



УДК 669.178.58.001.5

## ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ МОНОКРИСТАЛЛА ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРЕВЕ\*

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

Исследованы тепловые поля монокристаллов вольфрама в условиях плазменно-индукционной зонной плавки (ПИЗП) на основе математической модели. Получены зависимости изменения глубины ванны и кривизны поверхности раздела твердой и жидкой фаз, показывающие эффективность влияния комбинированного нагрева на формирование структуры монокристаллов. Показано, что для управления тепловым полем при выращивании монокристаллов тугоплавких металлов способом ПИЗП необходимо использовать двухсекционный индуктор.

The thermal fields of a tungsten single crystals were studied in the conditions of plasma-induction zone melting (PIZM) using a mathematical model. Relationships of change in pool depth and curvature of solid-liquid phase interface were obtained indicating the efficiency of effect of a combined heating on the formation of structure of single crystals. It is shown that it is necessary to use a two-section inductor for thermal field control in growing single crystals of refractory metals.

**Ключевые слова:** вольфрам; монокристалл; плазменно-индукционная зонная плавка; тепловое поле; математическая модель

Способ плазменно-индукционной зонной плавки (ПИЗП) [1] предполагает применение двух независимых источников нагрева, что позволяет более гибко управлять температурным полем кристалла и металлической ванны. В отличие от электронно-лучевой зонной и плазменно-дуговой капельной плавки при ПИЗП появляется возможность изменять кривизну поверхности раздела фаз и направление роста кристаллов. Поверхность раздела фаз в идеальном случае должна вырождаться в плоскость, а в каждом конкретном случае она может быть вогнутой, выпуклой или иметь более сложную форму.

Исследование теплового поля монокристалла в процессе ПИЗП необходимо для прогнозирования качества выращиваемых кристаллов, а изучив градиенты температур, форму и кривизну поверхности раздела твердой и жидкой фаз, можно также определить оптимальные соотношения энергетических параметров источников нагрева.

Картину тепловых полей исследовали на примере монокристаллов вольфрама с помощью математической модели, которая подробно описана в работе [2]. Принятые идеализации источников нагрева, начальные и граничные условия уравнения теплопроводности являются такими же, как и в указанной работе.

В процессе плазменно-индукционного выращивания монокристаллов максимальное значение силы тока ограничено 2 кА. Использовать плазменные источники силой тока выше 2 кА нецелесообразно в связи с тем, что электродинамическое воздействие тока на ванну и ее локальный перегрев приведут к интенсификации перемешивания жидкого металла и его разбрызгиванию.

Математическая модель позволяет задавать любые значения силы тока (мощности) плазменной дуги, но практическая ценность полученных результатов для диапазона более 2 кА будет снижаться в связи с тем, что в модели не учитываются электродинамическое воздействие тока на металлическую ванну и конвективный теплоперенос в ее объеме.

Геометрические размеры индукционного нагревателя также можно изменять в зависимости от диаметра монокристалла, но плотность энергии или удельную поверхностную мощность поддерживать постоянной.

В исследованиях теплового поля немаловажным моментом является выбор линейных размеров монокристалла. При варьировании диаметра монокристалла его длина  $l$  должна быть больше критической. Чем длиннее модельный монокристалл, тем ближе значения температур в зоне, прилегающей к границе раздела фаз, к тем, которые наблюдаются в стационарных условиях. Однако увеличение мощ-

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Научного технологического центра Украины.

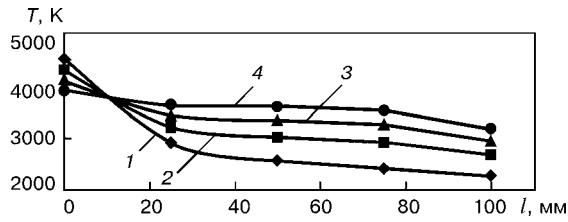


Рис. 1. Распределение температуры вдоль оси монокристалла вольфрама диаметром 30 мм при различных значениях удельной мощности индуктора: 1 – 100 Вт/см<sup>2</sup>; 2 – 200 Вт/см<sup>2</sup>; 3 – 300 Вт/см<sup>2</sup>; 4 – 400 Вт/см<sup>2</sup> (высота ванны на боковой поверхности кристалла 2,33 мм)

ности источника нагрева при различных способах выращивания монокристалла (ЭЛЗП, ПДЗП и ПИЗП) не влияет существенно на изменение температуры при длине монокристалла, превышающей три его диаметра [2]. Учитывая данное обстоятельство, а также затраты на эксперимент, связанные с длительностью процесса, ограниченной мощностью вычислительной машины, целесообразно длину монокристалла выбирать равной 3–5 его диаметрам.

Прежде чем приступить к изучению тепловых полей, формирующихся в монокристалле под воздействием двух источников нагрева и изменяющихся в зависимости от геометрических параметров источника индукционного нагрева, рассмотрим влияние удельной мощности индукционного нагрева  $W_{инд}$  на распределение температур в монокристалле (рис. 1).

Из рисунка видно, что наибольший градиент температур сохраняется в верхней части монокристалла. Градиент тем выше, чем ниже удельная мощность индукционного подогрева. При длине монокристалла, равной примерно его диаметру, значение температурного градиента стремиться к нулю. При увеличении мощности индукционного подогрева в четыре раза температурный градиент снижается в 6–7 раз. Поэтому при решении проблемы минимизации температурного градиента в теле монокристалла необходимо увеличивать удельную мощность индукционного подогрева.

Температурный градиент в средней части монокристалла минимальный и не зависит от удельной мощности подогрева. При этом абсолютное значение температур растет с увеличением мощности подогрева.

В нижней части монокристалла там, где расположен затравочный кристалл, температурный градиент более высокий, чем в средней части независимо от удельной мощности подогрева. Это объясняется так называемым краевым эффектом, который связан с эффектом индуктора и изменением

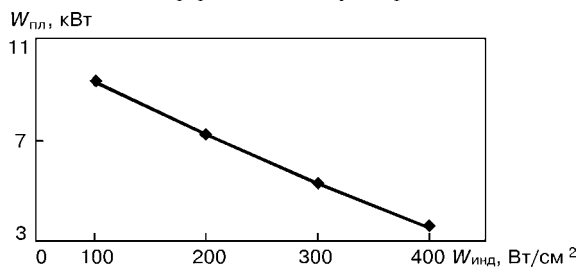


Рис. 2. Зависимость мощности плазменного источника от удельной мощности индукционного источника при выращивании монокристалла диаметром 30 мм

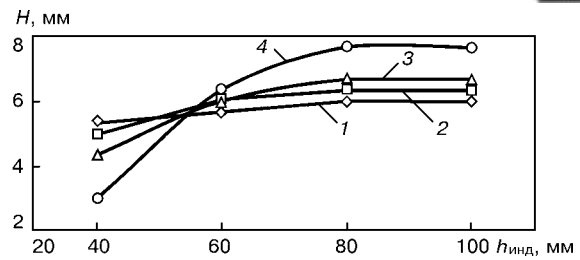


Рис. 3. Зависимость глубины ванны по оси кристалла от высоты индуктора при различных значениях удельной мощности индуктора: 1 – 100 Вт/см<sup>2</sup>; 2 – 200 Вт/см<sup>2</sup>; 3 – 300 Вт/см<sup>2</sup>; 4 – 400 Вт/см<sup>2</sup> (монокристалл вольфрама диаметром 30 мм, высотой 100 мм)

режима теплоотдачи на краю монокристалла. При повышении удельной мощности подогрева в четыре раза температурный градиент снижается в три раза. Изменение температурного градиента в зависимости от мощности индукционного подогрева, при прочих равных условиях, в нижней части монокристалла по сравнению с верхней его частью, где теплота поступает от двух источников, меньше в два раза.

В состоянии, когда высота индуктора  $h_{инд}$  и длина монокристалла равны, целесообразно оценить изменение мощности плазменного источника  $W_{пл}$  нагрева в зависимости от удельной мощности индукционного источника нагрева. Рис. 2 отражает эту зависимость. Из рисунка следует, что мощность плазменно-дугового источника изменяется обратно пропорционально мощности индукционного источника. При увеличении мощности индукционного нагрева в четыре раза мощность плазменно-дугового нагрева снижается в три раза. Суммарная мощность не остается постоянной, а возрастает. Это негативно сказывается на технико-экономических показателях процесса, но позволяет управлять кривизной поверхности раздела жидкой и твердой фаз и тем самым влиять на формирование структуры монокристалла.

Влияние высоты индуктора при фиксированной мощности источника плазменно-дугового нагрева на изменение глубины  $H$  металлической ванны показано на рис. 3. Как видно, чем выше удельная мощность индукционного подогрева, тем более чувствительна глубина ванны к изменению высоты индук-

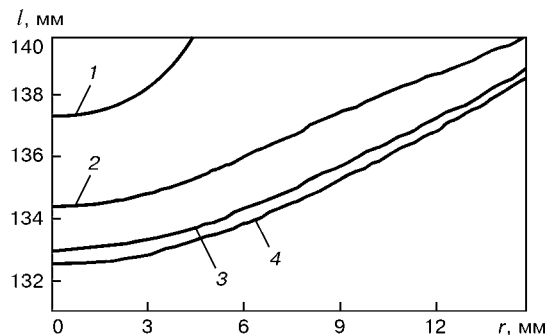


Рис. 4. Изменение глубины ванны и кривизны поверхности раздела твердой и жидкой фаз при различных значениях высоты индуктора: 1 – 40 мм; 2 – 60 мм; 3 – 80 мм; 4 – 100 мм (монокристалл вольфрама диаметром 30 мм. Удельная мощность индуктора 400 Вт/см<sup>2</sup>, мощность плазменно-дугового источника 3,57 кВт)

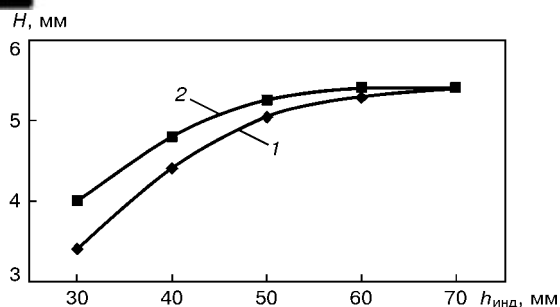


Рис. 5. Влияние высоты индуктора на глубину ванны: 1 — односекционный индуктор; 2 — двухсекционный (монокристалл вольфрама диаметром 20 мм, высотой 100 мм. Удельная мощность индуктора 300 Вт/см<sup>2</sup>, мощность плазменно-дугового источника 2,66 кВт)

тора. Так, при повышении удельной мощности в четыре раза глубина ванны по оси кристалла увеличится в 7,5–8 раз. Глубина ванны будет оставаться постоянной в том случае, когда высота индуктора превышает ее в 2,7 раза. Дальнейшее увеличение высоты индуктора не сказывается на температурном поле в области границы раздела жидкой и твердой фаз и не влияет на кривизну ее поверхности, а следовательно, на формирование монокристаллической структуры (рис. 4).

С увеличением высоты индуктора изменяется глубина ванны не только вдоль оси кристалла, но и на его боковой поверхности, при этом глубина ванны вдоль оси кристалла растет быстрее. Из этого следует, что для ведения процесса в режиме, близком к оптимальному, целесообразно оптимизировать высоту индуктора, возможно изменив его конструкцию.

Исходя из результатов предварительных исследований и технологических соображений, было предложено использовать двухсекционный индуктор. Секции могут состоять из нескольких однотипных катушек, подключенных параллельно. Целесообразность использования такого индуктора показывают результаты исследования картин теплового поля монокристаллов, формирующихся под воздействием односекционного и двухсекционного индукторов. В эксперименте общая высота индуктора не изменялась и равнялась длине кристалла. Однако соотношение высоты верхней и нижней секций изменялось. Как видно из рис. 5, двухсекционный индуктор обеспечивает большую глубину ванны. Однако в отличие от односекционного индуктора, с уменьшением высоты которого снижается его влияние на температуру нижней части монокристалла, при использовании двухсекционного индуктора температура нижней части монокристалла остается неизменной после уменьшения высоты верхней секции ниже критической (рис. 6).

Процессы формирования структуры монокристалла не заканчиваются в области межфазной границы, а продолжают в твердой фазе. Поэтому управление температурой этой части кристалла

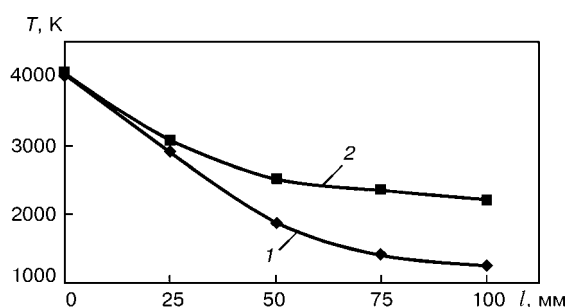


Рис. 6. Распределение температуры вдоль оси монокристалла вольфрама диаметром 20 мм и высотой 100 мм при использовании односекционного (1) и двухсекционного (2) индукторов (удельная мощность односекционного индуктора 300 Вт/см<sup>2</sup>, двухсекционного: верхней секции 300 и нижней 84 Вт/см<sup>2</sup>. Высота верхней секции 30 мм)

крайне необходимо. Причиной, из-за которой структура монокристалла претерпевает изменения в твердой фазе, являются термические напряжения, возникающие под воздействием градиента температур. Если температура монокристалла превышает половину значения абсолютной температуры плавления [3], напряжения релаксируют и не влияют на процессы преобразования структуры в твердой фазе. При выращивании монокристалла вольфрама температура индукционного подогрева нижней его части должна быть выше 1880 К, иначе она не обеспечивает полного отжига выращиваемого кристалла в процессе зонной плавки. Но указанная температура характерна для режима теплой деформации, а это и есть состояние, в котором дислокации частично аннигилируют. Поэтому нижняя секция индуктора должна обеспечивать эту температуру. Из рис. 6 видно, что двухсекционный индуктор создает необходимую температуру подогрева кристалла в нижней его части.

Таким образом, проведенные исследования наглядно демонстрируют возможность управления глубиной ванны и кривизной поверхности раздела твердой и жидкой фаз путем изменения мощности плазменного и индукционного источников тепла. Использование двухсекционного индуктора позволяет не только управлять температурным полем в области ванны, но и создавать в зоне затравочного кристалла условия для релаксации термических напряжений.

1. Исследование процесса выращивания плоских монокристаллов вольфрама и молибдена // В. А. Шаповалов, А. А. Коваленко, Ю. В. Латаш и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — № 1. — С. 79–82.
2. Шаповалов В. А. Тепловое поле монокристалла вольфрама при плазменно-индукционной зонной плавке // Там же. — 2002. — № 4. — С. 30–32.
3. Золотаревский В. С. Механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1983. — 352 с.

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

Поступила 30.01.2003