



УДК 669.178.58.001.57

ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТУГОПЛАВКИХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ПЛАЗМЕННО-ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ*

В. А. Шаповалов, В. В. Якуша, А. Н. Гниздыло

Приведены результаты исследований тепловых полей крупных монокристаллов вольфрама в условиях плазменно-индукционной зонной плавки (ПИЗП). Показано, что использование схемы ПИЗП с неподвижным плазменно-дуговым источником нагрева позволяет вырастить монокристаллы вольфрама диаметром не более 70 мм. Сканирование плазменно-дугового источника нагрева по радиусу кристалла дает возможность увеличить его диаметр. Даны соотношения мощностей источников плазменно-дугового и индукционного нагрева при выращивании больших кристаллов.

Results of investigations of thermal fields of large single crystals of tungsten in the conditions of plasma-induction zone melting (PIZM) are presented. It is shown that the use of PIZM with fixed plasma-arc heat source allows growing single crystals of tungsten of diameter of not more than 70 mm. Scanning of plasma-arc heat source along the radius of crystal gives an opportunity to increase its diameter. The ratios of capacities of sources of plasma-arc and induction heating in growing large crystals are given.

Ключевые слова: математическая модель; плазменно-индукционная зонная плавка; тепловое поле; внутренние напряжения; крупные монокристаллы тугоплавких металлов.

Плазменно-индукционная зонная плавка благодаря применению двух независимых источников нагрева [1] и возможности тонкого регулирования технологических параметров открывает широкие возможности для управления процессом роста монокристаллов. Однако высокая температура плавления и сложность оборудования делают такой способ получения кристаллов сложным и трудоемким.

Поэтому вопрос оптимизации технологических параметров имеет актуальное значение при разработке технологии ПИЗП как для лабораторных исследований, так и для внедрения ее в производство. Рациональное и эффективное решение такого рода задач, как показывает современная мировая практика, связано с математическим моделированием технологического процесса.

Научный интерес исследований выращивания монокристаллов тугоплавких металлов лежит в плоскости изучения температурного состояния слитка по мере его роста. Полученные знания о рас-

пределении температуры в сечении слитка, о форме и кривизне поверхности границы раздела фаз позволят эффективно влиять на процессы структурообразования монокристаллов и оптимизировать технологию в плане регулирования мощности источников нагрева в заданных пределах.

Ранее в работе [2] на примере математической модели нами были проведены исследования теплового состояния тугоплавких монокристаллов, формирующихся в условиях комбинированного плазменно-индукционного нагрева. Однако выявленные закономерности и диапазоны изменения мощности были получены на образцах небольших размеров (диаметром 20...30 мм). Вопрос о тепловом состоянии крупных кристаллов в этой работе не рассматривался.

Цель настоящей работы состоит в изучении теплового состояния монокристаллов тугоплавких металлов больших размеров (диаметром до 100 мм) и сравнении полученных результатов с ранее выявленными зависимостями на небольших образцах.

Температурное поле монокристаллов исследовали с помощью математической модели на примере вольфрама. Описание математической модели плаз-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Научного технологического центра Украины.

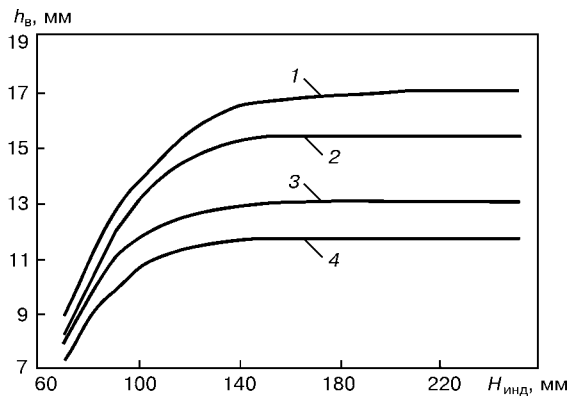


Рис. 1. Зависимость глубины ванны от высоты зоны обогрева

менно-индукционного нагрева, принятая идеализация источников нагрева, начальные и граничные условия уравнения теплопроводности подробно представлены в работах [2, 3]. Диаметры кристаллов изменяли в диапазоне от 20 до 100 мм. Их высота, как и в предшествующей работе [2], составляла не менее трех диаметров. Влияние высоты индуктора на картину температурного поля тем сильнее, чем выше удельная мощность индукционного нагрева. При изучении теплового состояния монокристаллов диаметром 20...30 мм удельную мощность индукционного нагрева изменяли в пределах 100...400 Вт/см². В проводимых исследованиях мы ограничились наиболее реальным значением 300 Вт/см². Влияние высоты индуктора $H_{инд}$ на глубину металлической ванны h_b при различных диаметрах монокристалла показано на рис. 1. Кривые 1–4 отражают данную зависимость для следующих диаметров: 100; 80; 70 и 60 мм. Мощность плазматрона при этом составляла соответственно 49; 33; 25,2 и 19 кВт.

В работе [2] было установлено, что глубина ванны остается постоянной в том случае, когда высота индуктора превышает диаметр слитка в три раза. Из рис. 1 следует, что с увеличением диаметра монокристалла нарушается ранее выявленная для небольших образцов зависимость влияния высоты индуктора (зоны обогрева) на глубину ванны. В исследуемом диапазоне диаметров монокристалла соотношение высота индуктора/диаметр кристалла уменьшается с 3 до 1,5.

Математическая модель, применяемая для исследования температурных полей, по нашему мнению, достаточно точно отражает истинную картину влияния высоты индуктора на глубину ванны. Что касается формы границы раздела фаз, то здесь появляются новые вопросы, связанные с идеализацией плазменного источника нагрева. Тепловой поток, воспринимаемый ванной, условно разделен в модели на две зоны, в пределах которых его мощность постоянна. На практике, при использовании плазменно-дуговых источников нагрева, протяженность зоны с низкой интенсивностью потока, как и зоны нагрева с более высокой интенсивностью (зона пятна дуги) неизвестна.

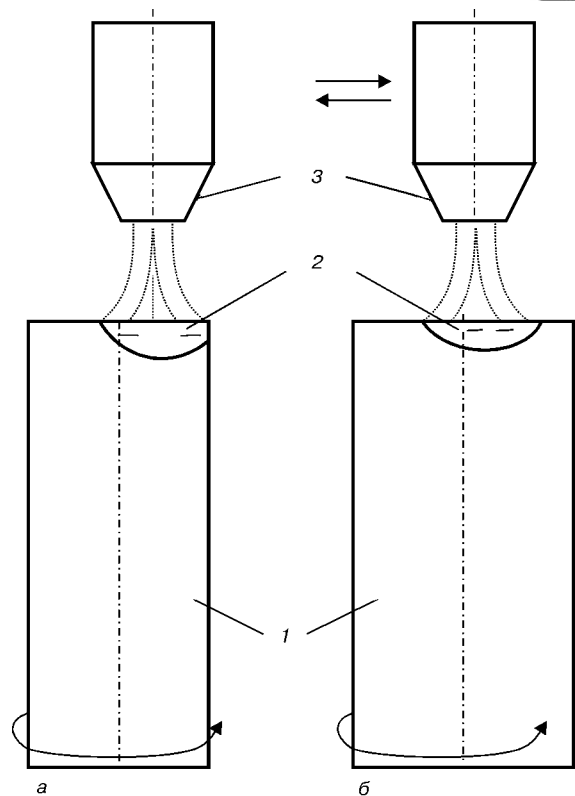


Рис. 2. Схемы ПИЗП для выращивания крупных цилиндрических кристаллов: а — плазматрон неподвижен; б — плазматрон сканирует по радиусу монокристалла; 1 — монокристалл; 2 — металлическая ванна; 3 — плазматрон

С увеличением линейных размеров монокристаллов (диаметра) исследуемая схема комбинированного нагрева не обеспечивает формирования жидкой ванны требуемых размеров. Поэтому выращивание монокристаллов диаметром более 60...70 мм будет проблематично. Косвенно этот вывод следует из рис. 1, так как установленное ранее соотношение между критической высотой индуктора и диаметром монокристалла нарушается после увеличения диаметра последнего выше приведенных значений. Для получения более крупных монокристаллов целесообразно металлическую ванну размером менее диаметра кристалла перемещать по всей формируемой поверхности. Здесь могут быть предложены различные варианты, но в каждом из них плазматрон расположен осесимметрично по отношению к кристаллу. Процесс формирования кристалла проходит постоянно со смещением наращиваемой дорожки или без смещения и сменой направления вращения кристалла после перехода к новому слою.

Использование схемы с неподвижным плазматроном (рис. 2, а) также накладывает ограничения на предельные значения диаметра монокристалла, так как диаметр ванны должен быть больше радиуса монокристалла. При значительном увеличении ванны появляются проблемы, аналогичные тем, которые характерны для осесимметричной схемы. Процесс, схема которого приведена на рис. 2, б, позволяет выращивать монокристаллы практически любого размера, однако на практике он может быть ограничен по мощности высокочастотного генератора

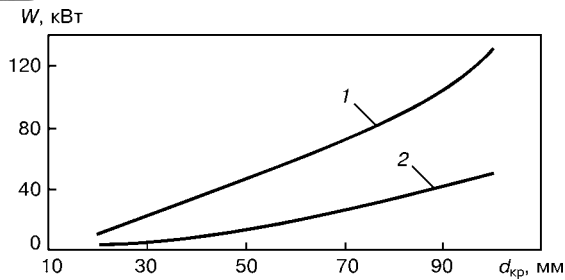


Рис. 3. Изменение мощности тепловых потоков, воспринимаемых монокристаллом, в зависимости от диаметра последнего при совмещенном нагреве плазматроном и индуктором: 1 — индукционный нагрев; 2 — плазменно-дуговой нагрев

ра в случае необходимости обогрева всего монокристалла. Если для поддержания необходимой температуры в нижней части кристалла использовать иной вид обогрева, например радиационный, то при сравнительно небольшой мощности высокочастотного генератора, необходимой только для удержания от проливов металлической ванны и обогрева верхней части монокристалла, можно выращивать кристаллы достаточно большого диаметра.

Проведенные исследования по моделированию тепловых полей позволяют определить соотношение мощностей плазменно-дугового и высокочастотного источников нагрева. На рис. 3 показано изменение мощности W тепловых потоков, воспринимаемых монокристаллом от каждого источника нагрева. При проведении экспериментов ориентировались на следующее. Независимо от диаметра монокристалла $d_{кр}$ высота ванны на его боковой поверхности поддерживалась постоянной. Высота индуктора была минимальной, исходя из условия, что ее дальнейшее увеличение не влияет на глубину ванны по оси кристалла. Как следует из анализа рис. 3, с увеличением диаметра монокристалла соотношение между количеством теплоты, передаваемой ему высокочастотным и плазменно-дуговым нагревателями, снижается от 4,26 до 2,7 при увеличении диаметра кристалла от 20 до 100 мм. В основе полученного соотношения лежит масштабный фактор.

Соотношение является оценочным и изменяется по мере увеличения высоты монокристалла, так как при этом необходимо повышать удельную мощность нагрева $W_{уд}$ для поддержания требуемой температуры в нижней части кристалла. Нами было установлено, что удельная мощность подогрева нижней части кристалла при использовании двухсекционного индуктора [2] не может быть меньше 55 Вт/см² (рис. 4), так как для условий релаксации внутренних напряжений температура подогрева нижней части кристалла должна быть более 0,5 $T_{пл}$ [4] (для вольфрама это выше 1880 К).

Таким образом, при минимизации мощности индукционного нагревателя суммарное значение генерируемой им мощности при достижении кристаллом длины, равной 10...40 диаметрам, может вырасти в 2,5–2,8 раза. Поэтому реальное соотношение мощностей источников индукционного и плазменно-дугового нагрева для достаточно длинных кристаллов будет изменяться в пределах 7:1...10:1. Меньшее

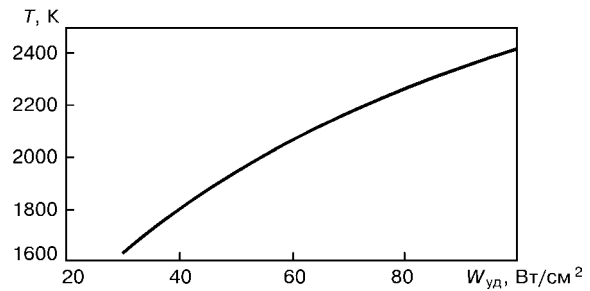


Рис. 4. Зависимость температуры монокристалла вольфрама от удельной мощности нагрева

значение для более крупных кристаллов, а большее — для кристаллов малых диаметров.

Из приведенных результатов исследований можно сделать вывод о том, что существенные различия картин температурного поля и соотношения мощностей источников плазменно-дугового и индукционного нагрева для крупных монокристаллов тугоплавких металлов и кристаллов небольших размеров обусловлены, главным образом, масштабным фактором, учитывающим теплофизические характеристики материала, его объем и геометрию теплоотдающей поверхности.

При разработке технологии получения крупных монокристаллов тугоплавких металлов (диаметром более 60...70 мм) целесообразно использовать плазменный источник нагрева небольшой единичной мощности, необходимой для наведения ванны жидкого металла размером менее диаметра выращиваемого кристалла, и перемещать ее по поверхности формирования заданным образом. При этом следует использовать для выращивания невысоких кристаллов, с целью поддержания стабильных тепловых условий роста, индукционный обогрев по всей высоте формируемого слитка. В случае выращивания достаточно крупных кристаллов следует применять нагреватель, состоящий из двух секций. Верхняя индукционная секция будет выполнять функции удержания ванны жидкого металла от проливов, стабилизации геометрии фронта кристаллизации, а также снятия теплового удара от факела плазменной дуги в зоне кристалла, граничащей с областью раздела твердой и жидкой фаз. Функции второй секции нагревателя (индукционной или радиационной) будут состоять в поддержании необходимых тепловых условий для релаксации внутренних напряжений в нижней части слитка.

1. *Выращивание тугоплавких металлических монокристаллов* // В. А. Шаповалов, М. Л. Жадкевич, Г. Ф. Торхов и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 4. — С. 21–29.
2. *Шаповалов В. А., Якуша В. В., Гниздыло А. Н.* Тепловое поле монокристалла при комбинированном нагреве // Современная металлургия. — 2003. — № 1. — С. 22–24.
3. *Шаповалов В. А.* Тепловое поле монокристалла вольфрама при плазменно-индукционной зонной плавке // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 4. — С. 30–32.
4. *Золотаревский В. С.* Механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1983. — 352 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 07.05.2003