



УДК 669.187.58.51.001.57

ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ МОНОКРИСТАЛЛА ВОЛЬФРАМА ПРИ ПЛАЗМЕННО-ИНДУКЦИОННОЙ ЗОННОЙ ПЛАВКЕ

В. А. Шаповалов

Выбрана математическая модель для исследования тепловых полей монокристаллов вольфрама при нагреве различными источниками: плазменно-дуговым, высокочастотным и комбинированным — плазменным+высокочастотным. Показано, что комбинированный нагрев позволяет управлять формой поверхности раздела фаз. В определенных условиях поверхность может стать практически плоской. Наибольшая эффективность управления тепловым полем достигается, когда весь кристалл обогревается индуктором.

Mathematical model has been selected for study the thermal fields of single crystals during heating with different sources: plasma-arc, high-frequency and combined plasma + high-frequency. It is shown that the combined heating makes it possible to control the curvature of interface surface. Under certain conditions the surface can become almost plane. The highest efficiency of the thermal field control is attained when all the crystal is heated by an inductor.

Ключевые слова: вольфрам; монокристалл; плазменно-индукционный нагрев; тепловое поле; моделирование

Способ плазменно-индукционной зонной плавки (ПИЗП) выращивания крупных ориентированных

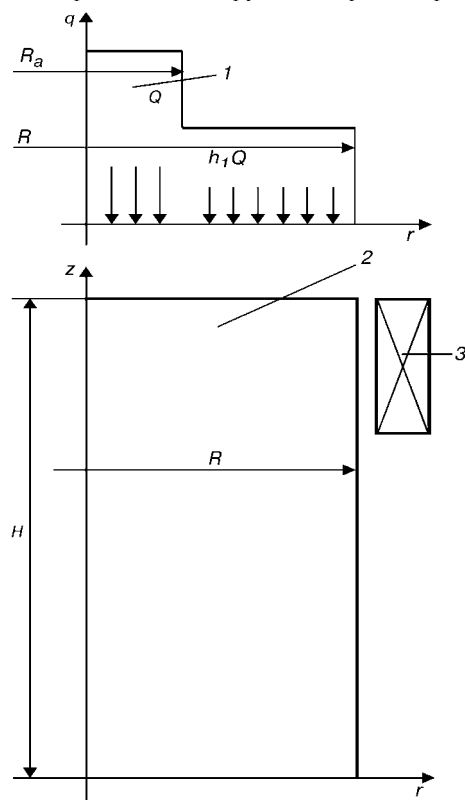


Рис. 1. Схема комбинированного нагрева монокристалла: 1 — тепловой поток от плазматрона; 2 — монокристалл; 3 — катушка индуктора; R_a — радиус пятна дуги; R — радиус монокристалла; h_1 — нормирующий множитель; H — высота монокристалла; Q — удельный тепловой поток в пятне дуги

© В. А. ШАПОВАЛОВ, 2002

монокристаллов вольфрама и молибдена, описанный в работах [1–3], имеет неоспоримые преимущества перед другими известными способами. С одной стороны, это использование электромагнитного поля для удержания металлической ванны от проливов, а с другой, создание требуемого теплового поля в растущем кристалле. В период разработки способа вопрос о подогреве монокристалла рассматривался, но реально определить удельную и общую мощность подогрева было сложно, поскольку опыта реализации подобных гибридных процессов не было. Поэтому для создания реального процесса необходимо оценить влияние каждого источника нагрева на тепловое состояние монокристалла. Для решения этой задачи с помощью математической модели рассмотрим конкретную схему плазменно-индукционного способа зонной плавки, применяемого для выращивания монокристаллов. Характерной особенностью способа является то, что плазматрон, индуктор и монокристалл соосны и ось располагается вертикально. Индуктор может содержать любое количество витков, но зона его воздействия на монокристалл ограничена высотой, не превышающей диаметр последнего. На рис. 1 представлена схема процесса ПИЗП.

Моделирование будет основываться на решении нестационарного двумерного уравнения теплопроводности в координатах (r, z) [4]:

$$\rho c_V \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где τ — текущее время; T — текущая температура; $\rho = \rho(T)$ — плотность металла; $c_V = c_V(T)$ — изохорная теплоемкость; $\lambda = \lambda(T)$ — коэффициент

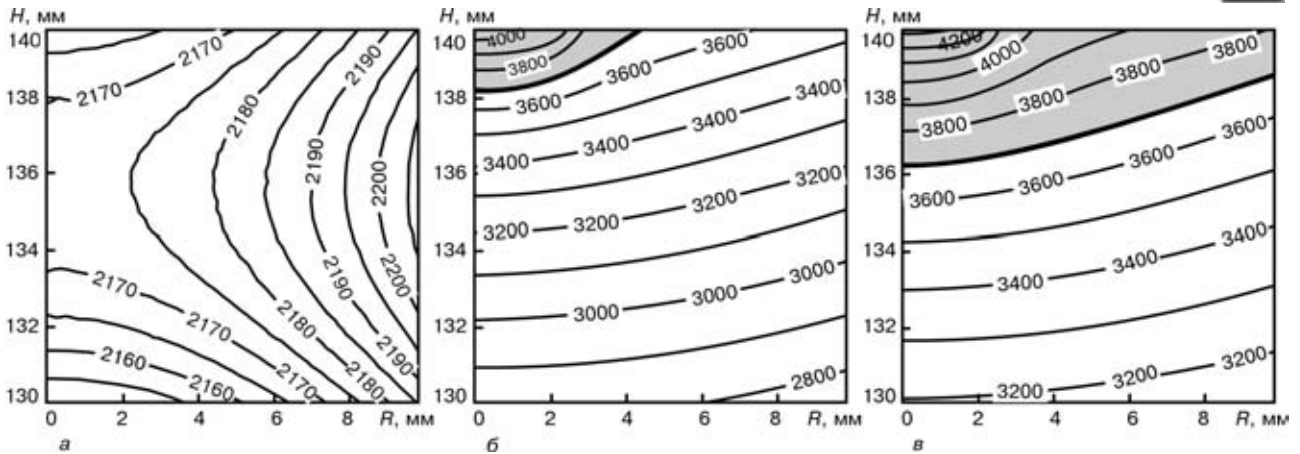


Рис. 2. Картина теплового поля в верхней части монокристалла при нагреве различными источниками: а — индуктором; б — плазмотроном; в — индуктором + плазмотроном

теплопроводности металла. Решение уравнения теплопроводности невозможно без определенности в описании граничных и начальных условий [5].

Начальное условие:

$$T|_{\tau=0} = T_0, \quad (2)$$

где T_0 — температура окружающей среды, с которой тело находится в контакте.

Граничные условия:

на оси кристалла всегда выполняется условие

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (3)$$

которое следует из симметрии задачи;

на всей поверхности S (кроме той, которая покрыта плазмой) потери тепла излучением Q_l и конвекцией Q_c связаны следующей зависимостью:

$$-\lambda_a \nabla T \Big|_S = Q_l + Q_c, \quad (4)$$

где $a = m, h$ — состояние металла (m — расплав, h — твердое тело); $T|_S$ — температура в любой точке на поверхности цилиндра. Градиент температур у поверхности (внутри) металла определяется вдоль \vec{n} единичного вектора, направленного нормально (наружу) к поверхности; $Q_l = \sigma (\eta_s T^4|_S - T^4)$, здесь σ — постоянная Стефана — Больцмана; η_s — коэффициент серости поверхности; $Q_c = k_n (T_S - T_0)$, где k_n — коэффициент внешней теплопроводности, который в соответствии с законом Ньютона является сугубо эмпирическим;

на поверхности S_i энергия, поступающая от индуктора, превращается в тепловой поток Q_i в единицу времени:

$$-\lambda_a \nabla T \Big|_S = Q_l + Q_c - Q_i. \quad (5)$$

Знак минус перед Q_i означает, что поток направлен внутрь тела (в обратном направлении по отношению к \vec{n}).

При плазменно-дуговом нагреве для определения теплообмена в зоне действия дуги будем исходить из следующего:

тепловой поток от плазменно-дугового источника поступает в монокристалл через его верхний торец. Этот тепловой поток является результирующим и учитывает теплопередачу от дуги за счет конвекции и излучения, теплоту в анодном пятне дуги, теплоту, идущую на парообразование, теплоту, выделившуюся при конденсации металлического пара на поверхности ванны, и потери теплоты металлической ванной в рабочее пространство печи;

распределение плотности теплового потока на торце монокристалла, обогреваемого плазмотроном, задается уравнением

$$\begin{cases} q = Q; & r = 0, R_a; \\ q = h_1 Q; & r = R_a, R_l' \end{cases} \quad (6)$$

где q — удельный тепловой поток, поступающий в металл в зоне нагрева дугой; Q — удельный тепловой поток, поступающий в металл в зоне пятна дуги; h_1 — нормирующий множитель; R_a — радиус пятна дуги, R_l — радиус металлической ванны;

на поверхности, на которую опирается пятно дуги в области S_a $T|_{S_a} = T_b$, где T_b — температура кипения;

на поверхности фазового перехода G_m выполняется равенство

$$-\lambda_h \nabla T \Big|_{G_{m+h}} + \lambda_l \nabla T \Big|_{G_{m+l}} = -E_m v_m, \quad (7)$$

где λ_l, λ_h — коэффициенты теплопроводности жидкой и твердой фаз соответственно; E_m — энергия плавления; v_m — скорость перемещения границы.

Сочетание двух источников нагрева изменяет картину теплопередачи в монокристалле в целом. Учитывая, что каждый из источников формирует в монокристалле свои тепловые поля с максимальным выделением энергии на разных участках, можно предположить, что такая комбинация источников позволит гибко управлять формой границы между твердой и жидкой фазами. Форма границы — поверхность фронта кристаллизации — будет изменяться от выпуклой до вогнутой. Форма поверхности будет зависеть, с одной стороны, от соотношения

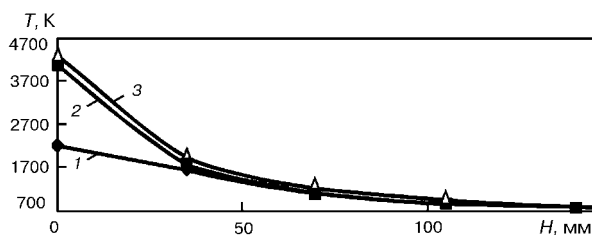


Рис. 3. Распределение температуры вдоль оси монокристалла при нагреве различными источниками: 1 — индуктором; 2 — плазмотроном; 3 — индуктором+плазмотроном

мощностей источников, а с другой, от условий теплообмена монокристалла с окружающей средой.

Тепловые процессы будем исследовать на модели, соответствующей реальному монокристаллу вольфрама диаметром 20 мм и длиной более 100 мм. В силу ряда ограничений модель даст только приблизительную оценку реального процесса. В первую очередь эти ограничения связаны с соответствием формы модели форме реального кристалла. У реального кристалла края металлической ванны закруглены силами поверхностного натяжения, а у модели края ванны имеют угол. Радиус и угол поразному влияют на теплообменные процессы в этой области. Микрообласть, заключенная в углу, более интенсивно отдает тепло в окружающую среду. Это сказывается на глубине ванны и форме границы раздела фаз. Все же использование даже несовершенной модели позволяет изучить влияние каждого источника нагрева на формирование межфазной границы (субструктуры кристалла).

Для изучения влияния каждого источника нагрева на распределение температур в монокристалле рассмотрим картину тепловых полей. На рис. 2, а, б показаны тепловые поля при нагреве кристалла одним из источников соответственно индуктором и плазмотроном. Мощность каждого из источников такая же, как и при комбинированном нагреве. Поэтому сформировать ванну одним плазмотроном или расплавить вольфрам только индуктором проблематично, но создать определенное температурное поле возможно. Наиболее сильно нагревается боковая поверхность монокристалла в зоне действия индуктора. Температуру нагрева можно регулировать. Плазмотрон более интенсивно греет торцевую поверхность кристалла, расплавляет металл, но ванна образуется небольших размеров, а форма межфазной поверхности искривлена. Создаются неблагоприятные условия для формирования субструктуры монокристалла. На рис. 2, в показана тепловая картина верхней части монокристалла при комбиниро-

ванном нагреве. Поверхность границы раздела фаз все более приближается к плоской. Наложение тепловых полей двух источников нагрева создает идеальные условия для формирования структуры. Однако это один аспект проблемы формирования теплового поля растущего кристалла. Второй — распределение температуры вдоль оси роста монокристалла, о чем дает наглядное представление рис. 3. Кривые соответствуют различным условиям нагрева: индуктор нагревает верхнюю часть монокристалла, плазмотрон нагревает кристалл с торца, а при использовании комбинированного источника — плазмотрон нагревает монокристалл с торца, а индуктор его боковую поверхность.

Из рисунка следует, что влияние комбинированного нагрева на ту часть кристалла, которая находится ближе к его нижнему торцу, незначительно отличается от варианта нагрева, который осуществляется одним источником — индуктором или плазмотроном. Распределение температуры в монокристалле не зависит от вида нагрева при расстоянии от верхнего торца больше 2,5...3,0 диаметров монокристалла. Из полученных результатов следует, что для эффективного управления температурным полем монокристалла необходимо использовать индуктор, зона нагрева которого охватывает всю боковую поверхность монокристалла.

Таким образом, комбинированный нагрев с помощью плазмотрона и индуктора позволяет изменять форму поверхности раздела жидкой и твердой фаз. Управление температурным полем монокристалла может быть эффективным, если использовать индуктор, обогревающий всю боковую поверхность кристалла.

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. *Крутые* плоские монокристаллы вольфрама и молибдена и способы их получения / В. А. Шаповалов, Ю. В. Латаш, В. В. Жолудь, С. Т. Боримская // Сб. докл. 7-го Международного симпозиума «Чистые металлы». — Харьков. — 2001. — С. 39–42.
3. *Ориентированные* монокристаллы вольфрама: получение, исследование и применение / В. А. Шаповалов, Ю. В. Латаш, С. Т. Боримская, В. В. Жолудь // Металлы. — 2001. — № 1. — С. 60–64.
4. *Теплопередача*: Учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.
5. *Самарский А. А.* Введение в численные методы. — М.: Наука, 1987. — 288 с.

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

Поступила 25.10.2002