



## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРУБ ИЗ СЛИТКОВ МОЛИБДЕНА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ

В. О. Мушегян, Г. Х. Карапетян, Н. М. Туренков

Проведена серия исследований по производству опытно-промышленной партии молибденовых труб из слитков электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. На основании данных о структуре и пороге хладноломкости металла создана технологическая карта получения молибденовых труб. Показана возможность создания в Украине технологической цепочки производства проката тугоплавких металлов — от выплавки слитка до теплой прокатки труб.

A series of investigations was carried out on production of pilot-industrial batch of pipes of ingots of electron beam cold hearth melting. Basing on data about structure and brittleness threshold of metal, the technological chart of producing molybdenum pipes was made. The feasibility of creation in Ukraine of the technological chain of production of rolled metal of refractory metals starting from ingot melting up to hot rolling of pipes is shown.

**Ключевые слова:** молибден; слиток; электронно-лучевой переплав; промежуточная емкость; горячее прессование; порог хладноломкости; раскатка труб

Производство металлопродукции из тугоплавких металлов (ТМ), в том числе и молибдена, является обязательным фактором развития научно-технического прогресса в таких отраслях, как атомная энергетика, ракетостроение, космическое машиностроение, сверхзвуковая авиация (в агрегатах, работающих при температурах выше 1200 °С) [1, 2]. Поэтому совершенствование технологии изготовления проката из ТМ, в частности труб, с целью улучшения их качества, ужесточения точности геометрических размеров и свойств, весьма актуально.

Немаловажным аспектом при использовании труб из ТМ является снижение их себестоимости. В СССР, когда такая эксклюзивная продукция, как трубы из ТМ, выпускалась всего на нескольких предприятиях, вопрос о их себестоимости практически не поднимался. Изготовление этих труб полностью контролировалось государством.

В связи с тем, что Украина все больше интегрируется в мировую экономику с рыночными отношениями и жесточайшей конкуренцией, необходимость в разработке конкурентоспособной технологии производства труб из ТМ, в том числе из молибдена, является своевременной.

Технология производства труб из молибдена включает обязательный горячий передел (экструзию) слитка в гильзу, ее механическую и химическую обработку, а также последующий теплый передел, аналогично холодному, придающий трубам требуемые свойства и геометрические размеры.

Ввиду характерной для металлов VIa группы хрупкости молибдена при комнатной температуре его деформацию осуществляют в нагретом состоянии при температурах выше температуры хрупко-вязкого перехода  $T_x$ . Этот так называемый порог хладноломкости в значительной степени зависит от обработки металла, его структуры, качества поверхности и обычно составляет 350... 500 °С [3].

Вследствие указанных особенностей теплый передел молибденовых труб является трудо- и энергоемким многоцикловым процессом, требующим создания специальных условий деформирования, использования теплостойкого инструмента, сложных химических обработок, длительных вакуумных термообработок, применения дорогостоящих смазок и покрытий, постоянного научного сопровождения технологии с отбором и исследованием образцов по всей технологической цепочке.

Поскольку процесс изготовления труб из молибдена является весьма сложным и дорогостоящим, в настоящей статье авторы рассматривают сквозную (комплексную) технологию изготовления труб из литых тугоплавких металлов и их сплавов (молибдена марки МЧВП), снижающую затраты на их производство, в том числе вследствие полной реализации на предприятиях Украины.

Любое производство металлопродукции из литых металлов начинается с выплавки слитка. Среди способов получения молибденовых слитков [4] с точки зрения чистоты металла электронно-лучевая плавка является преимущественной, поскольку в глубоком вакууме (остаточное давление газов менее  $1 \cdot 10^{-2}$  Па) плавящийся металл очищается от вредных примесей внедрения (кислорода, азота и водо-



рода), а также сопутствующих легкоплавких металлов, таких как железо, медь, никель и кобальт. Чистота металла при этом достигает 99,99 %.

Однако металл слитков прямого электронно-лучевого переплава характеризуется значительной крупнозернистостью, что отрицательно сказывается на его пластичности за счет малоразвитой поверхности границ и повышенной удельной концентрации примесей по границам зерен (рис. 1, а).

В ходе эксперимента по созданию кооперации производства труб из ТМ между НТЦ «Патон-Армения» и ГП НИТИ им. Я. Е. Осады получена опытно-промышленная партия молибденовых труб из слитков электронно-лучевой плавки. В НТЦ способом ЭЛПЕ изготовлены экспериментальные слитки молибдена чистого вакуумного переплава (МЧВП) [5] с равноосной и относительно мелкозернистой структурой (рис. 1, б).

Механические свойства металла слитков, определенные при комнатной температуре, приведены в табл. 1. Вследствие указанного эффекта хладноломкости свойства литого металла далеки от требуемых для эксплуатации изделий из молибдена.

Дальнейшего улучшения свойств литых тугоплавких металлов обычно достигают путем горячей деформации —ковки, прессования или прокатки в валках. Согласно имеющемуся опыту производства труб из молибдена выбрали прессование.

Высокотемпературное прессование литого малопластичного металла, в том числе и молибдена, является преимущественным, по сравнению с горячей ковкой или косо́й прокаткой, поскольку при первом (экструзии) соблюдается наиболее благоприятная схема деформации —схема всестороннего неравномерного сжатия. Слитки молибдена деформировать при помощиковки даже при температурах 1350... 1450 °С не удавалось из-за образования трещин по границам зерен [1, 3].

Горячую деформацию молибденовых полых заготовок осуществляли на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 16 МН из втулки контейнера диаметром 120 мм. Скорость пуансона при прессовании составляла 230... 320 мм/с, температура нагрева слитков перед прессованием равнялась 1350... 1450 °С. В качестве технологического инструмента пресса использовали матрицы с рабочим диаметром 52 мм из стали 3Х2В8Ф и иглы диаметром 30 мм из стали 5ХЗВЗМФС. Нагрев заготовок производили в вертикальном индукторе до температуры 1350... 1450 °С в проточном аргоне.

Горячепрессованные трубные заготовки имели размер 52×11×1730 мм. Визуальный осмотр полученных трубных заготовок показал отсутствие на их поверхности видимых трещин и разрывов. Ка-

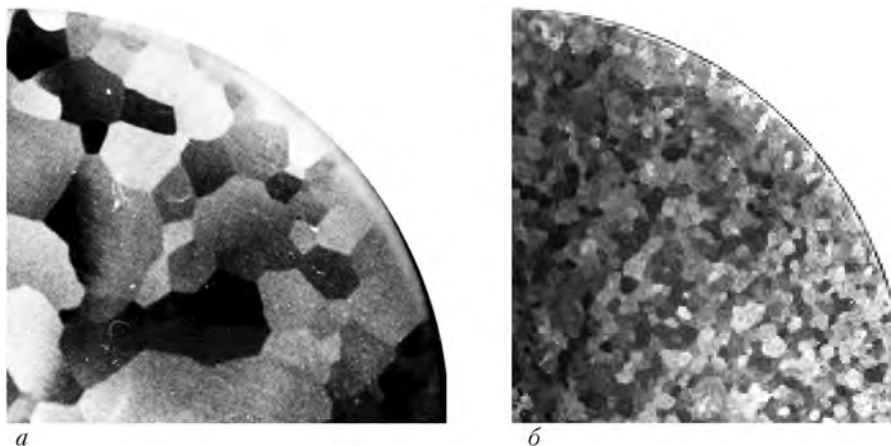


Рис. 1. Макроструктура слитков молибдена МЧВП диаметром 120 мм электронно-лучевой плавки (1/4 поперечного сечения): а — прямой переплав; б — электронно-лучевая плавка с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ)

чество поверхности заготовок соответствует качеству обычных горячедеформированных труб. Анализ микроструктуры металла труб показал, что на фоне зерен, вытянутых вдоль оси, имеются новые рекристаллизованные зерна правильной формы. Степень рекристаллизации достигала примерно 30... 50 % в поле зрения микроскопа.

Механические свойства прессованных труб, определенные при комнатной температуре с помощью растяжения образцов (табл. 1), свидетельствуют о достаточной пластичности металла для последующей деформации. Это обусловлено весьма точно выбранной температурой прессования — выше температуры рекристаллизации деформированного металла  $T_p$ . Кроме того, полученная микроструктура металла труб и их механические свойства позволили исключить перед последующим теплым переделом сложные дорогостоящие операции химической и вакуумной термической обработки. В результате механической обработки заготовки под теплый передел приобрели размер 48×8×(300... 600) мм.

Теплую прокатку подготовленных молибденовых заготовок сечением 48×8 мм и последующих переделных труб осуществляли в клетях станов соответственно ХПТ-32 и ХПТР 8-15, оборудованных устройствами для нагрева как прокатываемых труб, так и технологического инструмента в виде калибров, роликов и оправок [6]. Весь инструмент изготовлен из теплостойких сталей типа Р18 и 3Х2В8.

Необходимость проведения теплой прокатки заключается в регламентировании упрочнения металла труб, обеспечиваемого путем постепенного увеличения степени деформации по проходам пе-

Таблица 1. Механические свойства молибдена

Состояние металла	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Слиток	310... 350	270... 320	2... 8	3... 16
Трубная заготовка	500... 540	400... 470	17... 25	23... 30



Таблица 2. Технологический маршрут изготовления труб из молибдена ЭЛПЕ

Размер труб (диаметр×толщина), мм	Вид деформации	Вытяжка за проход, кратная	Относительная деформация, %	Температура нагрева, °С	
				труб	инструмента
35×5	ХПТ-32	2,13	53	450... 500	200... 250
26,0×2,0	ХПТ-32	2,55	60	450... 500	200... 250
21,6×1,0	ХПТР 8-15	2,85	64	350... 400	250... 300
14×1	ХПТ-32	4,5	77	350... 400	300... 350
12,0×0,7	ХПТР 8-15	1,60	40	350... 400	300... 350
10,0×0,5	ХПТР 8-15	1,66	40	300... 350	300... 350

Примечания: 1. Исследовали заготовки 48×8 мм. 2. Для всех труб проведены холодная и термическая обработки.



Рис. 2. Трубы различного диаметра из молибдена ЭЛПЕ

редельных труб в процессе их переката на меньший размер при соблюдении максимально благоприятных температурно-деформационных условий [6]. С учетом особенностей металлов VIa группы, т. е. наличия температурного перехода из хрупкого в вязкое состояние  $T_x$  (порога хладноломкости), важным фактором являлась необходимость обоснованного выбора температуры дальнейшей тепловой прокатки горячедеформированных передельных труб. С этой целью определяли  $T_x$  по результатам испытания на ударный изгиб образцов типа менаже, отобранных от пресованных труб и имеющих частично рекристаллизованную структуру. Образцы испытывали в интервале температур 50... 450 °С.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что температура перехода молибдена из хрупкого в пластичное состояние находится на уровне 200... 300 °С. Однако, учитывая длительный контакт прокатываемого металла с технологическим инструментом в клетях трубопрокатных станов, где происходит существенный отвод тепла, для тепловой прокатки молибденовых труб рекомендована температура нагрева труб на 150... 200 °С выше порога хладноломкости. Ориентируясь на данные, полученные в работах [7, 8], авторы разработали маршрут изготовления труб и режимы их термической обработки (табл. 2), где каждая последующая позиция маршрута отражает размерную часть трубы готового размера.

По разработанному маршруту изготовили молибденовые трубы диаметром 10... 26 мм и толщиной стенки 0,5... 2,0 мм (рис. 2). Данный сортимент труб может представлять интерес для потенциальных потребителей молибденовой продукции как наиболее востребованный.

### Выводы

1. В результате производственной кооперации отечественных предприятий создана технологическая цепочка производства молибденовых труб.

2. Доказана принципиальная возможность создания в Украине полного производственного цикла получения проката тугоплавких металлов на основе слитков ЭЛПЕ.

3. Металл молибденовых слитков ЭЛПЕ по своим свойствам (содержание примесей, структура, порог хладноломкости) полностью отвечает требованиям к заготовке для производства труб.

1. *Технология* и оборудование для обработки тугоплавких порошковых и композиционных материалов / А. П. Коликов, А. В. Крупин, П. И. Полухин и др. — М.: Металлургия, 1989. — 384 с.
2. *Отрошенко В.* В ракете и лазере, в реакторе и пушке // *Металл.* — 2005. — № 4. — С. 82–94.
3. *Моргунова Н. Н., Клытин Б. А., Бояришинов В. А.* Сплавы молибдена. — М.: Металлургия, 1975. — 392 с.
4. *Зеликман А. Н.* Молибден. — М.: Металлургия, 1970. — 440 с.
5. *Мушегян В. О.* Электронно-лучевая плавка восстановленного концентрата молибдена // *Современ. электрометаллургия.* — 2009. — № 4. — С. 26–28.
6. *Устройство* для газового нагрева очага деформации и технологического инструмента при тепловой прокатке тонкостенных труб из хрупких тугоплавких металлов и сплавов / Н. М. Туренков, М. В. Потапов, М. Н. Туренков и др. // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* — 2007. — № 6. — С. 53–55.
7. *Тенденции* развития технологии производства труб из тугоплавких металлов (ТМ) в Украине / Н. М. Туренков, В. О. Мушегян, В. П. Блощинский и др. // *Материалы конф. «Трубы-Украина-2007»* (Днепропетровск, 23–26 сент. 2007 г.). — Днепропетровск, 2007. — С. 23–26.
8. *Крупин А. В., Соловьев В. Я.* Пластическая деформация тугоплавких металлов. — М.: Металлургия, 1971. — 352 с.

НТЦ «Патон–Армения»

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

ОАО «Завод чистого железа», Ереван,

ГП НИТИ им. Я. Е. Осады, Днепропетровск

Поступила 04.06.2010