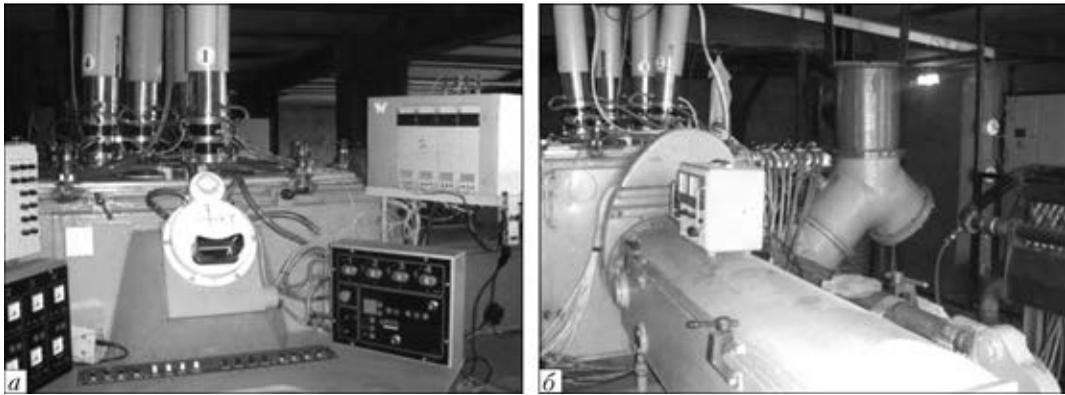


Рис. 1. Установка MB-1: а — пульт оператора; б — вид со стороны камеры загрузки

обходимости установка позволяет создавать в точке электронную бомбардировку удельной мощностью  $5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Исходная шихта представляла собой молибден металлический в виде спеченных брикетов (ТУ PA28-54-529-61-661–2007) с добавлением легирующих в количестве, необходимом для достижения заданного химического состава сплава и компенсации потерь на испарение. С этой целью в сплавы углерода в процессе формирования шихты добавляли порошки карбидов циркония и титана, полученные способом совместного испарения в электронно-лучевой установке [7].

После загрузки шихтовой заготовки установку вакуумировали до уровня остаточного давления примерно  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. Затем заготовку сплавляли в промежуточную емкость до ее заполнения и периодически сливали жидкий металл в медный водоохлаждаемый кристаллизатор. В процессе плавки применяли кристаллизатор цилиндрической формы с внутренним диаметром 100 мм, оснащенный вертикально перемещаемым поддоном с углублением в виде «ласточки хвоста».

Первыми порциями слива формировали заправку будущего слитка до высоты, равной внутреннему диаметру кристаллизатора. Затем на достигнутом технологическом режиме выплавляли слиток необходимой высоты. В ходе экспериментальных плавки скорость плавки  $q$ , Вт/см<sup>2</sup>

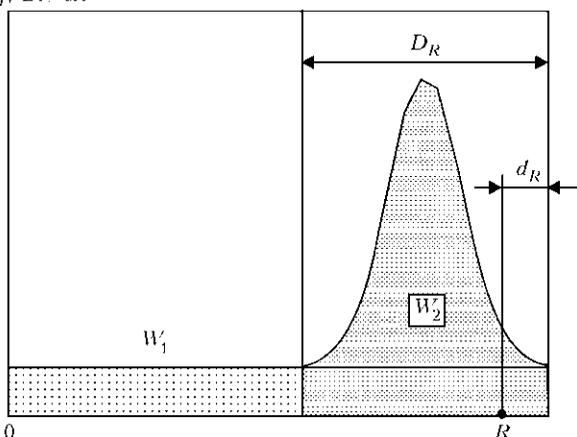


Рис. 2. Схема распределения мощности  $q$  теплового нагрева на поверхности зеркала ванны в полости кристаллизатора при ЭЛПЕ ПО (0 — ось слитка, ось симметрии;  $R$  — радиус слитка;  $W_1$  и  $W_2$  — мощности нагрева соответственно центральной и периферийной частей слитка;  $DR$  — ширина кольца периферийного нагрева;  $dR$  — «засветка» луча на стенку кристаллизатора) [6]

варьировали в пределах 0,8...4,5 кг/ч. Обогрев слитка в кристаллизаторе производили путем сканирования по его поверхности луча одной из электронных пушек. Обогревали слиток как равномерно по всей поверхности, так и с преимущественным сосредоточением обогрева в периферийной его части (рис. 2).

Процесс плавки продолжался в среднем 3 ч. В конце плавки производили вывод усадки путем постепенного снижения мощности обогрева верхнего торца слитка в кристаллизаторе. Слиток остывал в камере в условиях вакуума в течение 4 ч.

Исследовали слитки ряда электронно-лучевых плавок молибдена, осуществленных при различных скоростях плавки и условиях обогрева металла в кристаллизаторе (табл. 1). Микротвердость всех выплавленных сплавов находится на уровне 1400...1500 МПа, что гораздо ниже, чем микротвердость молибдена обычной дуговой плавки (1700...2000 МПа). Это свидетельствует о значительно лучшем рафинировании металла при плавке в высоком вакууме.

Как видно из таблицы, температура перехода в хрупкое состояние такого молибдена практически не зависит от скорости плавки. Характер разрушения изучали методом фрактографии. Сплавы, показавшие наиболее низкую температуру хладноломкости, разрушались преимущественно по телу зерна, в то время как сплавы с высокой температурой перехода — по границам зерен (рис.3). Следует отметить, что в структуре сплавов, показавших низкую температуру перехода, внутри крупных зерен размером 5...10 мм обнаружена субструктура размерами 0,3...0,5 мм, внутри которой имеется субструктура 2-го порядка (рис.4).

Для молибдена, выплавленного с помощью традиционной технологии ЭЛПЕ, наиболее низкой температурой перехода оказалось значение — 45 °С, тогда как наиболее низкая температура перехода металла ЭЛПЕ с периферийным обогревом составила — 80 °С, причем принципиальных различий в структуре сплавов с низкой и высокой температурами хладноломкости не обнаружено.

Для исследования влияния способов и режимов плавки на структуру и свойства литых сплавов молибдена способом ЭЛПЕ получены слитки сплавов трех систем легирования: TZM (Mo–0,02C–0,5Ti–0,1Zr); TZC (Mo–0,15C–1,25Ti–0,15Zr); Mo–1,5Nb–0,25C.

Металл выплавляли способами ЭЛПЕ — традиционным и с применением периферийного электронно-луче-



Таблица 1. Характеристики литого молибдена ЭЛПЕ и ЭЛПЕ ПО

№ п/п	Вакуум, Па	Скорость плавки, кг/ч	Порог хладноломкости, °С	Размер зерна, мм	Размер субзерна, мм	Микротвердость, МПа	Временное сопротивление, МПа	Характер разрушения, %
<i>ЭЛПЕ</i>								
1	0,005	4,0	-45	10	0,3	1560	670	90 по границе
2		3,5	-20	9	0,2	1690	810	90 »
3		3,8	+60	16	0,6	1560	-	50 »
4		1,7	-30	12	0,4	1590	790	50 »
<i>ЭЛПЕ ПО</i>								
1	0,030	4,0	-80	0,8	0,06	1440	742	По зерну
2	0,005	4,5	-80	0,6	0,05	1530	852	»
3	0,004	0,8	+50	1,6	0,10	1530	934	По границе
4	0,006	3,6	+70	1,2	0,10	1570	-	»
5	0,004	2,0	-60	0,9	0,08	1440	625	По зерну

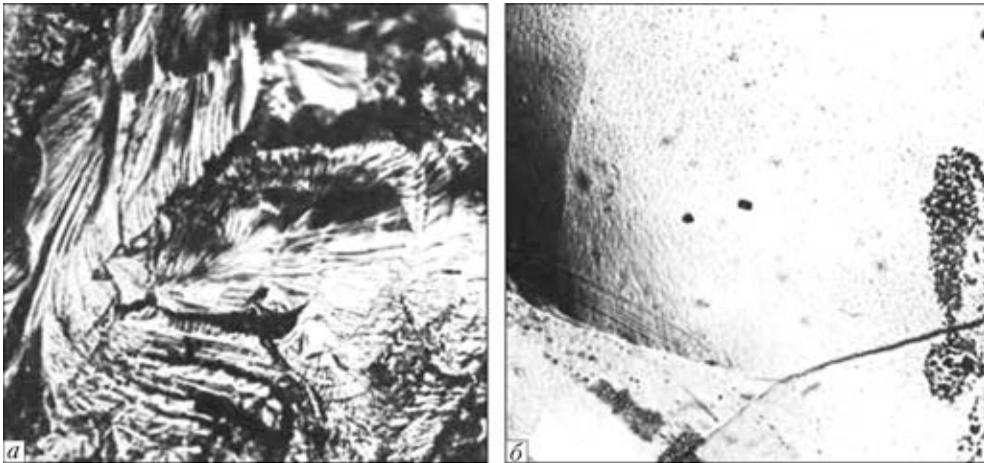


Рис. 3. Характер разрушения сплавов ЭЛПЕ ПО № 2 (а) и 3 (б) (табл. 1)

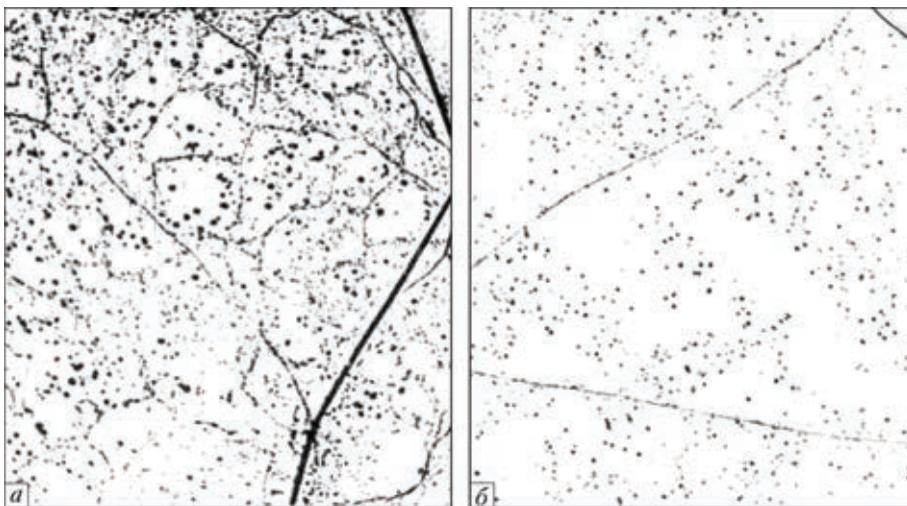


Рис. 4. Микроструктура (×500) сплавов ЭЛПЕ ПО № 1 (а) и 3 (б) (табл. 1); ×500

вого обогрева. Способы плавки, составы и свойства полученных сплавов представлены в табл. 2. Как следует из табл. 2, сплавы в литом состоянии имеют практически одинаковый размер зерна в пределах 0,5...0,6 мм. Ре-

зультаты измерения твердости показали, что у матрицы сплава в случае изготовления способом ЭЛПЕ ПО она несколько ниже, чем у металла ЭЛПЕ, но значительно превышает значения, полученные для плавок нелегиро-



Таблица 2. Характеристики литых сплавов молибдена ЭЛПЕ

Марка сплава	№ сплава	Способ плавки	Порог хладноломкости, °С	Размер зерна, мм	Микротвердость, МПа (2-я фаза/матрица)	Временное сопротивление, МПа	Характер разрушения транскристаллитный, %
TZM	2105	ЭЛПЕ ПО	-30	0,5	2820/2280	855	100
	317	ЭЛПЕ	+25	0,6	3020/2060	747	85
TZC	2124	ЭЛПЕ ПО	>150	0,2	2520/2240	860	90
	321	ЭЛПЕ	>150	0,4	2830/2120	864	90
Mo-Nb-C	2112	ЭЛПЕ ПО	>150	0,15	2220	710	90
	322	ЭЛПЕ	>150	0,25	2420	760	80

ванного молибдена в условиях высокого вакуума (табл. 1). Таким образом, в литом состоянии матрица молибдена, полученного в полупромышленных условиях, значительно пресыщена примесями внедрения. Об этом также свидетельствуют результаты работы [8], где способом прецизионного измерения параметров кристаллической решетки показана значительная пресыщенность примесями внедрения молибденовой матрицы в литых сплавах. Вследствие этого режимы плавки и термомеханической обработки должны оказывать существенное влияние на характер распределения примесей внедрения и свойства литых сплавов молибдена. Данные табл. 2 показывают, что сплитки сплава TZM, полученные способом ЭЛПЕ ПО, имеют температуру хладноломкости ниже, чем у металла ЭЛПЕ того же состава. Этот результат находится в полном соответствии с данными табл. 1, полученными при плавках с высоким вакуумом.

### Выводы

1. В сплавах молибдена ЭЛПЕ периферийный обогрев металла в кристаллизаторе устанавливает предел хладноломкости в интервале  $-80...+70$  °С. Внутри крупных зерен формируется субструктура, при этом возрастают относительное удлинение и ударная вязкость металла сплитков.

2. Уменьшение зерна в молибденовом сплитке, получаемое при ЭЛПЕ ПО, приводит к изменению характера разрушения образцов от транскристаллитного к интеркристаллитному, что выражается в повышении вязкости их разрушения.

1. Мовчан Б. А., Статкевич В. Н. Повышение пластичности литых и рекристаллизованных сплавов молибдена при выделении высокотемпературной второй фазы // Изв. АН СССР. Металлы. — 1969. — № 2. — С. 129–136.
2. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекреационных металлов. — Киев: Наук. думка, 2008. — 306 с.
3. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. — Киев: Наук. думка, 1997. — 265 с.
4. Жук Г. В. О влиянии распределения мощности нагрева металла в кристаллизаторе в процессе ЭЛПЕ на структуру сплитков // Современ. электрометаллургия. — 2008. — № 2. — С. 17–20.
5. Мушегян В. О. Электроннолучевая плавка с промежуточной емкостью — эффективный способ повышения механических свойств молибдена // Электрометаллургия. — 2010. — № 9. — С. 28–31.
6. Мушегян В. О. Оптимизация технологии электронно-лучевой плавки молибдена способом математического моделирования // Современ. электрометаллургия. — 2011. — № 4. — С. 9–11.
7. Структура и некоторые свойства толстых вакуумных конденсатов Ti-C / А. С. Лисикян, Е. В. Черненко, В. О. Мушегян, Б. А. Мовчан // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 3. — С. 65–68.
8. Сплавы молибдена / Н. Н. Моргунова, Б. А. Клыпин, В. А. Бояршинов и др. — М.: Металлургия, 1975. — 390 с.

Developed is the technology of electron beam melting of ingots of molybdenum-base alloys in electron beam installation of MV-1 type, specially fit for refractory metals and alloys on their base. As initial materials, the primary briquettes of molybdenum and alloying additions in the form of carbides were used. Additions were produced in electron beam unit using unique technology of combined evaporation. The updated method of periphery heating of ingot in the mould was used during melting. Ingots of low- and medium-alloyed alloys of molybdenum, produced both by using the traditional EBCH method, and also by applying the periphery heating in mould, were investigated. The effect of conditions of melting on structure, cold brittleness temperature and mechanical properties of metal was determined. Ref. 8., Tables 2, Figs.4.

**Key words:** molybdenum; ingot; electron beam remelting; crystallization; structure; refining; impact strength

Поступила 17.01.2013