

УДК 621.365.511

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ КРЕМНИЯ*

А.А. Базаров, А.А. Навасардян

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** Рассмотрен комплекс вопросов по компьютерному моделированию электромагнитных и тепловых процессов в индукционном кристаллизаторе расплава кремния, в котором обеспечивается создание сил между расплавом и катушкой индуктора, сжимающих столб жидкого материала и предотвращающих прямой контакт расплава со стенками тигля. В известных индукционных системах, использующих электромагнитное давление на расплавленный металл, для кристаллизации выбираются параметры индуктора такими, чтобы при достаточном усилении не происходило повышения температуры за счет внутренних источников тепловыделения. Решение этой задачи достигается путем снижения частоты тока. Отвод тепла в основном происходит через контакт с водоохлаждаемой опорной поверхностью.*

***Ключевые слова:** индукционный нагрев, кристаллизация, кремний, метод конечных элементов, электромагнитное литье.*

Введение

Целью работы является определение параметров процесса, при которых происходит формирование необходимого электромагнитного усилия на стенку расплава с учетом резкого снижения плотности тока на границе твердой и жидкой фаз кремния. Кремний в твердом состоянии обладает более низким значением электропроводности, чем в жидком, что отражается на резком снижении плотности тока на границе перехода из одного агрегатного состояния в другое. Математическое моделирование тепловых процессов в расплаве учитывает процесс перехода из жидкого в твердое состояние с выделением теплоты плавления. Использование встроенных математических функций в программном пакете позволяет при правильном подборе сетки конечных элементов и параметров процедуры аппроксимации процесса кристаллизации за счет локального изменения удельной теплоемкости получить распределение температуры в пространстве при движении фронта кристаллизации.

При определении параметров индукционных кристаллизаторов использовались температурные зависимости теплофизических свойств. Исследованы варианты реализации индуктора, позволяющего охватывать весь объем расплава или его часть при условии непрерывного перемещения после затвердевания металла, что сопровождается изменением электропроводности кремния и мощности внут-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №19-06-00212).

Базаров Александр Александрович (д.т.н.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Навасардян Ашот Александрович, аспирант.

ренных источников тепла. Результаты исследования показали возможность применения кристаллизатора при различных соотношениях высоты и диаметра столба расплава, интенсивности охлаждения. Эффективность процесса для кремния увеличивается при уменьшении высоты и увеличении радиуса столба расплава.

В современной металлургической промышленности кремний металлургической чистоты получают путем восстановления из расплава песка или кварца с коксом при температуре около 1900 °С в рудотермических дуговых печах. Чистота полученного таким образом кремния может достигать 99 % (основные примеси – углерод, металлы). Основным устройством для выплавки металлургического кремния является дуговая рудотермическая одно- или трехфазная печь мощностью от 8 до 25 МВА.

Данный метод на сегодняшний день является самым распространенным и обеспечивает чистоту выпускаемого кремния 97–99,9 % по массе. Кремний подвергается глубокой доочистке химическими или металлургическими методами. После выплавки кремния в печи он сливается в изложницы, и тем самым происходит прямой контакт жидкого кремния и поверхности теплоизоляции, что в свою очередь приводит к попаданию примесей, а именно поверхностной пыли.

Технологии современной металлургической промышленности позволяют удалять примеси с первичных слитков цветных металлов, используя только металлургические методы перекристаллизации металлов с целью распределения примесей согласно коэффициенту сегрегации единичных элементов и химических соединений из расплава. Предотвращение попадания примесей в процессе литья слитков на сегодняшний день является актуальной задачей для литейных цехов металлургии. В работе [1] была показана технология литья алюминия в обжимающем электромагнитном поле. Данный способ позволяет получать цилиндрические слитки с контролируемым диаметром и ровной поверхностью без дополнительного загрязнения расплава.

Электромагнитное поле индуктора помимо отталкивающих сил приводит к созданию источников тепловыделения, поэтому для ускорения процесса кристаллизации предусматривается интенсивное охлаждение. Алюминиевые сплавы допускают использование в качестве охлаждающей среды водяного потока.

Применение технологии кристаллизации в электромагнитном поле имеет некоторые особенности, обусловленные физическими свойствами: в твердом состоянии кремний имеет малое значение электропроводности, что делает переход из жидкого состояния в твердое непростым с точки зрения функционирования индуктора, так как на границе сред наблюдается десятикратное уменьшение плотности тока. Дополнительной проблемой является подверженность растрескиванию при создании больших градиентов температуры. В работах [2–4] показано изменение свойств кремния при кристаллизации и то, как это отражается на распределении температуры и напряжений. Кремний является хрупким материалом, и только при нагревании выше 800 °С он становится пластичным. Поэтому применение водяного охлаждения при кристаллизации нежелательно.

Компьютерное моделирование процесса с учетом поведения теплофизических свойств в широком диапазоне температур позволяет с достаточной точностью предсказать поведение процесса кристаллизации металлов в обжимающем магнитном поле. Моделирование процессов охлаждения с учетом теплообмена с внешней средой и выделения теплоты плавления показало возможность контроля перемещения границы «жидкость – твердое тело» [5].

Формулировка задачи

Для реализации управляемого процесса кристаллизации расплава кремния необходим учет нескольких факторов [6, 7]. Формирование кристаллов нужной величины и предотвращение недопустимых термонапряжений требуют определенной скорости охлаждения и поддержания величины тепловых потоков. Создание магнитного поля, обеспечивающего электромагнитную силу [8, 9], необходимую для удержания расплава на расстоянии от футеровки, требует решения задачи проектирования индуктора. Поддержание общего характера процесса кристаллизации направлено на формирование распределения температуры по высоте, в рамках которого минимальное и максимальное значения не выходят за рекомендуемые, то есть не происходит повторного расплавления застывшей части и холодная часть слитка имеет температуру, препятствующую появлению больших термонапряжений. Для выполнения этих требований нужна небольшая высота слоя жидкой фазы. В задаче охлаждения кремния поиск высоты расплава является очень важным. Решение указанных проблем требует применения математического моделирования нелинейных связанных электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в условиях изменения агрегатного состояния [5, 10, 11]. Помимо статического воздействия электромагнитного поля на расплав возможно иное проявление сил, способных привести к возникновению вибраций. Интересное применение внешних воздействий на расплавленный металл исследовано в работе [12], где решается задача повышения качества за счет удаления газовых включений. Использование вибрации в жидком металле на этапе рафинирования может быть эффективно, хотя представляет собой сложную инженерную задачу разработки конструкции.

Математическая модель в общем случае представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. В рассматриваемой задаче необходимо учитывать целый ряд нелинейных процессов при переходе кремния из жидкого состояния в твердое:

- теплообмен между расплавом, футеровкой, системой охлаждения и окружающей средой, т. е. одновременно протекающие процессы кондуктивного, конвективного, радиационного теплообмена;

- охлаждение расплава, при котором теплофизические и электрофизические свойства нагреваемого изделия значительно изменяют свои значения с падением температуры;

- индукционный нагрев кремния, основанный на преобразовании электрической энергии в тепловую на фоне снижения температуры в условиях резкого снижения электропроводности, что приводит к изменению распределения мощности и силы по высоте расплава.

В качестве исходной конструкции кристаллизатора принята цилиндрическая форма. Теплоизоляция боковой стенки выполнена из карбида кремния, чтобы исключить перенос загрязняющего вещества в расплав при возможном контакте. Нижняя часть корпуса содержит тонкий слой карбида кремния и слой металла, выполняющий функции несущей конструкции. Под металлическим основанием располагается теплообменник в виде медной трубки с проточной водой.

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве исходной модели принято нелинейное уравнение теплопроводности вида [13]

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + Q$$

с начальными условиями

$$T(r, x, 0) = T_0$$

и граничными условиями

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 [T(R, x, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(R, x, t) - T_{wall}^4];$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\alpha_2 [T(r, 0, t) - T_{ext}];$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X} = \alpha_3 [T(r, X, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(r, X, t) - T_{ext}^4].$$

Здесь C – удельная теплоемкость;

ρ – плотность;

λ – теплопроводность;

Q – плотность внутренних источников тепла;

α_i – коэффициенты конвективного теплообмена на поверхностях загрузки, футеровки, основания под расплавом;

ε – степень черноты загрузки и футеровки;

T_{wall} – температура внутренней стенки футеровки;

T_{ext} – температура окружающей среды.

Решение тепловой задачи выполняется методом конечных элементов. Данный метод позволяет с высокой точностью учитывать все нелинейности задачи путем изменения всех свойств на каждом шаге по времени, а также задавать сложные геометрические формы нагреваемого изделия.

Определение распределения температуры в нагреваемом изделии сводится к решению уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, которая находится в результате решения электромагнитной задачи.

Электромагнитная задача формулируется в виде уравнений Максвелла [14], описывающих связь между основными электромагнитными величинами, такими как напряженность магнитного поля и индукция. Для перехода к численному решению исходная система преобразуется в терминах векторного магнитного потенциала к виду

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial rA}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial rA}{\partial r} \right] - j\omega A - J_0 = 0,$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

μ_a – магнитная проницаемость материалов, определяется как произведение относительной проницаемости на проницаемость вакуума $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$.

В качестве граничных условий для однозначности задачи принимаются наиболее общие условия – равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области:

$$A|_{S_1 \in S} = 0,$$

где S_1 – удаленная граница расчетной области.

На базе основного дифференциального уравнения и граничных условий осуществляется переход к конечно-элементной формулировке и строится система алгебраических уравнений. В результате ее решения определяются значения магнитного потенциала для каждого элемента, по которым производится расчет токов и других переменных. В индукционной системе кристаллизации кремния не предусматривается применение ферромагнитных материалов, поэтому для всех сред магнитная проницаемость равна единице.

Объемная плотность внутренних источников тепла, создаваемых в проводящей неподвижной среде, определяется в соответствии с выражением

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(J_z \sigma^{-1} J_z^*).$$

Здесь в скобках показано произведение плотности тока на его комплексно сопряженную величину.

Со стороны катушки индуктора на нити тока, протекающего в расплаве, действуют силы Лоренца, определяемые векторным произведением плотности тока и индукции:

$$F = J \times B.$$

Такой способ определения удобен для расчета электромагнитных сил в проводящих областях.

Задание теплофизических характеристик материалов

При реализации предлагаемой технологии необходимо учитывать особенности изменения теплофизических свойств материала в большом диапазоне температур. На примере кремния можно наблюдать изменения свойств. При обычных условиях кремний хрупок, а при определенных температурах становится пластичным. Электрические свойства кремния сильно изменяются при переходе из твердого состояния в расплавленное. Если в холодном состоянии кремний ведет себя как обычный полупроводник, то при расплавлении его удельная электропроводность становится как у горячей стали. В расплавленном состоянии можно применять индукционный нагрев по отношению к кремнию. При остывании эффективность вихревых токов снижается, и вынужденное увеличение токов, способных создать необходимое давление, приводит к росту тепловыделения и затруднению процесса охлаждения. Для разрешения этой проблемы необходим поиск параметров индукционной системы, футеровки и системы охлаждения, позволяющих минимизировать энергозатраты [10, 15].

При использовании численного метода решения задач для повышения точности расчетов удобно пользоваться аппроксимирующими выражениями для физических параметров. Коэффициент теплопроводности и теплоемкость представлены линейными функциями

$$\lambda = 148,4 - 0,0734 \cdot T ;$$

$$C = 504,9 + 0,389 \cdot T .$$

Переход из жидкого состояния в твердое [2, 5, 11] сопровождается выделением теплоты плавления кремния $L=1409$ кДж/кг. Для учета этого процесса в выражение для теплоемкости добавляется компонента, приводящая к значительному увеличению в окрестности температуры затвердевания. В результате теплоемкость приобретает вид

$$C_{res} = 504 + 0,389 \cdot T + \frac{L}{\Delta T} (H(T_{L-H} - T) - H(T_{L-H} - \Delta T - T)).$$

Здесь ΔT – принятое для расчетов значение интервала температуры, на котором происходит выделение теплоты плавления;

H – ступенчатая функция;

T_{L-H} – температура затвердевания.

Для теплоизоляции, в качестве которой используется корунд, коэффициент теплопроводности и теплоемкость представлены линейными функциями

$$\lambda = 12,2 - 0,86 \cdot 10^{-3} \cdot T ;$$

$$C = 680,3 + 0,42 \cdot T .$$

Плотность кремния равна 2330 кг/м^3 , а корунда 3600 кг/м^3 .

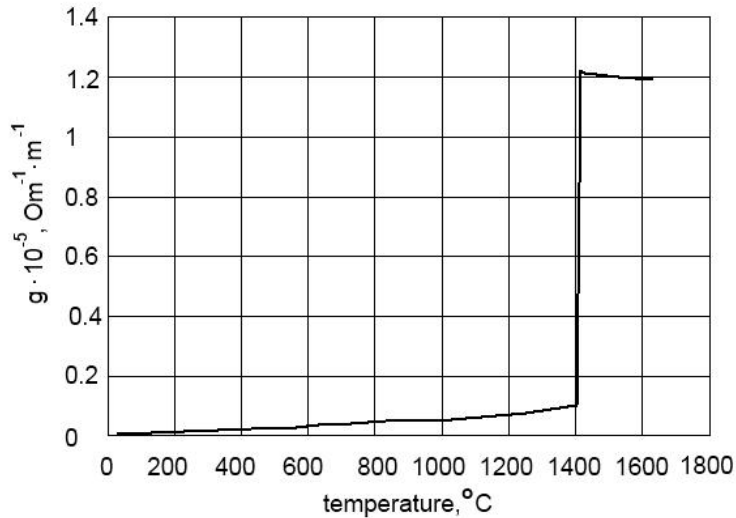


Рис. 1. Зависимость электропроводности кремния от температуры

Температура плавления кремния равна $1415 \text{ }^\circ\text{C}$, и в качестве интервала температур, где происходит кристаллизация, можно взять величину $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Дальнейшее уменьшение диапазона нежелательно из-за вычислительных проблем, вызванных плохой сходимостью. С учетом принятых допущений теплоемкость и коэффициент теплопроводности в функции от температуры примут вид

$$C_{res} = 504 + 0,389 \cdot T + 46900 \cdot (H(1688 - T) - H(1718 - T));$$

$$\lambda = 148 - 0,073 \cdot T .$$

Электропроводность кремния увеличивается приблизительно в 10 раз при расплавлении. Для представления электропроводности используется ступенчатая функция, задающая скачкообразное изменение при переходе через температуру плавления (рис. 1):

$$\sigma = 10000 \cdot (1 + 0,005 \cdot T) + 1,1 \cdot 10^6 \cdot H(T - 1688) .$$

Мощность тепловыделения в кремнии при переходе через температуру плавления изменяется в несколько раз. Учитывая ограничения на величину охлаждающего теплового потока от границы кристаллизации к основанию, принимаем высоту жидкого слоя постоянной. По мере охлаждения и кристаллизации верхнего слоя производится добавление расплава. Таким образом, происходит непрерывное увеличение высоты затвердевшей части столба кремния при неизменной величине высоты жидкой фазы.

Расчеты электромагнитных и тепловых процессов

Расчеты электромагнитных и тепловых процессов при кристаллизации кремния выполнялись в отдельности, так как наличие существенных нелинейностей для мультифизических задач создает очень серьезные вычислительные проблемы.

В результате расчета индуктора должна быть показана возможность формирования необходимого давления на столб жидкого кремния, но при этом выделяющееся тепло не должно превосходить величину отводимого теплового потока через охлаждаемую поверхность основания. Для обеспечения силы, прилагаемой к стенке расплава, достаточной для создания зазора, электромагнитное давление на расплавленный кремний должно превышать гидростатическое давление столба жидкого кремния:

$$p = \rho gh .$$

При плотности кремния 2330 кг/м^3 и высоте столба жидкости $0,02 \text{ м}$ давление составляет 457 Па . В таблице приведены значения необходимой электромагнитной силы в зависимости от радиуса столба расплава.

Для определения сил между индуктором и участками кремния в жидкой и твердой фазе произведены расчеты с помощью программы Comsol на базе модели электромагнитной задачи, соответствующей приведенным выше теоретическим положениям [5, 8, 9]. Выполнены вычисления для вариантов загрузки радиусом от $0,1$ до $0,25 \text{ м}$. В результате расчетов получены силы, обеспечивающие требуемое давление, а также найдены значения мощности тепловыделения в слоях жидкого и твердого кремния при высоте слоев $0,02 \text{ м}$ и $0,1 \text{ м}$ (см. таблицу). Из-за разницы высот участков твердой и жидкой фаз значения мощности оказались близкими по величине, но при этом объемная плотность отличается в несколько раз. Вихревые токи в кремнии генерируют тепловую мощность, которую нужно учитывать при охлаждении расплава. Низкие значения электропроводности делают неэффективным использование тока промышленной частоты из-за низкого электрического КПД индуктора, так как глубина проникновения тока больше величины радиуса слитка. Приведенные в таблице параметры найдены при частоте 500 Гц .

Параметры источников тепловыделения в расплаве кремния

R_{ij} , м	0.1	0.15	0.2	0.25
S_{σ} , м ²	0,01256	0,01884	0,02512	0,0314
F, Н	5,74	8,61	11,48	14,35
I, А	6502	6713	7312	7912
$P_{жс}$, Вт	493	1075	1939	3038
$P_{те}$, Вт	469	1187	2310	3754
$V_{жс}$, м ³	0.000628	0,001413	0,002512	0,003925
$V_{те}$, м ³	0,00314	0,007065	0,01256	0,019625
Q, Вт/м ³	785000	761000	772000	774000
Q, Вт/м ³	149000	168000	184000	191000

Распределение мощности тепловыделения в кремнии с учетом снижения удельной электропроводности при кристаллизации показано на рис. 2 для нескольких значений радиуса слитка. Для всех вариантов высота индуктора составляет 0,5 м, а радиус индуктора больше радиуса слитка на 0,1 м.

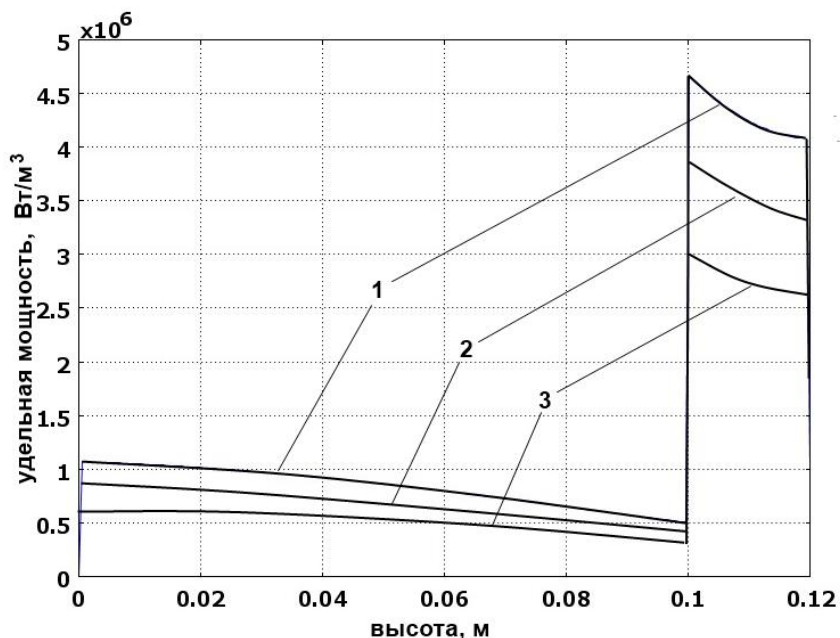


Рис. 2. Диаграммы распределения мощности тепловыделения на боковой поверхности расплава:

1 – радиус слитка 0,25 м; 2 – радиус слитка 0,2 м; 3 – радиус слитка 0,15 м

Диаграммы распределения силы по высоте линии боковой поверхности приведены на рис. 3. Расчеты показывают, что уменьшение высоты индуктора приводит к ухудшению формы диаграммы распределения силы, действующей на расплав. Это может привести не только к уменьшению общей силы, но и к искажению формы затвердевающего расплава.

Проведенные расчеты для принятых соотношений высоты жидкой и твердой фаз расплава и его радиуса показали, что значения тепловых потоков охлаждения для эффективного процесса кристаллизации достижимы с помощью охладителей с водяным теплообменником.

Использование мультифизических задач для моделирования процессов кристаллизации является очень ресурсоемким. Поэтому после определения закона распределения мощности по высоте столба кремния при заданных высоте и радиусе слитка выгодно перейти к отдельной тепловой задаче. На основании диаграмм распределения мощности (см. рис. 2) можно найти аппроксимирующее выражение для задания в качестве источника внутреннего тепловыделения, учитывая изменение при переходе через точку плавления.

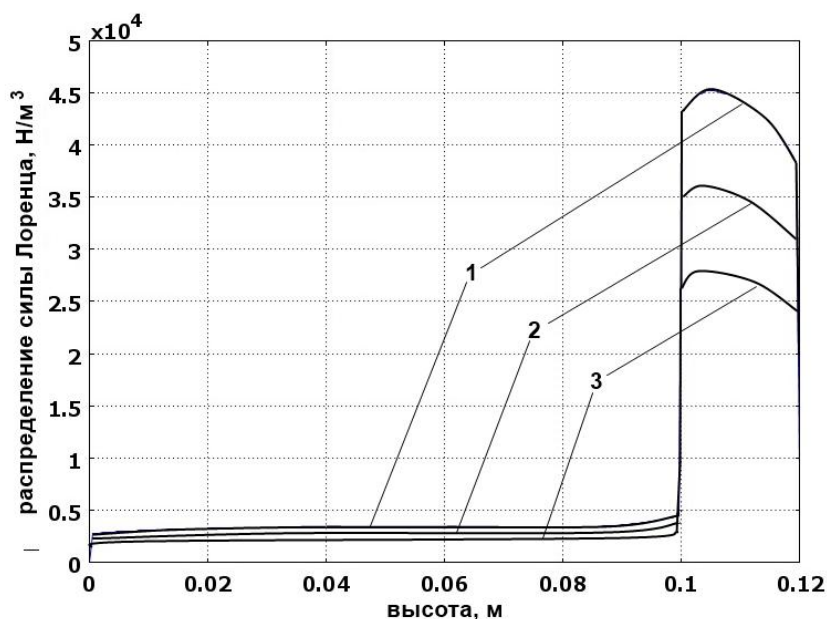


Рис. 3. Диаграммы распределения электромагнитной силы на боковой поверхности расплава:

1 – радиус слитка 0,25 м; 2 – радиус слитка 0,2 м; 3 – радиус слитка 0,15 м

Зависимость удельной мощности тепловыделения от температуры во всем столбе кремния может быть представлена в виде выражения

$$Q = 150000 \cdot (1 + 4 \cdot H(T - 1688)) .$$

В выражении для мощности ступенчатая функция H отражает изменение мощности в пять раз при плавлении или кристаллизации.

Дальнейшие расчеты направлены на детализацию тепловых процессов при кристаллизации на разных этапах. Увеличение высоты слитка сопровождается

ростом термического сопротивления, снижением величины теплового потока к теплообменнику и вероятностью возникновения распределений температуры в столбе, сопровождающихся термонапряжениями. В отличие от задачи кристаллизации металла необходимо учитывать большее число факторов.

Вариация высот остывшей и расплавленной частей столба кремния, высоты индуктора, мощности индуктора, величин теплового потока с боковой и нижней поверхностей позволила определить параметры установки. Диаметр слитка принят равным 0,3 м, высота жидкого кремния не превышает 0,02 м. На рис. 4 представлены диаграммы температур по высоте кристаллизатора, состоящего из металлической опоры, теплоизоляции и расплава в момент времени 300 секунд при различных значениях тепловых потоков к охладителю. К этому времени процессы кристаллизации уже завершились.

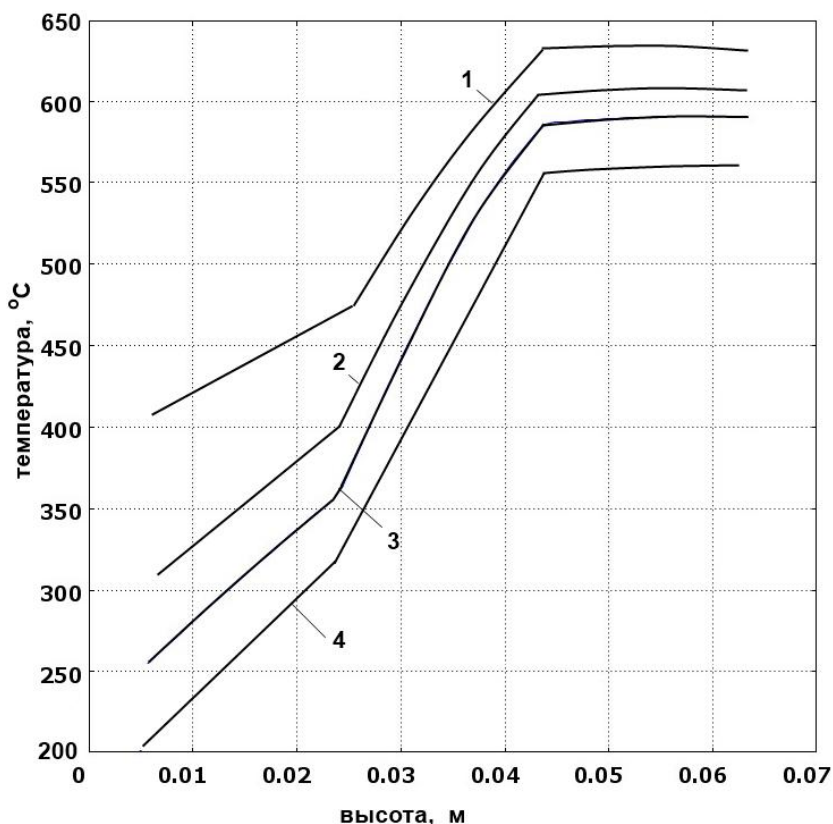


Рис. 4. Диаграммы температур на осевой линии при $r = 0.15$ м:

1 – при коэффициенте теплообмена $250 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{град})$; 2 – при коэффициенте теплообмена $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{град})$; 3 – при коэффициенте теплообмена $750 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{град})$; 4 – при коэффициенте теплообмена $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{град})$

Диаграммы температуры иллюстрируют возможность изменения скорости охлаждения за счет увеличения охлаждающих тепловых потоков. Решение этой задачи обеспечивается путем изменения площади охладителя.

Представляет интерес распределение температуры в процессе охлаждения. На рис. 5 показаны временные диаграммы в нескольких точках зоны расплавлен-

ного кремния. Интенсивность охлаждения иллюстрируется разной величиной горизонтальных участков на диаграммах. Температура снижается медленнее не только в зоне кристаллизации, но и вблизи с участками, где кристаллизация еще не завершилась.

Кристаллизация кремния приводит к увеличению коэффициента теплопроводности, но эти изменения не столь значительны, как для теплоемкости. Диаграмма температуры по высоте столба кремния определяется агрегатным состоянием (рис. 5) с постепенным перемещением границы перехода от жидкого к твердому состоянию. Расчеты для процессов охлаждения слоя жидкого кремния, налитого поверх затвердевшего слоя, показали, что при выбранной высоте расплава 0,02 м не происходит повторного расплавления нижних слоев. Диаграммы температур по высоте имеют вид, показанный на рис. 5. Если граница перехода через точку кристаллизации в начале этапа охлаждения отмечается резким переходом от практически горизонтального участка к круто падающему (см. рис. 5), то в области более низких температур (ниже 800 градусов) градиент в столбе твердого кремния гораздо меньше, чем в слое теплоизоляции.

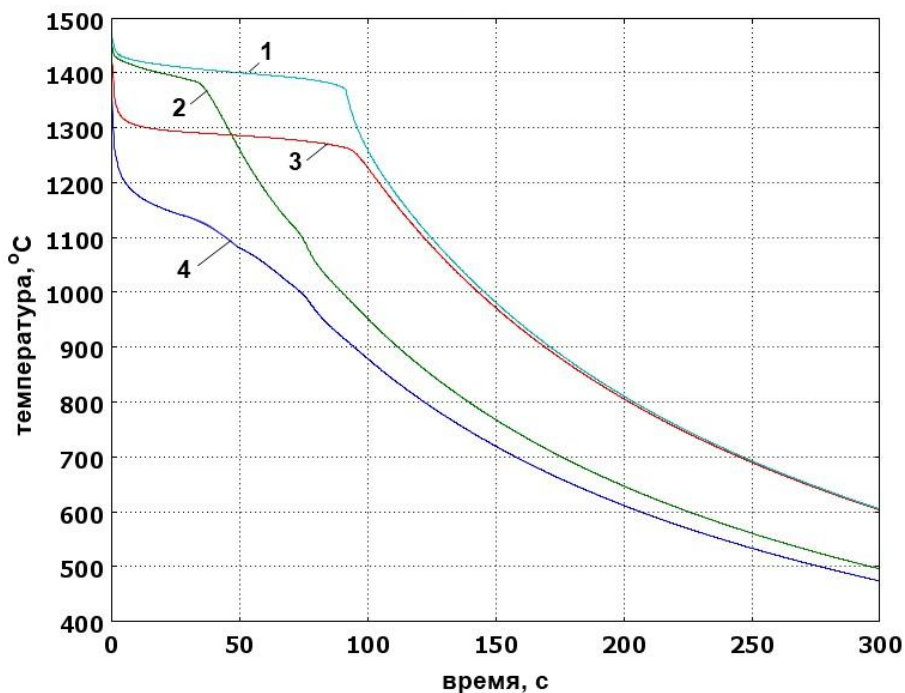


Рис. 5. Диаграммы температуры в конце первого этапа охлаждения:
 1 – $r = 0$, $z = 0.02$ м; 2 – $r = 0,15$ м, $z = 0.02$ м; 3 – $r = 0$, $z = 0$; 4 – $r = 0.15$ м; $z = 0$

Характер изменения температуры в основном определяется условиями охлаждения. Снижение мощности тепловыделения от вихревых токов зависит от изменения агрегатного состояния, но на диаграммах температуры отражается слабо.

В результате исследования процессов кристаллизации с периодическим добавлением расплава получено распределение температуры по высоте столба кремния (рис. 6). Моменты времени соответствуют кристаллизации во всем объ-

еме и значительному охлаждению. Одинаковые интервалы времени после очередного добавления порции расплава показывают постепенное увеличение среднего значения температуры.

По мере кристаллизации увеличивается слой затвердевшего кремния, сверху добавляется новая порция расплава. Увеличение высоты твердой части слитка до 0,3 м не препятствует дальнейшему процессу. Повышение уровня минимальной температуры столба кремния происходит из-за снижения эффективности охлаждения, так как тепло отводится через боковую поверхность посредством излучения, а вниз к теплообменнику – через промежуточный теплоизолирующий материал. Достижение одинакового уровня температуры по окончании каждого этапа возможно, если регулировать их длительность. Более обоснованный выбор уровня температуры кремния в конце каждого интервала перед добавлением новой порции расплава возможен при анализе термонапряжений и решении задачи оптимизации [15] с критерием минимума времени процесса.

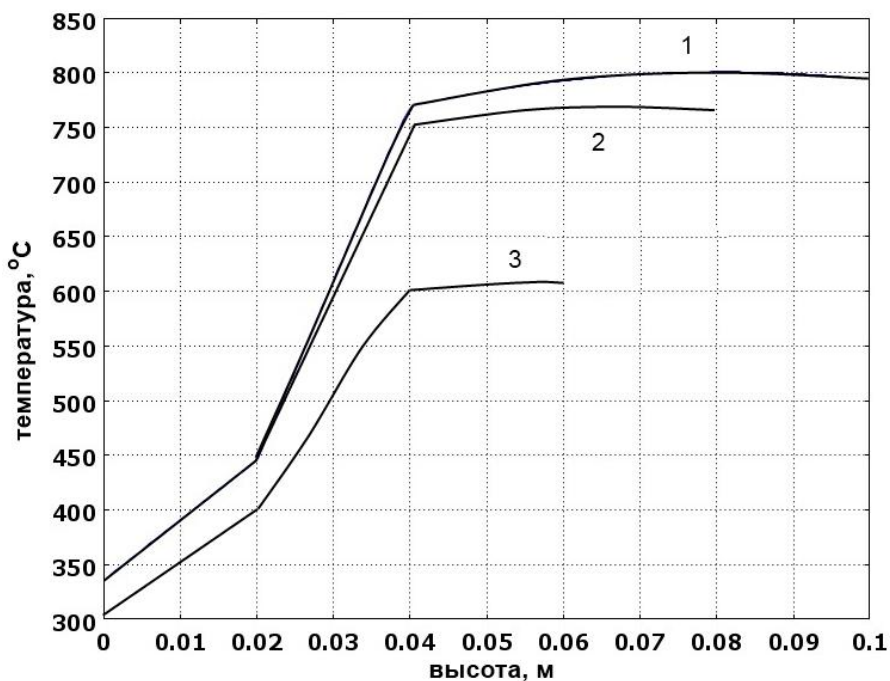


Рис. 6. Диаграммы температуры на линии вдоль боковой поверхности расплава:
1 – при $t = 900$ с; 2 – при $t = 600$ с; 3 – при $t = 300$ с

Заклучение

На основании проведенных исследований процесса кристаллизации технического кремния подтверждена идея использования магнитного поля в качестве средства для изоляции расплава от футеровки с целью повышения чистоты продукции. Применение метода конечных элементов позволило получить результаты расчета удовлетворительной точности на всех этапах моделирования, что обусловлено корректным описанием задачи, учетом нелинейностей, достаточно плотной сеткой элементов. Параметры индуктора и системы охлаждения,

найденные при анализе вариантов, позволяют обеспечить низкие энергозатраты и малое время кристаллизации кремния с повышенной степенью чистоты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гецелев З.Н., Балахонцев Г.А., Квасов Ф.И. и др.* Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор. – М.: Металлургия, 1983. – 152 с.
2. *Глазов В.М., Щеликов О.Д.* Объемные изменения при плавлении и нагреве расплавов кремния и германия // Теплофизика высоких температур. – 2000. – Т. 38, № 3. – С. 429–436.
3. *Магомедов Я.Б., Гаджиев Г.Г.* Высокотемпературная теплопроводность кремния в твердом и жидком состояниях // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 46, № 3. – С. 466–467.
4. *Барботько М.А.* Численное моделирование термических напряжений и деформаций в цилиндре с упругопластической оболочкой и вязкоупругим наполнителем // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2018. – № 4 (37). – С. 16–23.
5. *Базаров А.А., Навасардян А.А.* Система индукционного нагрева в производстве технического кремния // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 1. – С. 87–95.
6. *Колядов Е.В., Герасимов В.В., Висик Е.М., Межин Ю.А.* Литье методом направленной кристаллизации с управляемым градиентом температуры на фронте кристаллизации // Литейное производство. – 2016. – № 8. – С. 24–26.
7. *Chakraborty S., Ganguly S., Talukdar P.* Determination of optimal taper in continuous casting billet mould using thermo-mechanical models of mould and billet / Journal of Materials Processing Technology. – Volume 270, August 2019, P. 132–141.
8. *Елизарян А.С., Зимин Л.С.* Электродинамические процессы при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 1. – С. 156–159.
9. *Певчев В.П., Стрижакова Е.В., Овсянников В.Н.* Расчет параметров линейного асинхронного двигателя для системы перемешивания расплава // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 135–144.
10. *Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э., Сокунов Б.А., Урманов Ю.Р.* Снижение энергозатрат в металлургическом производстве за счет применения МГД-технологий // Промышленная энергетика. – М.: Научно-техническая фирма «Энергопрогресс», 2016. – № 12. – С. 21–27.
11. *Соколовская Л.А., Мамшиев В.А.* О математическом моделировании задач с фазовыми переходами в металлургии и литейном производстве // Процессы литья. – 2009. – № 2. – С. 24–29.
12. *Балакин Ю.А., Завалишин И.В., Шумская Л.П.* Разработка теоретических основ инновационных технологий внешнего воздействия на кристаллизацию металлов // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – № 2 (129). – С. 23–30.
13. *Лыков А.В.* Теплообмен. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
14. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
15. *Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Животягин Д.А.* Параметрический анализ и оптимальное проектирование индукционной системы по критерию максимального коэффициента полезного действия // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 143–153.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2019 года

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC AND THERMAL PROCESSES IN AN INDUCTIVE CRYSTALLIZER OF SILICON

A.A. Bazarov, A.A. Navasardyan

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Abstract. *This publication describes a set of questions on computer simulation of electromagnetic and thermal processes in an induction crystallizer of a silicon melt, in which forces are created between the melt and the inductor coil, compressing a column of liquid material and preventing direct contact of the melt with the crucible walls. In the well-known induction systems using electromagnetic pressure on the molten metal, the parameters of the inductor are chosen for crystallization so that with sufficient force there will be no increase in temperature due to internal heat sources. The solution to this problem is achieved by reducing the frequency of the current. Heat removal mainly occurs through contact with a water-cooled support surface.*

The aim of the work is to determine the process parameters at which the formation of the required electromagnetic force on the wall of the melt takes place, taking into account the sharp decrease in current density at the interface between the solid and liquid phases of silicon. Silicon in a liquid state has a low value of electrical conductivity, which is reflected in the reduction of currents. Mathematical modeling of thermal processes in the melt takes into account the process of transition from a liquid to a solid state with the release of heat of melting. The use of built-in mathematical tools in the software package allows for the correct selection of the finite element mesh and parameters of the procedure for approximating the crystallization process by obtaining a local change in the specific heat capacity to obtain the temperature distribution in space during the movement of the crystallization front.

In determining the parameters of induction crystallizers, the temperature dependences of the thermophysical properties were used. Investigations of the implementation of the inductor, allowing to cover the entire volume of the melt or its part under the condition of continuous movement after solidification of the metal, which is accompanied by a change in the electrical conductivity of silicon and the power of internal heat sources. The results of the study showed the possibility of using the mold at different ratios of the height and diameter of the melt column, and the cooling intensity. The efficiency of the process for silicon increases with decreasing height and increasing the radius of the melt column.

Keywords: *induction heating, crystallization, silicon, finite element method, electromagnetic casting.*

REFERENCES

1. *Getslev Z.N., Balakhontsev G.A., Kvasov F.I. e dr. Nepreryvnoye lit'ye v elektromagnitnyy kristallizator. – M.: Metalluggiya, 1983. – 152 c.*
2. *Glazov V.M., Shchelikov O.D. Ob'yemnye izmeneniya pri plavlenii i nagreve rasplavov kremniya // Teplofika vysokikh temperature. – 2000, tom 38, № 3. – s. 429–436.*
3. *Magomedov Ya.B., Gadzhiev G.G. Vysokotemperaturnaya teploprovodnost' kremniya v tverdom i zhidkom sostoyaniyakh // Teplofika vysokikh temperature. – 2009, tom 46, № 3. – s. 446–467.*
4. *Barbot'ko M.A. Chislennoye modelirovaniye termicheskikh napryazheniy i deformatsiy v tsilindre s uprugoplasticheskoy obolochkoy i vyazkoupругim zapolnitilem / Vestnik inzhenernoy shkoly*

Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Ashot A. Navasardyan, Postgraduate Student.

- Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Izdatel'stvo: Dal'nevostochniy federal'nyy universitet (Vladivostok). № 4 (37). 2018. s. 16–23.
5. *Bazarov A.A., Navasardyan A.A.* Sistema induktsionnogo nagreva v proizvodstve tekhnicheskogo kremniya // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskkiye nauki. – 2016. – № 1. – s. 87–95.
 6. *Kolyadov Ye.V., Gerasimov V.V., Visik Ye.M., Mezhin Yu.A.* Lit'ye metodom napravlennoy kristallizatsii s upravlyayemym gradientom temperatury na fronte kristallizatsii / Liteynoye proizvodstvo. 2016. № 8. – s. 24–26.
 7. *Chakraborty S., Ganguly S., Talukdar P.* Determination of optimal taper in continuous casting billet mould using thermo-mechanical models of mould and billet / Journal of Materials Processing Technology. Volume 270, August 2019, P. 132–141.
 8. *Yegiazaryan A.S., Zimin L.S.* Elektridnamicheskiye protsessy pri induktsionnom nagreve / Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskkiye nauki. 2016. № 1. s. 156–159.
 9. *Pevchev V.P., Strizhakova Ye.V., Ovsyannikov V.N.* Raschet parametrov lineynogo asunkhronnogo dvigatelya dlya sistemy peremeshivaniya rasplava // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskkiye nauki. 2018. № 4. – s. 135–144.
 10. *Sarapulov F.N., Frizen V.E., Sokunov B.A., Urmanov Yu.R.* Snizheniye energozatrat v metallurgicheskome proizvodstve za schet primeneniya MGD-tekhnologiy / Promyshlennaya energetika. Moskva: Izdatel'stvo: Nauchno-tekhnicheskaya firma «Energopress». 2016. № 12. s. 21–27.
 11. *Sokolovskaya L.A., Mamishev V.A.* O matematicheskom modelirovanii zadach s fazovym perekhodom v metallurgii I liteynom proizvodstve // Protsessy litiya. – 2009. – № 2. – s. 24–29.
 12. *Balakin Yu.A., Zavzlishin I.V., Shumskaya L.P.* Razrabotka teoreticheskikh osnov innovatsionnykh tekhnologiy vneshnego vozdeystviya na kristallizatsiyu metallov / Kachestvo. Innovatsii. Obrazovaniye. 2016. № 2 (129). s. 23–30.
 13. *Lykov A.V.* Teplomassoobmen. – M.: Energiya, 1971. – 560 s.
 14. *Slukhotskiy A.Ye., Ryskin S.Ye.* Induktory dlya induktsionnogo nagreva. – L.: Energiya, 1974. – 264 s.
 15. *Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Zhivotyagin D.A.* Parametricheskyy analiz I optimalnoye proektirovaniye induktsionnoy sistemy po kriteriyu maksimal'nogo koeffitsiyenta poleznogo deystviya / Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Tekhnicheskkiye nauki. 2018. № 3. s. 143–153.