

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЕННО-ИНДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

А. Н. Гниздыло¹, В. В. Якуша¹, В. А. Шаповалов¹,
О. В. Карускевич¹, Ю. А. Никитенко¹, Н. В. Козуб²

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского».

03056, г. Киев, просп. Победы, 37

Разработана и реализована математическая модель плазменно-индукционный плавки при совместном решении электромагнитной и тепловой задач в соответствии с технологической схемой процесса выращивания монокристаллов вольфрама и выполнена коррекция ее параметров на основании данных натурального эксперимента. Получены данные с достаточной для практических целей точностью характеристик тепловой картины в виде полей температур и градиентов, в том числе и в высокотемпературной области монокристалла вольфрама, что имеет большое значение в связи с существующими сложностями их получения другими способами измерения. Разработана методика математического моделирования, которая позволяет проводить прогнозирование оптимальных технологических параметров на основе анализа тепловой картины при изменении в широком диапазоне параметров геометрии монокристаллического слитка и конструкции электромагнитной системы. Даны рекомендации для разработки новых технологий, направленных на расширение сортамента тугоплавких монокристаллов при обеспечении высокой производительности и экономической эффективности. Библиогр. 12, ил. 6.

Ключевые слова: математическая модель; моделирование; плазменно-индукционный способ; профилированный монокристалл вольфрама; аддитивная технология; температурное поле

В последнее время отмечается повышенный интерес к использованию монокристаллов тугоплавких металлов в новейших технологиях в качестве материалов конструкционного и функционального назначения. Такая ситуация стимулирует развитие технологий их выращивания. На сегодня существует ограниченное количество способов, которыми получают монокристаллы тугоплавких металлов. К наиболее перспективным из них относится способ плазменно-индукционный плавки (ПИП), однако его эффективное применение пока сдерживается из-за низкой производительности существующей технологии и ограниченного сортамента выпускаемой монокристаллической продукции.

Работа над созданием более эффективных технологий получения монокристаллов тугоплавких металлов разного профиля на основе способа ПИП, в первую очередь, связана с обеспечением оптимальных тепловых условий выращивания на основании анализа тепловых полей, формирующихся в кристаллах [1]. Для определения картин тепловых полей монокристаллов в процессе вы-

ращивания применяют как физические способы непосредственного измерения температуры, так и способы математического моделирования. В условиях совмещенного плазменно-индукционного нагрева экспериментальное определение теплового поля в кристаллах тугоплавких металлов без преувеличения связано с большими техническими сложностями и повышенными материальными затратами.

Данная работа выполнена с целью разработки математической модели процесса ПИП на базе численных способов для определения картин тепловых полей монокристаллов заданной геометрии в зависимости от технологических параметров плазменного и индукционного нагрева. Для коррекции параметров математической модели и повышения ее достоверности использованы результаты экспериментального определения температур в плоском монокристалле вольфрама.

Ранее были проведены работы, связанные с моделированием плазменно-индукционного процесса, где математическая модель реализована на основе уравнения теплопроводности, а индук-

ционный и плазменный нагревы заданы в виде соответствующих граничных условий [2, 3]. Эта модель не учитывала электромагнитные особенности индукционной системы (взаимное влияние параллельных витков индуктора, влияние холодной стенки на передачу энергии электромагнитного поля к слитку, выделение мощности индукционного нагрева в слитке от характеристик теплового поля слитка). Для более детального исследования ПИП существующая модель получила развитие в результате ее объединения с системой уравнений электромагнитного поля.

Основные теоретические положения. Исходные уравнения математической модели имеют вид:

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}_{\text{полн}}, \quad (1)$$

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\text{div} \mathbf{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\text{div} \mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

$$c_p(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda(T)\text{grad}T) = \text{div}[\mathbf{E}\mathbf{H}], \quad (5)$$

где \mathbf{E} и \mathbf{H} — векторы напряженностей электрического и магнитного полей; \mathbf{D} — вектор электрической индукции; \mathbf{B} — вектор магнитной индукции; ρ — объемная плотность свободных электрических зарядов; $\mathbf{J}_{\text{полн}}$ — вектор плотности полного тока; $C_p(T)$, $\gamma(T)$, $\lambda(T)$ — удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла соответственно (в нелинейной постановке функции аппроксимировались кубическими сплайнами); объемная плотность внутренних источников тепла, возбуждаемых индуцируемыми в слитке токами, определяется дивергенцией вектора Умова–Пойнтинга $\text{div}[\mathbf{E}\mathbf{H}]$; $T = T(x, y, z, t)$ — температурное поле слитка; t — время.

С практической точки зрения часто выгодно решать одно уравнение, но уже второго порядка, что позволяет уменьшить количество неизвестных в уравнении. Поэтому принимая во внимание особенности электромагнитной системы ПИП (квазистационарность и гармонический характер электромагнитного поля, высокую проводимость материалов) и материальные уравнения, учитывающие индивидуальные свойства среды, базовые уравнения (1–5) при использовании векторного магнитного потенциала \mathbf{A} и скалярного электрического потенциала V примут вид [4–6]:

$$\text{rot}(\mu^{-1}\text{rot} \dot{\mathbf{A}}) + (i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)\dot{\mathbf{A}} + (\sigma - i\omega\varepsilon)\text{grad}V = 0, \quad (6)$$

$$\text{rot}(\mu^{-1}\text{rot} \dot{\mathbf{A}}) = \dot{\mathbf{J}}_s, \quad (7)$$

$$c_p(T)\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda(T)\text{grad}T) = \text{div}[\dot{\mathbf{E}}\dot{\mathbf{H}}]. \quad (8)$$

Уравнения (6, 7) относятся к проводящим и непроводящим областям соответственно, где μ — относительная магнитная проницаемость; ε — относительная диэлектрическая проницаемость, $\sigma = \sigma(T)$ — удельная проводимость (в нелинейной постановке функция аппроксимировалась кубическим сплайном).

На рис. 1 приведено графическое представление модели. Уравнения (6, 7) рассматривали в области $\Omega_{\text{mag}} = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \Omega_4 \cup \Omega_5 \cup \Omega_6$, занимаемой поддоном Ω_1 , подставкой Ω_2 , слитком Ω_3 , секционной стенкой Ω_4 , индуктором Ω_5 , газом Ω_6 , где

$$\Omega_3 = \sum_{i=1}^m \Omega_3^{i,j}, \quad i — \text{порядковый номер секции от}$$

верхнего торца; j — количество витков в однослойной секции; m — количество секций, а уравнение (8) в области $\Omega_{\text{therm}} = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3$.

Исходные данные электромагнитной задачи. В качестве исходных данных электромагнитной задачи использовали электрические свойства материалов $\sigma_i(\Omega_i, T)$, $\mu_i(\Omega_i)$, $\varepsilon_i(\Omega_i)$, где $i = 1, 4, 5$ — индекс, соответствующий материалу в модели для меди ($\Omega_1, \Omega_4, \Omega_5$), $i = 2, 3$ для вольфрама (Ω_2, Ω_3), $i = 6$ для газа (Ω_6). Параметры питающей электрической сети задавали в виде амплитудного напряжения (В) и частоты (Гц) при схеме параллельного подключения секций индуктора. Электромагнит-

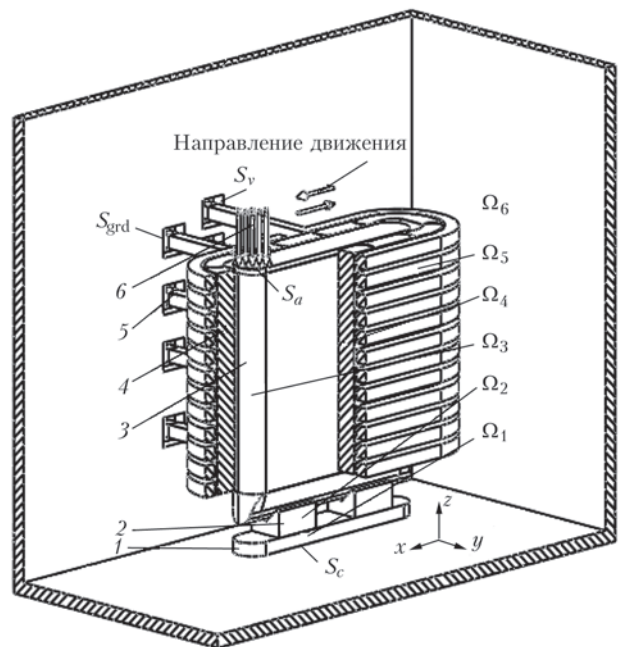


Рис. 1. Схема математической модели процесса выращивания монокристаллов в форме пластин: 1 — поддон; 2 — подставка; 3 — монокристалл; 4 — секционная стенка; 5 — индуктор; 6 — тепловой поток от плазматрона; S_a — площадь пятна дуги; S_c — площадь водоохлаждаемой поверхности поддона; S_v, S_{grd} — контакты приложения напряжения ко всем секциям индуктора

ные свойства модельных материалов были приняты согласно справочным данным [7–9].

Граничные и начальные условия электромагнитной задачи. При определении граничных условий (ГУ) электромагнитной задачи исходили из того, что индукционная система окружена камерой из немагнитного материала, внутренние границы которой совпадают с внешней границей расчетной области. Для нее принято граничное условие третьего рода в виде равенства нулю векторного

потенциала $n \times \dot{\mathbf{A}}|_{S_{ext}} = 0$. При этом считали, что ток во всей системе не терпит разрывов и, следовательно, распределение тока в индукторе, в секциях холодной стенки и слитке можно найти исходя из условий, что нет протекания тока на внешних и внутренних границах области Ω_6 (в газовой фазе), т. е. условий $n \cdot \mathbf{J}|_{S_{ext} \setminus \{S_v, S_{grd}\}} = 0$ и $n \cdot \mathbf{J}|_{S_{i6}} = 0$, $i = 1 \dots 5$. Возбуждаемое напряжение на выводах индуктора задано функцией $u(t)$ на границе области Ω_6 в виде условий $u_n|_{S_i} = u(t)$ и $u_n|_{S_{grd}} = 0$, где S_i и $S_{i,j}$ — границы областей Ω_i и границы между областями Ω_i и Ω_j . При этом S_{ext} — граница расчетной области, а S_v и S_{grd} — поверхности выводов индуктора, расположенных на поверхности S_{ext} , на которые приложено внешнее напряжение.

Исходные данные тепловой задачи. В качестве исходных данных тепловой задачи использовали теплофизические свойства материалов $c_{vi}(\Omega_i, T)$, $\gamma_i(\Omega_i, T)$, $\lambda_i(\Omega_i, T)$, где $i = 1, 4, 5$ — индекс, соответствующий материалу в модели для меди ($\Omega_1, \Omega_4, \Omega_5$), $i = 2, 3$ для вольфрама (Ω_2, Ω_3) согласно справочным данным [7–9].

Граничные и начальные условия тепловой задачи. Исходными данными для тепловой задачи было принято $T(x, y, z)|_{r=0} = T_0$ при $d_i < y < d_n$, $h_i < y < h_n$, $w_i < y < w_n$, где d, h, w — ширина, высота и длина расчетной области, что соответствовало температуре окружающей среды (293 К).

На нижней поверхности медного поддона S_c задавали ГУ I рода, что обеспечивало учет потери тепла от системы охлаждения механизма вытягивания слитка. В качестве параметра задавали условие постоянства температуры поверхности поддона, равной температуре охлаждающей жидкости: $T|_{S_c} = T_{water} = \text{const}$, где T_{water} — температура охлаждаемой воды (303 К).

Воздействие плазменной дуги на верхнюю плоскость слитка учитывали в виде уравнения теплового потока, нормально распределенного относительно оси плазматрона (двухмерная функция Гаусса). При этом дополнительно учитывали

возможность его смещения в горизонтальной системе координат в зависимости от характера движения плазматрона. Уравнение теплового потока от плазменного источника задавали ГУ II рода и оно имеет следующий вид:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_{arc}} = Q(x, y, v, P(\delta^{-1})) = \frac{P(\delta^{-1})}{2\pi\sigma^2 e \left(\frac{(x - x(v_x, t))^2 + (y - y(v_y, t))^2}{2\sigma^2} \right)},$$

где x, y — координаты верхней плоскости слитка; v — скорость движения плазменного нагрева; $P(\delta^{-1})$ — функция зависимости мощности дуги от высоты мениска; $x(v_x, t), y(v_y, t)$ — уравнения движения плазменной дуги по x и y координате; v_x, v_y — векторы скорости; σ — параметр формы, соответствующий распределению теплового потока от плазменной дуги прямого действия (аргоно-гелиевая плазмообразующая смесь с 70 мас. % гелия).

В результате теплообмена между кристаллом и окружающей средой потери тепла в виде конвекции и радиационного излучения на поверхностях $\{S_{i6}\} \setminus \{S_c\}$ учитывались как:

$$-\lambda(T)_{\Omega_i} \frac{\partial T}{\partial n} = k_n (T - T_{ext}) + \sigma \eta_{\Omega_i}(T) (T^4 - T_{ext}^4),$$

где $i = 1 \dots 3$; k_n — коэффициент теплоотдачи, который выбран исходя из условий свободной конвекции воздуха в зазоре между кристаллом и холодной стенкой (при расчете $k_n = 25$ Вт/м²·К); σ — постоянная Стефана–Больцмана; $\eta_{\Omega_i}(T)$ — степень черноты поверхности i -ой области; $T_{ext} = 293$ К — температура окружающей среды.

Принимая, что возвратно-поступательное движение плазменного источника вдоль наращиваемой грани монокристалла приводит к изменению положения межфазной области, уравнение теплопроводности дополнено уравнением движения фронта фазового перехода, которое учитывает тепловые процессы при фазовых превращениях [3].

Методика создания математической модели. Характерной особенностью ПИП является формирование динамической картины теплового поля в теле выращиваемых кристаллов в отличие от способов ВДП, ПДП, ЭЛП, где у кристаллов тепловые условия приближены к квазистационарному состоянию. В соответствии с технологической схемой процесса при составлении уравнения, учитывающего вклад тепловой мощности от плазменной дуги, исходили из того, что ее величина в течение термического цикла из-за разного теплового сопротивления участков слитка не является постоянной.

Изменение мощности плазменной дуги в течение теплового цикла связано с поддержанием заданных параметров металлической ванны на верхнем торце выращиваемого монокристалла для обеспечения стабильности его геометрии. Как показали экспериментальные исследования, такие условия для металлической ванны контролируются по постоянной высоте ее мениска.

Исходя из этого, в модель было введено дополнительное условие на диапазон мощности плазменного источника нагрева, которое учитывает изменение тепловложения от рассогласования температуры в контрольной точке на горизонте 5 мм от зеркала ванны с температурой плавления (условие постоянного мениска). При этом параметры функции были подобраны таким образом, чтобы рассогласование температуры не превышало 2 % по абсолютному значению. Выполнение таких условий обеспечит программную корректировку мощности плазменно-дугового нагрева с учетом координат его перемещения, высоты и толщины слитка, а также мощности индукционного нагрева.

Из-за существующей теплоемкости жидкой ванны в математической модели возникает определенная инерционность между изменением температуры в контрольной точке и мощности теплового потока. Такая особенность проявлялась в виде колебательного характера расчетной мощности теплового потока плазменной дуги при его смещении в направлении движения плазмотрона. Несмотря на существенные колебания мощности, изменение температуры в контрольной точке имеет менее выраженный характер и не превышает 50 °С. Несинхронность в изменении мощности и температуры сказывается на увеличении продолжительности сходимости математической модели и затрачиваемого расчетного времени.

Основная доля тепловложения от плазменного источника к слитку осуществляется через жидкую металлическую ванну. На передачу энергии плазменной дуги к твердому телу через металлическую ванну сильное влияние оказывают гидродинамические силы, являющиеся результатом конвективных процессов, электромагнитного взаимодействия расплава с дугой, газодинамического влияния плазменного потока и т. п. Учет этих факторов подразумевает решение дополнительной гидродинамической задачи на основе уравнений течения жидких сред, что значительно усложнит базовую математическую модель и существенно увеличит машинное время счета. Поэтому влияние гидродинамических процессов в ванне на передачу тепла учитывали с помощью эквива-

лентной теплопроводности. В качестве функции теплопроводности в жидкой фазе выбрано уравнение прямой:

$$\lambda(T) = \lambda_m \left(1 + k \left(\frac{T}{T_m} - 1 \right) \right),$$

где λ_m — коэффициент теплопроводности в жидкой фазе при температуре плавления металла T_m , k — коэффициент пропорциональности.

Неизвестный в уравнении коэффициент пропорциональности k определяли по величине перегрева металлической ванны в реальном процессе выращивания монокристалла, что соответствует приблизительно 400 °С [10].

Такой подход дает возможность установить некую усредненную величину теплопроводности жидкой металлической ванны, что позволяет приблизить модель к реальным тепловым условиям выращивания. Погрешность определения температуры на поверхности ванны с учетом найденного коэффициента в течение всего термического цикла не превышала 50 °С.

Реализация математической модели. Учитывая конструктивные и технологические особенности ПИП, для реализации математической модели выбран численный метод конечных элементов (МКЭ). При анализе программного обеспечения учитывали следующие условия: реализацию алгоритма на МКЭ; возможность 3D моделирования; обеспечение совместного расчета электромагнитной (ЭМ) и тепловой задачи согласно уравнениям (6–8); проведение расчета с сеткой более 1 млн. КЭ с возможностью ее настройки в ручном режиме; задание исходных данных и граничных условий в виде функций, таблиц; наличие всех видов теплообмена; гибкая настройка решателей; широкий набор инструментов для постобработки данных.

Реализация разработанной математической модели ПИП выполнена в программном пакете Comsol Multiphysics [11], который наиболее полно соответствует выдвинутым требованиям к программному обеспечению.

Натурное моделирование. Для оценки адекватности данных математического моделирования проведено контактное определение температур в плоском монокристалле вольфрама с помощью вольфрам-ниевых термпар, согласно методике [12].

При выращивании плоских монокристаллов тугоплавких металлов способом ПИП можно выделить три основных стадии теплового состояния слитка:

стадия I — разогрев (заключается в предварительном нагревании затравочного кристалла пе-

ред процессом наращивания с помощью системы индукционного нагрева);

стадия II — циклическое тепловое воздействие (включает генерацию плазменного нагрева, наведение ванны жидкого металла и послойное формирование монокристалла в результате возвратно-поступательного перемещения плазменного источника с одного крайнего положения в другое). На данном этапе функция индукционного нагрева заключается в обеспечении слитка дополнительной энергией для смещения температуры всего кристалла в диапазон температур горячей пластической деформации;

стадия III — остывание (протекает при индивидуальном заданном тепловложении от индукционного источника нагрева, что приводит к равномерному снижению температуры кристалла до температуры окружающей среды и обеспечивает минимальные температурные напряжения в кристалле на конечном этапе выращивания).

Используемая в методике схема распределения термопар в теле слитка дает возможность на стадии I исследовать изменение температуры во всех контрольных точках в широком диапазоне изменения мощности индукционного нагрева (рис. 2). На стадии II при нагревании слитка плазменной дугой расположенные в верхних рядах горячие спаи термопар подвергали температурному воздействию выше их рабочего диапазона, что приводило к деградации их характеристик. Для анализа температурного поля слитка на этапе стадии II отобраны данные о температуре от тех термопар, чьи характеристики не подверглись деградации. Ими выявились показания термопар 4–6 уровня (рис. 2).

Математическое моделирование. Для возможности проведения сравнительного анализа данных натурального эксперимента и математической модели

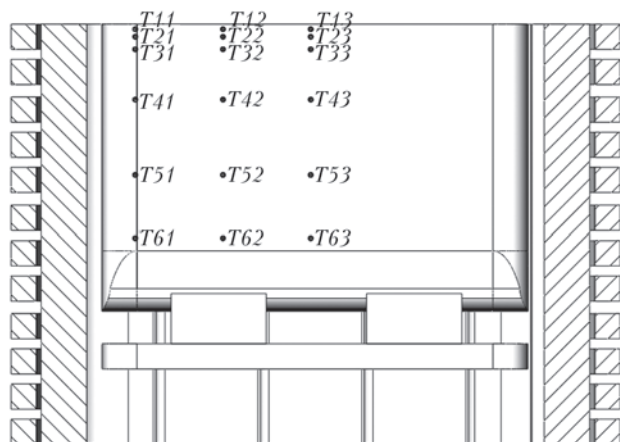


Рис. 2. Расположение контрольных точек для замера температуры в математической модели

в последней было соблюдено полное соответствие электрической схемы подключения индуктора и его геометрии, геометрии холодной стенки и поддона, размеров слитка и подставки, их взаимное расположение, а также характер и скорость движения плазменного источника. При этом алгоритм расчета математической модели был реализован согласно технологической схеме выращивания плоских монокристаллов тугоплавких металлов в соответствии с основными стадиями теплового состояния слитка.

На этапе подготовки конечно-элементной модели расчетной области с целью повышения сходимости и снижения погрешности ЭМ задачи размер КЭ выбрано с учетом свойств материалов и условия затухания электромагнитной волны в проводящих элементах. Сложная 3D геометрия расчетной области, высокая частота электромагнитного поля (66 кГц) и малый размер КЭ требуют продолжительного расчетного времени и машинных ресурсов. Поэтому было принято упрощенную схему расчетов, когда ЭМ задача пересчитывалась не на каждом временном интервале тепловой задачи.

Принимая во внимание такую схему расчетов, на стадии I теплового состояния слитка после магнитного расчета время тепловой задачи выбирали таким образом, чтобы температура слитка достигла равновесного состояния, после чего повышали напряжение на витках индуктора в соответствии с способом половинного деления и повторяли цикл до совпадения температур в контрольных точках с данными натурального эксперимента. Совпадение температур в контрольных точках достигалось после 6–8 итераций. Погрешность при такой схеме определялась интервалом изменения температуры на последнем цикле и соответствовала менее 1 %.

На стадии II в модели учитывали граничное условие плазменного нагрева. При этом в соответствии с упрощенной схемой расчета была выбрана последовательность пересчетов тепловой и ЭМ задачи. Наиболее рационально привязаться к пройденному пути плазменным источником, что приведет к уменьшению временного интервала пересчета электромагнитной задачи при увеличении его скорости. Шаг по времени ЭМ задачи определяли функционально от пройденного промежутка, а шаг тепловой устанавливали автоматически.

При данной схеме расчета после каждого просчета ЭМ задачи на убывающих и возрастающих участках температурной зависимости возникали локальные всплески температуры вниз и вверх соответственно, что отражалось в виде нарушения плавности изменения температурной зависимости

в контрольных точках (рис. 3). Несмотря на то, что такая схема приводит к увеличению погрешности расчетов до 3 %, ее использование позволяет снизить расчетное время в несколько десятков раз. При этом визуально величину погрешности можно определить по величине всплесков температурной зависимости.

Последнюю итерацию этой циклической схемы определяли по совпадению картин температурного поля при одинаковом положении плазматрона в начале и конце цикла. При этом максимальная разница температур в каждой отдельной контрольной точке в начале и конце термического цикла не превышала 1 %. Данное совпадение достигалось за 3–4 термических цикла.

Анализ результатов. В процессе математического моделирования получены зависимости изменения температуры за термический цикл. При сравнительном анализе температурных зависимостей математической модели с данными натурального эксперимента в точках 4–6 ряда наблюдали разницу между кривыми, причем ее величина возрастала при повышении температуры. Максимальное отклонение значений расчетной кривой составило 250 К. Такое поведение кривых указывает на источник внесения погрешности в расчет теплового поля от плазменного нагрева, т. е. тепловложение от плазменного источника в математической модели выше по сравнению с натурным экспериментом. Наиболее вероятна причина в описании условий теплопередачи от плазменного источника к твердому телу, что недостаточно полно отражает характер передачи тепла в реальном процессе. При ПИП перегретые поверхностные слои расплавленного металла движутся под действием гидродинамических сил по замкнутым линиям от центра к периферии ванны в отличие от математической модели, где характер распространения тепла происходит в условиях неподвижной среды. Такое отличие приводит к образованию требуемой величины мениска при меньших мощностях плазменного нагрева. Для коррекции математической модели, контролирующую высоту мениска уменьшили до уровня, при котором максимальное отклонение между расчетными и экс-

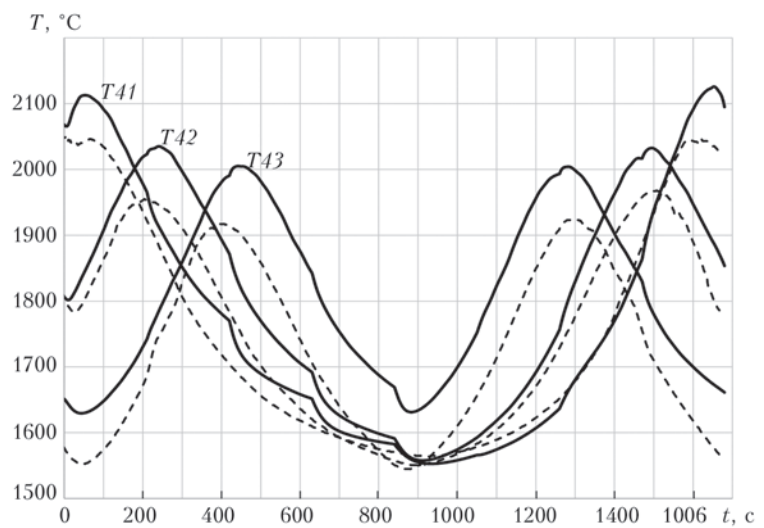


Рис. 3. Сравнение температурной зависимости в точках 4-го ряда, полученных на математической модели (сплошная линия), с данными, полученными в ходе натурального эксперимента (пунктирная линия) за термический цикл при скорости движения плазматрона 10 мм/мин при возвратно-поступательном движении

периментальными кривыми не превышало 5 % по абсолютной шкале температур. На рис. 3 приведены результаты моделирования с учетом принятой коррекции параметров модели для 4-го ряда контрольных значений.

Уточнение параметров позволило получить сопоставимую с экспериментом расчетную зависимость мощности тепловложения плазменного потока по длине слитка и обеспечить выравнивание модельной и реальной мощности плазменного нагрева (рис. 4).

В итоге было получено распределение температур (рис. 5) и температурных градиентов (рис. 6) в высокотемпературной области слитка. Анализ картины температурного поля показал существование неравномерного нагрева слитка в горизонтальном направлении, величина которого в верхней его части при существующей технологии может достигать 1500 К. Принимая во внимание, что вектор динамического возмущения теплового поля направлен в горизонтальной плоскости, снижение разницы температур между крайними

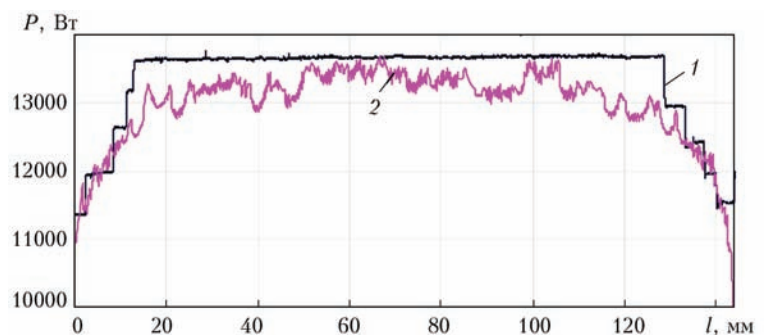


Рис. 4. Изменение мощности плазменного нагрева при натурном эксперименте (1) и математическом моделировании (2) с учетом КПД = 0,65

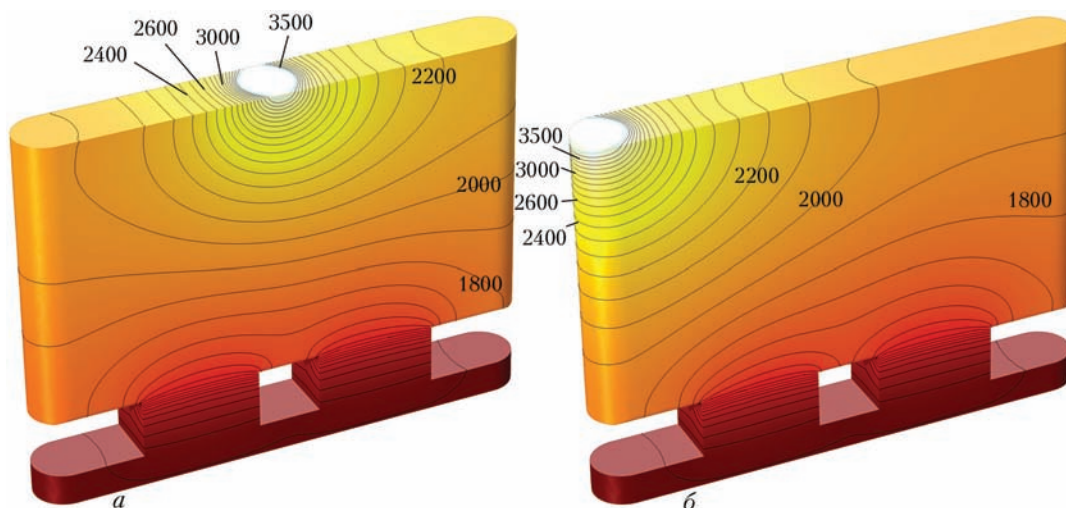


Рис. 5. Температурное поле слитка в момент расположения ванны расплава в центре (а) и на краю слитка (б) (движение справа налево, скорость 10 мм/мин, шаг изотерм 100 К)

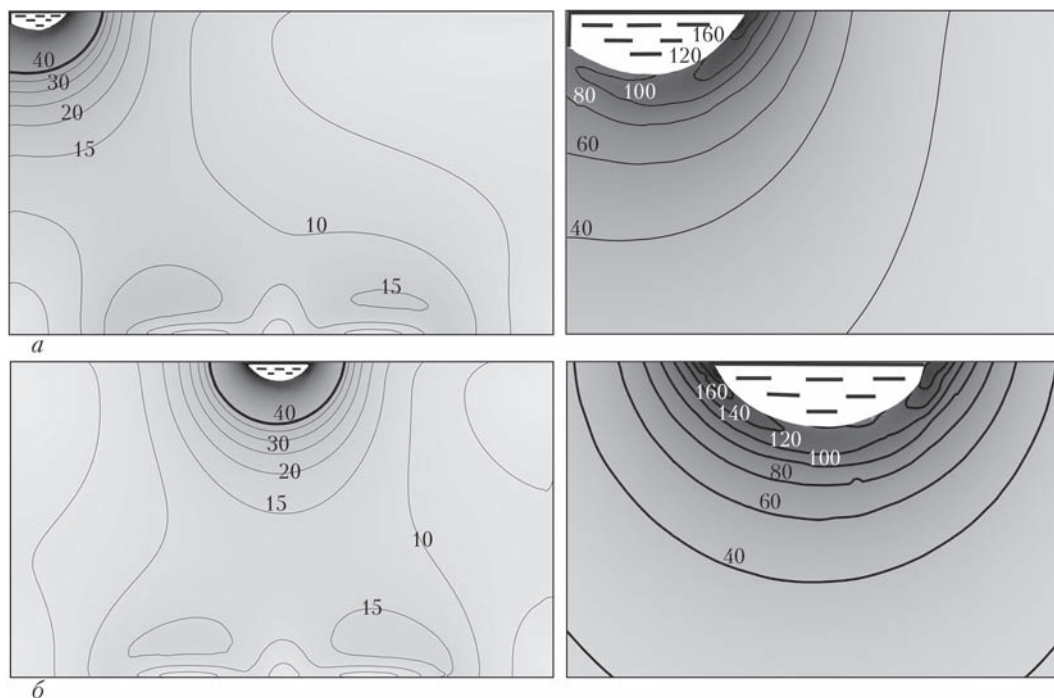


Рис. 6. Температурные градиенты в продольно-вертикальном сечении слитка по оси симметрии (при движении плазматрона справа налево), К/мм: в момент расположения плазматрона на краю (а) и в центре (б) слитка с увеличенными участками зоны металлической ванны

зонами слитка приведет к снижению термических напряжений в его теле и обеспечит формирование монокристаллов с более совершенной структурой.

Полученные данные имеют важное значение для анализа теплового поля в высокотемпературной области слитка в связи с существующими сложностями их получения другими способами измерения.

Хорошая корреляция данных математической модели и натурального эксперимента позволяет использовать разработанную методику для исследования тепловых полей при выращивании тугоплавких монокристаллов разной геометрии

(пластин, кругов, труб) с учетом варьирования как технологических параметров процесса ПИП, так и конструктивных особенностей плавильного оборудования.

Выводы

1. Разработана и реализована математическая модель ПИП при совместном решении электромагнитной и тепловой задачи в соответствии с технологической схемой процесса выращивания монокристаллов вольфрама. Выполнена коррекция ее параметров на основании данных натурального эксперимента, что позволило с достаточной

для практических целей точно установить картины теплового поля в высокотемпературной области плоского монокристалла вольфрама, получение которого из-за существенных сложностей другими способами практически невозможно.

2. Разработанная методика математического моделирования позволяет проводить прогнозирование оптимальных технологических параметров выращивания монокристалла на основе анализа его тепловой картины при изменении геометрии слитка и конструкции электромагнитной системы.

3. При создании новых высокопроизводительных технологий выращивания профилированных монокристаллов тугоплавких металлов на основе способа ПИП целесообразно проводить анализ тепловых условий выращивания монокристалла, опираясь на результаты расчетов теплового поля в зоне фронта кристаллизации, что открывает возможность анализировать кинетические и морфологические особенности формирования монокристаллической структуры.

Список литературы

1. Гнзидыло А. Н. (2015) Перспективы и совершенствование плазменно-индукционной технологии выращивания монокристаллов тугоплавких металлов. *Современная электрометаллургия*, **3**, 16–22.
2. Шаповалов В. А. (2002) Модель индукционного нагрева для плазменно-индукционного выращивания монокристаллов. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **1**, 32–36.
3. Шаповалов В. А. (2002) Тепловая модель плазменно-дугового процесса выращивания монокристаллов вольфрама. *Там же*, **3**, 20–23.
4. Тамм И. Е. (2003) *Основы теории электричества*. Учеб. пособие для вузов. Москва, ФИЗМАТЛИТ.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. (1982) *Теоретическая физика*. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. Москва, Наука.
6. Немков В. С., Демидович В. Б. (1988) *Теория и расчет устройств индукционного нагрева*. Ленинград, Энергоатомиздат.
7. (1985) Дриц М. Е. (ред.) *Свойства элементов*. Справочник. Москва, Metallurgy.
8. Мармер Э. Н., Гурвич О. С., Мальцева Л. Ф. (1967) *Высокотемпературные материалы*. Москва, Metallurgy.

9. Зиновьев В. Е. (1989) *Теплофизические свойства металлов при высоких температурах*. Справочное издание. Москва, Metallurgy.
10. Шаповалов В. А., Коваленко А. А., Шейко И. В., Жолудь В. В. (1993) Влияние технологических параметров на возникновение дефектов при послойном формировании крупных профилированных монокристаллов тугоплавких металлов. *Проблемы специальной электрометаллургии*, **4**, 54–57.
11. <https://www.comsol.com/>
12. Шаповалов В. А., Якуша В. В., Никитенко Ю. А. и др. (2014) Изучение температурного поля профилированных монокристаллов вольфрама, получаемых плазменно-индукционным способом. *Современная электрометаллургия*, **3**, 31–35.

References

1. Gnizdylo, A.N. (2015) Prospects and updating of plasma-induction technology of growing of refractory metal single crystals. *Sovrem. Electrometall.*, **3**, 16–22 [in Russian].
2. Shapovalov, V.A. (2002) Model of induction heating for plasma-induction growing of single-crystals. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 27–31.
3. Shapovalov, V.A. (2002) Heat model of plasma-arc process of growing tungsten single-crystals. *Ibid.*, **3**, 17–20.
4. Tamm, I.E. (1980) *Fundamentals of the theory of electricity*. Central Books Ltd [in Russian].
5. Landau, L.D., Lifshitz, E.M. (1979) *Course of theoretical physics*. Volume 8. Electrodynamics of Continuous Media. Butterworth-Heinemann [in Russian].
6. Nemkov, V.S., Demidovich, V.B. (1988) *Theory and calculation of induction heating devices*. Leningrad, Energoatomizdat [in Russian].
7. (1985) Drits, M.E. (ed.) *Element properties*. A handbook. Moscow, Metallurgy [in Russian].
8. Marmer, E.N., Gurvich, O.S., Mal'tseva, L.F. (1967) *High-temperature materials*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
9. Zinoviev V. E. (1989) *Thermal properties of metals at high temperatures*. Handbook. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
10. Shapovalov, V.A., Kovalenko, A.A., Sheiko, I.V., Zholid, V.V. (1993) The influence of technological parameters on the appearance of defects in the layer-by-layer formation of large profiled single crystals of refractory metals. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 54–57 [in Russian].
11. <https://www.comsol.com/>
12. Shapovalov, V.A., Yakusha, V.V., Nikitenko, Yu.A. et al. (2014) Studying the temperature field of profiled tungsten single-crystals produced by plasma-induction process. *Sovrem. Electrometall.*, **3**, 31–35 [in Russian].

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЛАЗМОВО-ІНДУКЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛІВ

О. М. Гнзидило¹, В. В. Якуша¹, В. О. Шаповалов¹, О. В. Карусевич¹, Ю. О. Никитенко¹, Н. В. Козуб²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Розроблено та реалізовано математичну модель плазмово-індукційної плавки при спільному вирішенні електромагнітної і теплової задач у відповідності з технологічною схемою процесу вирощування монокристалів вольфраму і виконана корекція її параметрів на підставі даних натурного експерименту. Отримано дані з достатньою для практичних цілей точністю характеристик теплової картини у вигляді полів температур і градієнтів, в тому числі і в високотемпературній області монокристалла вольфраму, що має велике значення в зв'язку з існуючими труднощами їх отримання іншими способами вимірювання. Розроблено методику математичного

моделювання, яка дозволяє проводити прогнозування оптимальних технологічних параметрів на основі аналізу теплової картини при зміні в широкому діапазоні параметрів геометрії монокристалічного злитка і конструкції електромагнітної системи. Дано рекомендації для розробки нових технологій, спрямованих на розширення асортименту тугоплавких монокристалів при забезпеченні високої продуктивності і економічної ефективності. Бібліогр. 12, іл. 6.

Ключові слова: математична модель; моделювання; плазмово-індукційний спосіб; профільований монокристал вольфраму; адитивна технологія; температурне поле

**MATHEMATICAL MODEL OF PLASMA-INDUCTION PROCESS
FOR GROWING SINGLE CRYSTALS OF REFRACTORY METALS**

A.N. Gnizdyl¹, V. V. Yakusha¹, V. A. Shapovalov¹, O. V. Karuskevich¹, Yu. A. Nikitenko¹, N. V. Kozub²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²NTUU «Igor Sikirsky KPI».

37 Pobedy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine

A mathematical model of plasma-induction melting was developed and implemented in the joint solution of electromagnetic and thermal problems in accordance with the technological scheme of growing single crystals of tungsten and correction of its parameters based on the data of the full-scale experiment, was made. Data of characteristics of the thermal pattern in the form of temperature and gradient fields were obtained with a sufficient accuracy for practical purposes, including those in the high-temperature region of a single crystal of tungsten, which is of great importance in connection with the existing difficulties in obtaining them by other methods of measurement. A mathematical modeling technique has been developed that allows predicting the optimal technological parameters on the basis of the thermal picture analysis with a change of parameters of the geometry of a single-crystal ingot and the design of an electromagnetic system over a wide range. Recommendations are given for the development of new technologies aimed at expanding the range of refractory single crystals with ensuring high productivity and economic efficiency. Ref. 12, Fig. 6.

Key words: mathematical model; modeling; plasma-induction method; profiled single crystal of tungsten; additive technology; temperature field

Поступила 29.02.2018



МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ

VIII спеціалізована виставка

«Метал. Обладнання. Інструмент 2018»

25–27 квітня 2018 р., Палац спорту «Україна», вул. Мельника, 18, м. Львів

Виставка «Метал. Обладнання. Інструмент-2018» — це місце зустрічі провідних фахівців у галузі машинобудування і русло потужного інформаційного потоку.

Тематичні розділи виставки:

- ◆ обладнання для обробки металу ◆ металорізальні верстати та оснастка
- ◆ лазерне, плазмове обладнання і технології ◆ обладнання для розкрою листа і прокату
- ◆ металорізальні інструменти ◆ зварювальне обладнання ◆ ковальське обладнання та ін.

Детальна інформація про проект та архів заходів на сайті: <http://met.expolviv.ua>