

На правах рукописи

Навасардян Ашот Александрович

Электромагнитный кристаллизатор кремния для получения
слитков цилиндрической формы

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2022

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный
руководитель:

Базаров Александр Александрович доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет

Официальные
оппоненты:

Кувалдин Александр Борисович доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИЭ»

Хлюпин Павел Александрович к.т.н. доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет, имени Гагарина Ю.А.» г. Саратов

Защита состоится « 4 » октября 2022 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. №200.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ», а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу <http://d21221704.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим высылать по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.04



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В отечественной и мировой энергетике наметилась устойчивая тенденция к росту возобновляемых экологически чистых источников электроэнергии. Большую долю в возобновляемой энергетике составляют солнечные (фотозлектрические) электростанции, которые требуют всё возрастающих объемов чистого кремния.

Существующие технологии производства кремния (металлургического) включают процессы плавления, очистки от примесей в нагревательных печах с его последующей кристаллизацией различными способами. На предварительных этапах расплав заливается в форму. Из-за контакта с футеровкой поверхностный слой при кристаллизации загрязняется примесями.

Наиболее рентабельным подходом для производства «солнечного» кремния является очистка металлургического кремния, что нашло отражение в работах Bathey B.R., Davis J.R. Большинство производителей кремния для солнечной энергетики используют метод направленной кристаллизации, который основан на плавке металлургического кремния чистотой 99,9% и медленной кристаллизации для доведения чистоты до 99,999%.

В промышленности применение электромагнитных кристаллизаторов используется в производстве сплавов из цветных металлов. В процессе получения кремния использование подобных индукционных систем осложнено значительным снижением электропроводности кремния при переходе в твердое состояние. Необходимость создания достаточных для удержания расплава сил вступает в противоречие с дополнительным нагревом, что затрудняет процесс кристаллизации. Применение электромагнитных кристаллизаторов в производстве кремния способно решить задачу получения продукта высокой чистоты при снижении затрат.

Степень разработанности проблемы

Электромагнитные кристаллизаторы, использующиеся в цветной металлургии освещены в трудах отечественных и зарубежных ученых. В работах З.Н. Гецелова, Г.А. Балахонцева, Герасимова В.В., и др. рассмотрены вопросы реализации электромагнитного кристаллизатора с управляемым градиентом температуры в слитках из алюминия. Применение подобного подхода к процессу кристаллизации кремния делает ненужной дополнительную очистку от примесей и снижает общие затраты на производство.

В производстве кремния в данное время известна технология индукционного подогрева тигля плоскими индукторами. В трудах G. Djambazov, M. Forzan описана работа кристаллизатора, имеющего улучшенные характеристики за счет индукционного нагрева графитового тигля с кремнием. Возникающие токи и электромагнитные силы в расплаве кремния в этом случае незначительны из-за экранирования корпусом тигля.

В отличие от электромагнитных кристаллизаторов алюминия с непрерывным режимом водяного охлаждения кристаллизаторы кремния имеют ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при

их проектировании и эксплуатации. В настоящее время не разработано приемлемых по точности методов анализа электромагнитных процессов, происходящих в расплаве кремния и самом индукционном кристаллизаторе в процессе перехода расплава в твердое состояние. Поэтому разработка уточненных математических моделей системы «индуктор-расплава кремния» и алгоритмов программного управления технологическим процессом с целью повышения качества продукта и повышения энергоэффективности является актуальной научно-практической задачей. Актуальность проблемы подтверждается грантом на фундаментальную НИР при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212А по заданию Министерства образования РФ.

Цель диссертационной работы - повышение производительности электромагнитного кристаллизатора и качества кремниевых слитков за счет применения усовершенствованных методик проектирования и использования нового алгоритма управления мощностью индуктора в процессе кристаллизации, позволяющего повысить энергоэффективность процесса.

Объектом исследования является индукционная установка электромагнитного кристаллизатора кремния, обеспечивающая изготовление слитков цилиндрической формы.

Предмет исследования - электромагнитные и тепловые процессы при кристаллизации цилиндрического кремниевого слитка, сжимаемого магнитным полем индуктора.

Задачи диссертационного исследования:

- разработка численной математической модели теплового процесса в расплаве кремния в условиях индукционного подогрева и комбинированного охлаждения, ориентированной на решение задач исследования переходных режимов и определения параметров процесса кристаллизации расплава при программном управлении;
- разработка численной модели электромагнитных процессов в системе «индуктор – расплава кремния», ориентированной на определение распределения внутренних источников тепловыделения и расчет электромагнитных сил в поверхностном слое в условиях резкого изменения электропроводности при кристаллизации;
- исследование электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор–загрузка» в переходных режимах с учетом изменяющихся физических свойств в процессе кристаллизации расплава;
- определение геометрических и энергетических параметров устройства кристаллизации расплавленного кремния, обеспечивающих получение цилиндрической формы слитка с допустимыми отклонениями;
- минимизация времени кристаллизации и энергозатрат в индукционной системе кристаллизатора;
- разработка методики проектирования электромагнитного кристаллизатора кремния с заданными параметрами;
- разработка и техническая реализация системы программного управления режимами работы электромагнитного кристаллизатора.

Решение перечисленных выше проблем в совокупности составляет основное содержание диссертации, выполненной автором в Самарском государственном техническом университете.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы математического моделирования и анализа, теории тепловых и электромагнитных процессов, численные методы решения электромагнитных и тепловых задач, методы проектирования и компьютерного моделирования.

Научная новизна

1. Разработана уточненная математическая модель нестационарного теплового процесса кристаллизации кремния, отличающаяся учетом неравномерного по объему изменения мощности внутренних источников тепла и физических свойств расплава.

2. Впервые решена комплексная задача моделирования электромагнитных и тепловых процессов при поиске алгоритма изменения мощности тепловыделения и электромагнитных сил в электромагнитном кристаллизаторе.

3. Определена область параметров расплава и индуктора, в которой возможно функционирование электромагнитного кристаллизатора кремния в условиях взаимных ограничений на электромагнитные силы и мощность тепловыделения, выражающихся в необходимости увеличения сил и снижения мощности тепловыделения.

Практическая значимость результатов работы

Практическая польза проведенных исследований определяется следующими результатами:

1. Предложены алгоритм и система управления процессом кристаллизации расплава кремния, отличающиеся учетом изменения объемного распределения электропроводности и коррекцией мощности индуктора для обеспечения нестационарного желаемого распределения электромагнитных сил по высоте слитка.

2. Разработана методика проектирования электромагнитного кристаллизатора кремния, учитывающая изменение физических свойств и обеспечивающая формирование цилиндрической поверхности слитка в условиях изменения электромагнитных сил, действующих на загрузку.

3. Определены изменяющиеся в ходе процесса кристаллизации параметры индукционной системы, обеспечивающие получение цилиндрической формы слитка.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая электротепловая модель процесса электромагнитной кристаллизации расплава кремния, учитывающая изменение параметров при переходе через точку затвердевания.

2. Алгоритм управления процессом кристаллизации расплава кремния периодического действия, обеспечивающий достижение нестационарного желаемого распределения электромагнитной силы и распределения

температуры в расплаве в условиях изменения импеданса индуктора и формирование цилиндрической формы слитка.

3. Алгоритм управления процессом кристаллизации расплава кремния методического действия, обеспечивающий поддержание заданного распределения электромагнитной силы в расплаве в условиях изменения высоты слитка.

4. Методика расчета индукционной системы электромагнитного кристаллизатора кремния, позволяющая определить параметры системы, обеспечивающей формирование цилиндрической формы слитка с минимальными термонапряжениями.

5. Электромагнитный кристаллизатор кремния периодического действия, обеспечивающий формирование слитка однородной ненапряженной структуры с малым искажением цилиндрической формы.

6. Электромагнитный кристаллизатор кремния методического действия с минимальным энергопотреблением, обеспечивающий формирование цилиндрического слитка

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует специальности 05.09.10 – Электротехнология по п.1. «Развитие общей теории передачи электромагнитной энергии в сложные среды, разработка методов физического и математического моделирования явлений, возникающих при взаимодействии электромагнитного поля с веществом и конструктивными материалами технологических установок», п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнологических комплексов и систем, их оптимизация, разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата и согласованием с данными, известными из литературы.

Апробация работы

Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Двадцать третьей Международной науч.-техн. конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (2 – 3 марта 2017 г., Москва); XXV Международной научно-практической конференции «EurasiaScience» (15 ноября 2019., Пенза); 6-th International conference on industrial engineering (ICIE 2020) (Chelyabinsk, 18-22 мая 2020 г.); Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020); XLIV Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы; достижения и инновации». (15 апреля, 2021, Пенза); XIX Международной научно-практической конференции «Современная наука: Актуальные вопросы, достижения и инновации» (25 февраля, 2021, Пенза).

Личный вклад автора в диссертационное исследование. Лично автором разработаны элементы математической и компьютерной моделей электромагнитных и тепловых процессов электромагнитного кристаллизатора периодического и методического действия; выполнены

расчеты параметров индукторов и распределений сил, действующих на расплав; осуществлена постановка задачи, моделирование и анализ эффективности алгоритмов работы электромагнитного кристаллизатора; проведено определение параметров схемы и моделирование нестационарных электромагнитных процессов в системе «индуктор – расплав».

По материалам диссертации опубликованы 9 печатных работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья индексирована в БД Scopus.

Реализация результатов работы

Результаты исследований электромагнитных и тепловых процессов в электромагнитном кристаллизаторе кремния в части методики проектирования, математических моделей, компьютерного моделирования внедрены в ООО «Вольтс» (г.Самара) в качестве методики расчета индукционных систем для технологического подогрева и в учебном процессе СамГТУ (г.Самара) при подготовке бакалавров по профилю «Электротехнологические установки и системы», магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 175 страницах машинописного текста; содержит 90 рисунков и 57 таблиц, список использованных источников, включающий 82 наименования, 3 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель и основные задачи исследования, приведена краткая информация об объекте исследования, характеризуется новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, приведена информация о публикациях по теме диссертации и ее апробации на конференциях, определен личный вклад автора в диссертационное исследование.

В первой главе проведен анализ существующих технологий выплавки и кристаллизации кремния

Металлургический кремний производится карботермическим восстановлением из песка. Для применения кремния в солнечной энергетике требуется дальнейшее увеличение чистоты. Существуют химические и металлургические методы производства кристаллического кремния, пригодного для производства солнечных панелей. В химических способах производство кремния высокой чистоты происходит путем пиролиза летучих соединений кремния. Основной металлургический метод, получивший широкое распространение, - это направленная кристаллизация.

Исходным материалом для получения кремния является диоксид кремния. Он проходит стадию карботермического восстановления в дуговых рудовосстановительных печах при смешивании песка, угля и кокса. В результате восстановления образуется кремний металлургической чистоты до 99,9%. Для дальнейшего повышения чистоты кремния используется метод направленной кристаллизации кремния в вакуумных печах.

Печи направленной кристаллизации основаны на хорошо

зарекommenовавшей себя технологии, однако проводятся исследования для повышения качества продукции и снижения производственных затрат. Лучшие показатели процесса литья слитков мультикристаллического кремния обеспечиваются с помощью печи, использующей индукционный нагрев. Печь содержит три независимые индукционные системы: верхний индуктор для управления температурным градиентом; нижний индуктор служит для нагрева во время процесса плавления; боковые плоские индукторы позволяют контролировать форму фронта кристаллизации.

Совершенствованию показателей технологического процесса посвящены работы по численному моделированию процесса направленной кристаллизации авторов Лигуо Чен и Бин Дай, которые рассмотрели вопросы оптимизации энергопотребления в системе направленной кристаллизации кремния. Снижение производственных затрат является постоянным требованием в промышленности. В системе направленной кристаллизации кремния была изменена геометрия конструкции при поиске вариантов для экономии энергии. Кроме того, выполняются задачи численного моделирования, чтобы глубже изучить физику процессов, протекающих в установках. М. Кабела и К. Зайдат провели исследование затвердевания кристаллического кремния при контролируемой принудительной конвекции.

Во второй главе рассмотрены вопросы построения математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в кристаллизаторе.

Использование электромагнитных сил, необходимых для удержания расплава, предполагает решение задачи расчета индуктора. В работах З. Н. Гецелева, Первухина М.В., Авдулова А.А рассмотрены подобные задачи, связанные с кристаллизаторами алюминия и сплавов цветных металлов. Формирование распределения температуры должно осуществляться с учетом внутренних источников тепла, тепловых потоков, обусловленных всеми видами теплообмена между расплавом, теплоизоляцией и охладителем, а также окружающей средой.

Величина тока в расплаве должна обеспечить необходимую величину электромагнитной силы и давления, чтобы компенсировать гидростатическое давление столба жидкости. В то же время в кремнии при использовании индукционного нагрева происходит выделение большого количества тепла.

Важное значение имеет исследование процессов упругой деформации, вызываемых кристаллизацией в условиях значительных перепадов температуры. На рост кристаллов и их форму влияют различные условия. Эти вопросы рассмотрены в работах Китаева Е.М., Дюдкина Д.А.

Электромагнитная задача формулируется в виде уравнений Максвелла, описывающих связь между основными электромагнитными величинами, такими как напряженность магнитного поля и индукция. Более удобно в расчетах использовать формулировку с использованием векторного магнитного потенциала \vec{A} . Для перехода к численному решению исходная система преобразуется в терминах векторного магнитного потенциала к виду:

$$(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \left(\frac{\sigma \mathbf{V}_{um}}{2\pi r} + \mathbf{J}_\varphi^e \right); \quad (1)$$

Здесь: $\omega = 2\pi f$ - круговая частота; μ_r - относительная магнитная проницаемость среды; $V_{витт}$ - потенциал витка; J_φ^e - плотность стороннего тока; φ - сдвиг по фазе вектора тока относительно напряжения.

В качестве граничных условий принимается равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе расчетной области

$$A_\varphi = A_{0\varphi} \quad (2)$$

На базе основного дифференциального уравнения и граничных условий осуществляется переход к конечно-элементной формулировке и строится система алгебраических уравнений.

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

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(J_z \sigma^{-1} J_z^* \right). \quad (3)$$

На расплав кремния со стороны катушки индуктора действуют силы Лоренца, определяемые векторным произведением плотности тока и индукции

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}. \quad (4)$$

Отталкивающие силы в жидком кремний имеют две составляющие, создающие эффект перемешивания.

Тепловая задача формулируется с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой.

В качестве исходной модели принято нелинейное уравнение теплопроводности вида

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right] - \rho L \frac{\partial b}{\partial t} + Q; \quad (5)$$

с начальными условиями

$$T(r, x, 0) = T_0, \quad (6)$$

и граничными условиями двух видов:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (7)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 [T(R, x, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(R, x, t) - T_{wall}^4]. \quad (8)$$

Здесь: C - удельная теплоемкость; L - удельная теплота плавления; b - подвижная граница раздела твердой и жидкой фаз кремния; ρ - плотность; λ - теплопроводность; Q - плотность внутренних источников тепла; α_i - коэффициенты конвективного теплообмена на поверхностях загрузки и футеровки; ε - степень черноты загрузки и футеровки; T_{wall} - температура внутренней стенки футеровки, T_{ext} - температура окружающей среды.

В выражении (5) содержатся две неизвестные – температура T и граница b раздела жидкой и твердой фаз. Добавление теплоты плавления в

теплоемкость с помощью ступенчатой функции позволяет учесть повышение теплосодержания и исключить переменную b из уравнения (5).

В процессе затвердевания могут возникать замкнутые области с жидких кремнием, ограниченные твердыми границами. Значительное уменьшение объема материала при кристаллизации приводит к возникновению деформаций и напряжений.

Расчет перемещений и концентрации напряжений в элементах конструкций сводится к определению компонентов векторов перемещений точек тела $\{\Delta\}$, деформаций $\{\varepsilon\}$, и напряжений $\{\sigma\}$.

В статической задаче компоненты вектора напряжений должны удовлетворять уравнениям равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + p_{v_x} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + p_{v_y} = 0; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + p_{v_z} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где p_{v_x} , p_{v_y} , p_{v_z} – компоненты вектора массовых сил. Три других уравнения равновесия в виде сумм моментов внутренних сил относительно координатных осей приводят к известным условиям парности касательных напряжений $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$.

Замкнутая система уравнений краевой задачи получается из уравнений (9), дополненных физическими уравнениями, связывающими векторы напряжений $\{\sigma\}$ и деформаций $\{\varepsilon\}$.

Внешние силы обусловлены деформацией через коэффициент линейного расширения с температурой

$$\{\varepsilon^0\} \equiv \{\varepsilon^T\} = \alpha \Delta T \{1 \ 1 \ 1 \ 0\}^T. \quad (10)$$

Здесь: α - коэффициент линейного температурного расширения; ΔT - перепад температур.

В третьей главе рассмотрены вопросы моделирования процессов в электромагнитном кристаллизаторе кремния периодического действия.

Электромагнитное поле индуктора при взаимодействии с токами в расплаве кремния создает отталкивающие силы. Одновременно токи в кремнии обеспечивают выделение тепла.

Параметры индуктора должны обеспечить усилия на боковой поверхности слитка. Для этого производится определение гидростатического давления по высоте расплава. Гидростатическое давление расплавленного кремния снижается с максимального значения в нижней части до нуля в верхней части. Разница двух давлений (гидростатического и электромагнитного) при условии постоянства электромагнитной силы по

высоте приводит к образованию конической формы расплава, а затем и слитка.

Для расчета принят индуктор конической формы с цилиндрической загрузкой (рис.1), разбитой на слои, в которых рассчитываются силы.

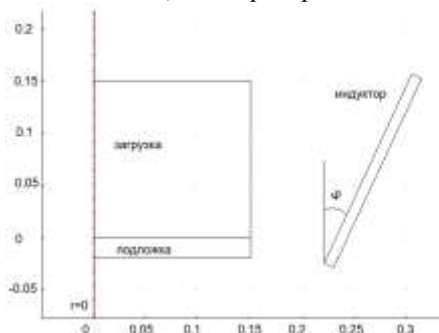


Рис.1. Индуктор с загрузкой: φ - угол наклона направляющей конуса.

В качестве исходной конструкции индуктора служит катушка высотой 0,15 м, что совпадает с высотой загрузки. Исследования влияния длины индуктора (высоты) и угла наклона направляющей конуса определили лучшее значение угла наклона направляющей, равное 25 градусов. В расчетах при одинаковом токе индуктора для разных вариантов производилось изменение длины индуктора и сдвига по высоте относительно основания загрузки (рис.2).

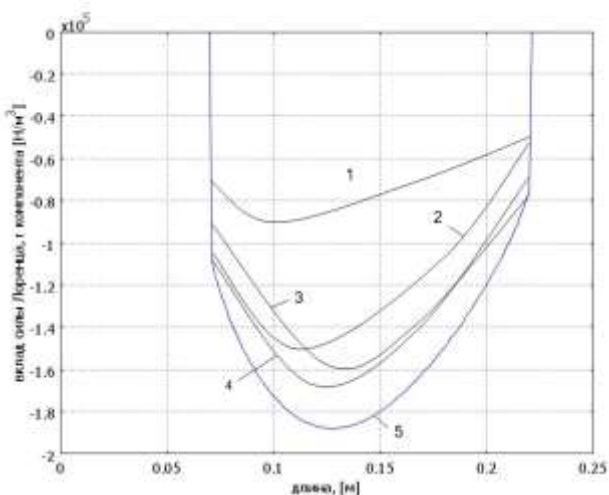


Рис.2 Диаграмма распределения силы Лоренца по высоте загрузки: 1 – длина индуктора 0,3 м, сдвиг по высоте – 0,15 м; 2 - длина индуктора 0,2 м, сдвиг по высоте – 0,05 м; 3 - длина индуктора 0,2 м; 4 - длина индуктора 0,17 м, сдвиг по высоте – 0,02 м; 5 - длина индуктора 0,15 м.

В целом, для всех вариантов наблюдается значительное снижение усилия в основании, что объясняется малой длиной индуктора.

Проведено исследование влияния параметров подложки на диаграмму распределения силы Лоренца по высоте на боковой поверхности расплава.

С целью выравнивания распределения силы Лоренца по высоте расплава были выполнены расчеты для подложки из различных электропроводящих материалов со значениями электропроводности $\sigma = 10^6$ См/м, $\sigma = 5 \cdot 10^5$ См/м, $\sigma = 10^5$ См/м.

Из рис.3 видно улучшение формы по сравнению с расчетами для кристаллизатора с диэлектрической подложкой, но увеличение электропроводности материала подложки или увеличение длины (высоты) индуктора приводит к значительному увеличению мощности тепловыделения в подложке, что усложняет задачу охлаждения.

На правом краю диаграмм сила снижается до 18% от максимального значения при значении электропроводности материала подложки $\sigma = 10^5$ См/м и до 21% при значении электропроводности материала подложки $\sigma = 10^6$ См/м.

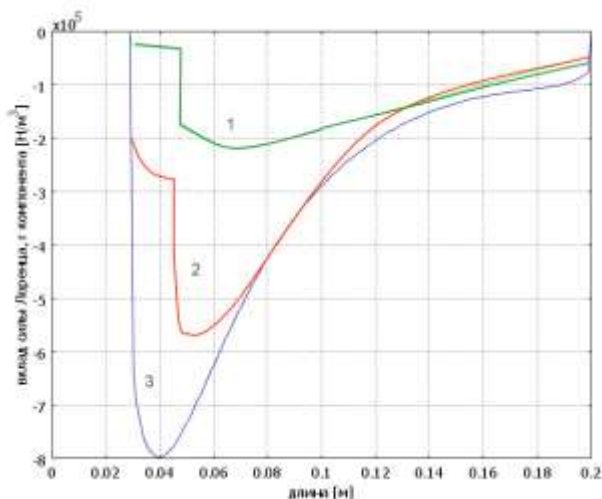


Рис.3 Диаграммы плотности силы Лоренца на боковой поверхности загрузки радиусом 0,3 м высотой 0,15 м при электропроводности подложки:

1 - $\sigma = 10^5$ См/м; 2 - $\sigma = 5 \cdot 10^5$ См/м; 3 - $\sigma = 10^6$ См/м.

Как видно из диаграмм, наблюдается нелинейная зависимость плотности силы от аксиальной координаты, отсутствуют варианты, полностью удовлетворяющие одновременно требованиям линейного характера зависимости и снижения силы в верхней части слитка.

Применение в качестве подложки стали ($\sigma = 10^6$ См/м), привело к значительному увеличению силы тока и силы Лоренца в левой части. Последующее снижение силы на правом краю диаграмм по отношению к максимальному значению происходит по нелинейному закону.

Для материала подложки при значении электропроводности $\sigma = 10^5$

См/м зависимость силы от высоты имеет более близкую к прямой линии форму. На правом краю диаграмм сила снижается до 21% от максимального значения при значении электропроводности материала подложки $\sigma = 10^5$ См/м и до 26% при значении электропроводности материала подложки $\sigma = 10^6$ См/м. Таким образом, улучшение соотношения сил в нижней части боковой поверхности сопровождается ухудшением соотношения сил в верхней части.

Расчеты для индукторов с различными геометрическими параметрами показали сложность формирования линейного распределения силы Лоренца по высоте загрузки. Выявлена нецелесообразность использования индукторов большой длины.

Увеличение производительности кристаллизатора при большей высоте и радиусе слитка приводит к необходимости повышения мощности индуктора. При кристаллизации слитка радиусом 0,15 м мощность тепловыделения составляет 15 кВт, а для слитка радиусом 0,3 м она увеличивается до 100 кВт.

Проведены расчеты формы расплава, которая обеспечивает баланс электромагнитных сил и сил гидростатического давления по высоте. В слоях с избыточной силой радиус уменьшается. Итоговые значения радиусов слоев отличаются от заданного на 0,2% – 24,6%. Минимальное отклонение радиуса получено в нижней части слитка, а максимальное в верхней части.

В исследуемом электромагнитном кристаллизаторе индуктор имеет коническую форму, что приводит к проявлению продольных усилий, способствующих движению расплава.

В качестве примера взят вариант с полностью жидким расплавом. Высота слитка 0,15 м, радиус слитка 0,15 м. При мощности тепловыделения в расплаве, равной 15 кВт, интегральное значение вдоль оси z равно 88 Н, а вдоль оси r -193 Н.

Воздействие силы F_z на расплав проявляется в формировании процесса перемешивания. Перемешивание расплава способствует переносу тепла между различными областями. Это явление могло бы замедлить процесс кристаллизации, но в данном случае нижние слои охлаждаются интенсивнее верхних и служить источником тепла для верхних слоев не могут.

Моделирование тепловых процессов при кристаллизации расплава кремния в условиях подогрева внутренними источниками

Процесс кристаллизации происходит при отводе тепла через основание загрузки посредством потоков, обусловленных теплопроводностью, а также тепловых потоков с боковой и верхней поверхностей, обусловленных, в основном, излучением.

В нижней часть корпуса располагается тонкая кремниевая подложка, чтобы на начальном этапе кристаллизации не было контакта расплава с футеровкой. Под основанием футеровки располагается теплообменник в виде медной трубки с проточной водой.

Между верхней поверхностью загрузки и окружающей средой теплообмен задается в виде потока излучения в окружающую среду. Между

поверхностями загрузки и футеровки используется взаимный теплообмен излучением.

Внешняя сторона футеровки контактирует с индуктором, что увеличивает тепловые потоки и скорость охлаждения. Граничные условия задаются в виде конвективного теплообмена с коэффициентом теплообмена от 10 до $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для исследования принята загрузка радиусом 0,15 м высотой 0,15 м.

В результате ряда расчетов тепловых процессов в загрузке определены параметры, дающие лучший результат: коэффициент конвективного теплообмена для боковой стенки футеровки - $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; для основания - $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$. Крышка футеровки – задан постоянный тепловой поток 2,5 кВт; коэффициент теплопроводности боковой стенки футеровки принят равным $2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$.

Исследование распределений температуры в различные моменты времени показало наличие двух фронтов кристаллизации, движущихся к осевой линии на верхней поверхности (рис.4).

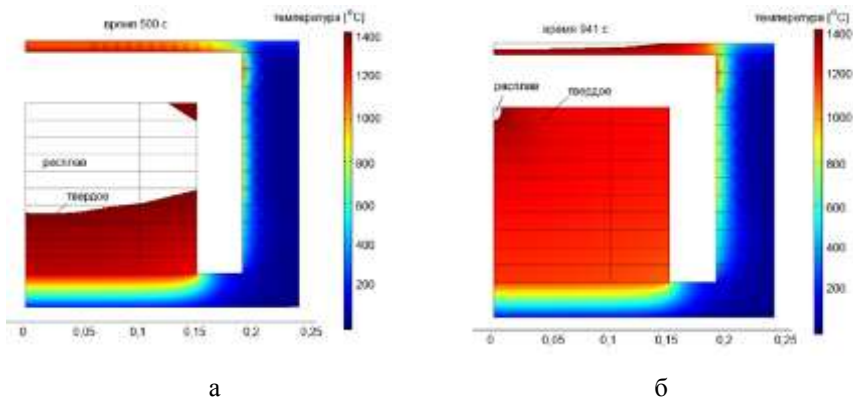


Рис.4 Распределение температуры в расплавленной части загрузки в моменты времени: а – 500 с; б - 941 с

Однако фронт затвердевания, движущийся от боковой стенки, не привел к смыканию в виде верхней корки. Таким образом, процесс кристаллизации завершился в центре верхней поверхности. Такой вариант исключает возникновение опасных термонапряжений. Возможно только искажение формы цилиндра в виде впадины.

Результаты расчета тепловых потоков и мощности тепловыделения, представленные в табл.1, показали общее увеличение значений тепловых потоков, а также длительность процесса кристаллизации.

Верхняя крышка взята уменьшенной толщины (0,01 м) для ускорения прогрева и повышения температуры, чтобы снизить тепловой поток с верхней поверхности слитка.

Максимальное значение теплового потока составляет 36,9 кВт. Мощность

тепловыделения равна 12,2 кВт. Кроме того, мощность нагревателя верхней крышки равна 2,5 кВт.

Проведенные расчеты показали, что при массе загрузки, равной 24 кг, удельные энергозатраты составляют $W/M=13,74/24=0,575$ МДж/кг.

Таблица 1

время	0	600	1200	2400	3600
$Q_{\text{верх}}$, кВт	21,1	5,2	-1,9	-2,1	-1,8
$Q_{\text{бок}}$, кВт	13	9,6	3,1	0,8	0,4
$Q_{\text{низ}}$, кВт	2,8	15,9	12,9	6,7	4,6
$Q_{\text{сум}}$, кВт	36,9	30,7	14,1	5,4	3,2
P, кВт	12,2	5,7	1,5	1,5	1,5

В табл.2 показаны основные показатели для нескольких вариантов расчета. Кроме энергозатрат показана возможность ведения процесса кристаллизации с положительным результатом – формирование кристаллической структуры без возможных внутренних напряжений и дефектов. Конвективный теплообмен в верхней части проходит при коэффициенте $\alpha_{\text{верх}}=5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Коэффициент теплопроводности материала основания равен $\lambda_{\text{ниж}}=5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Таблица 2

Параметры тепловых процессов при кристаллизации расплава кремния

Вариант	1	2	3	4	5	6
$\alpha_{\text{бок}}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	100	5	5	5	5	5
$\alpha_{\text{ниж}}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	1000	300	1000	1000	1000	1000
$\lambda_{\text{бок}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	2	2	2	1	0,5	2
$\lambda_{\text{верх}}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	-	-	2	1	0,5	1
$Q_{\text{сум}}$, кВт	43,2	43,2	34,1	39,2	39,4	36,9
W, кДж	5315	5735	5370	8325	5901	9780
$t_{\text{крист}}$, с	700	750	700	1120	920	940

Кристаллизация во всех вариантах, кроме 6, завершается внутри слитка и приводит к большим термонапряжениям. В последнем варианте предусмотрен подогрев крышки с мощностью 2,5 кВт.

Вариация коэффициентов теплопроводности материала теплоизоляции, коэффициентов конвективного теплообмена на боковой и верхней поверхностях теплоизоляции показали невозможность обойтись только этими средствами для достижения заданного распределения температуры в слитке.

Особое требование заключается в завершении процесса кристаллизации на поверхности, чтобы не возникли внутренние пустоты. Этому требованию

удовлетворяет один вариант №6, в котором верхняя часть теплоизоляции снабжена подогревателем.

Для оценки термонапряжений в процессе кристаллизации расплава кремния выполнен расчет для варианта с футеровкой без верхней крышки.

Для иллюстрации построены распределения температуры и напряжений для моментов времени 1500 с и 3000 с (рис.5,6). Область с температурой выше температуры плавления показана белым цветом, чтобы сделать более наглядным фронт кристаллизации.

Окончание процесса кристаллизации происходит во внутренней области. Это приводит к напряжениям, так как вокруг жидкой фракции уже сформировалась твердая область. Так как при затвердевании происходит уменьшение объема, неизбежно возникают растягивающие силы.

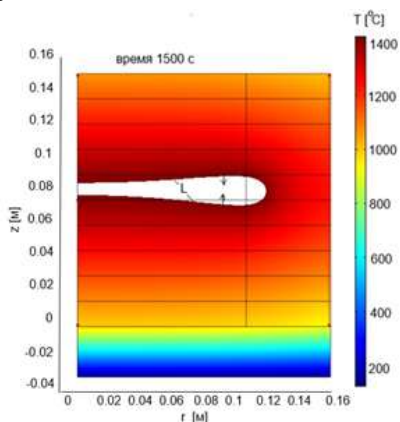


Рис. 5 Фронт кристаллизации в моменты времени 1500 с.

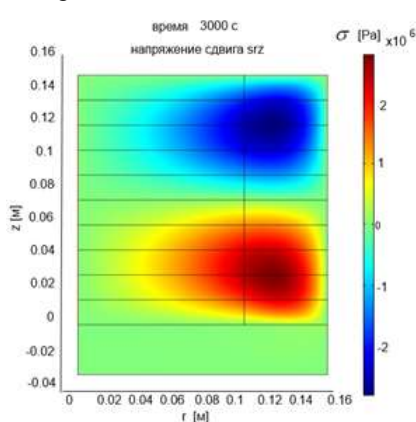


Рис.6 Напряжение сдвига загрузке в момент времени 3000 с.

В результате расчета термонапряжений для каждого момента времени могут быть построены распределения различных напряжений. На рис.7 показано распределение напряжения сдвига для момента времени 3000 с. Возникают отчетливые области с разными направлениями сдвига.

Формально величина напряжений далека от предельных значений для кремния. Однако процесс кристаллизации не проходит без последствий для целостности кристаллической структуры слитка. В результате процесса термоусадки, хорошо известного в металлургии, возникают не только локальные дефекты кристаллической структуры, но и появляются явные трещины разной длины и направления.

Для надежного предотвращения внутренних повреждений в слитке необходимо обеспечить исключение завершения кристаллизации во внутренней области слитка.

В четвертой главе рассмотрены вопросы моделирования процессов в электромагнитном кристаллизаторе кремния методического действия

В индукционной установке при дискретном повышении уровня расплава с последующей кристаллизацией происходит изменение интегральных

параметров индуктора. В тигель цилиндрического индуктора заливается небольшой по толщине слой расплава кремния на подложку, через которую тепло передается к охладителю.

В результате моделирования системы, состоящей из слоев кремния и катушки индуктора, определяются значения напряжения и мощности индуктора. Для каждого слоя выполняется два расчета параметров индуктора – с жидким и затвердевшим кремнием в последнем слое.

Обеспечение отталкивающей силы, равной 5 Н, достигается при задании тока 5760 А в одновитковом индукторе. (Переход к многовитковому индуктору выполняется с учетом значения ампер-витков $I_{инд}^1 = w \cdot I_{инд}$.) При этом мощность в нагрузке (слой расплава) должна быть равна 1000 Вт. Распределение силы Лоренца по толщине имеет большее значение в поверхностном слое, что обеспечивается при использовании напряжения частотой 500 Гц.

По мере роста числа слоев происходит увеличение мощности в нагрузке и снижение импеданса индуктора. Переход кремния из жидкого в твердое состояние для каждого слоя приводит к циклическому ступенчатому изменению параметров. Приведенная на рис.7 диаграмма иллюстрирует для каждого слоя изменение активной мощности индуктора.

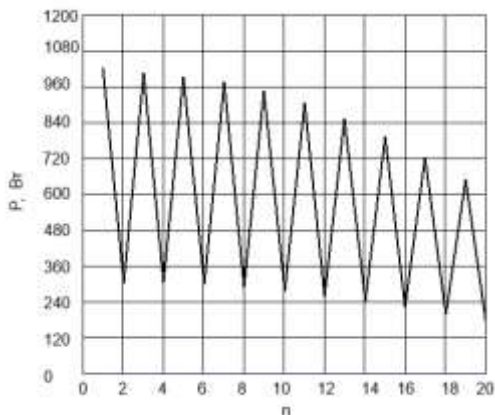


Рис.7. Зависимость активной мощности от числа слоев кремния

Большие колебания активной мощности не так опасны, как сравнительно небольшие отклонения реактивной мощности. Согласно расчету коэффициент мощности составляет около 0,05. Изменение реактивной мощности даже на 5% приводит к значительному изменению тока на входе контура.

Питание индуктора неизменным по величине током по мере увеличения общей высоты цилиндра приводит к снижению мощности в слое с жидким кремнием. Начальное значение мощности, равное 1 кВт, в слое с расплавом обеспечивает достаточное усилие для отталкивания. При общей высоте 0,15 м мощность в верхнем слое снижается до 649 Вт, соответственно усилие становится на 35% меньше.

При увеличении количества слоев мощность тепловыделения в верхнем слое снижается, что объясняется постоянством тока индуктора и суммарного магнитного потока. Происходит лишь перераспределение тока в слитке.

Для сравнения представлены зависимости мощности в слое расплавленного кремния от числа слоев для индукторов с разной длиной h_u при различных частотах f (рис.8).

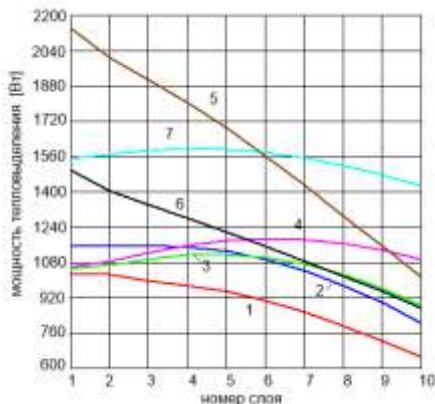


Рис.8. Зависимости мощности тепловыделения в слоях с расплавленным кремнием от числа слоев: для загрузки диаметром 0,3 м:

1 - $h_u = 0,256$ м; $I = 336$ А; $f = 500$ Гц; 2 - $h_u = 0,256$ м; $U = 120$ В; $f = 500$ Гц;

3 - $h_u = 0,256$ м; $U = 120$ В; 4 - $h_u = 0,384$ м; $U = 134$ В; $f = 500$ Гц;

для загрузки диаметром 0,6 м: 5 - $f = 50$ Гц; $h_u = 0,256$ м;

6 - $f = 500$ Гц; $h_u = 0,256$ м; 7 - $f = 500$ Гц; $h_u = 0,384$ м.

Зависимость мощности тепловыделения в слое с жидким кремнием для индуктора на частоте 50 Гц имеет меньшие отклонения от заданного значения. Однако КПД индуктора на этой частоте гораздо ниже, чем на частоте 500 Гц, так как не соблюдается соотношение радиуса загрузки и глубины проникновения, обеспечивающее выгодные характеристики.

После кристаллизации верхнего слоя мощность снижается. Характер диаграмм для мощности отвердевшего верхнего слоя похож на те, что показаны на рис.8, но имеются отличия, обусловленные меньшим весом токопроводящей области в общем магнитном поле индуктора по сравнению с предыдущим случаем, когда электропроводность и ток слоя жидкого кремния создают сильное отклонение в ровном распределении напряженности.

По результатам анализа вариантов конструкций индукционных систем можно сказать, что для загрузки диаметром 0,3 м предпочтительным является вариант №4 со смещением индуктора на 0,04 м вниз по отношению к нижнему слою кремния, так как обеспечивается малое изменение мощности в слое расплавленного кремния, и мощность не снижается сверх допустимой величины. Это гарантирует нужное значение электромагнитной силы, действующей на расплав.

Для индуктора, питающегося от источника напряжением 50 Гц, обеспечивается почти неизменное значение мощности тепловыделения в расплаве при любом числе слоев. Недостатком является низкий электрический КПД и большие токи, что затрудняет изготовление индуктора.

Тепловые процессы в кристаллизаторе методического действия

Расплав загружается порциями в виде тонкого слоя поверх уже затвердевшего предыдущего слоя. Целью расчетов является определение распределения температуры в загрузке в процессе охлаждения на каждом шаге и поиск наиболее приемлемых параметров – скорости охлаждения и длительности интервалов.

Для определения влияния коэффициента теплопроводности основания футеровки выполнен расчет процессов кристаллизации выполнен для загрузки диаметром 0,3 м, высотой 0,15 м при неизменном коэффициенте теплопроводности боковой стенки футеровки $2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ и времени цикла 300 с при разных коэффициентах для основания.

При коэффициенте теплопроводности для основания футеровки $5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ кристаллизация каждого слоя завершается в течение одной минуты, но на этом процесс не прерывается, чтобы температура успела снизиться до значения, которое не позволит повторно перейти в расплавленное состояние при заливке нового слоя. Диаграммы температуры в точках на боковой поверхности слоев представлены на рис.9. В момент времени 3000 с средняя температура слитка имеет значение 610 градусов.

Аналогичные расчеты выполнены при коэффициенте теплопроводности футеровки $15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$. В результате получили, что минимальные значения температуры слоев кремния изменяются в пределах от 150 до 300 градусов. В предыдущем варианте аналогичный диапазон температур составляет 200 – 420 градусов (рис.9).

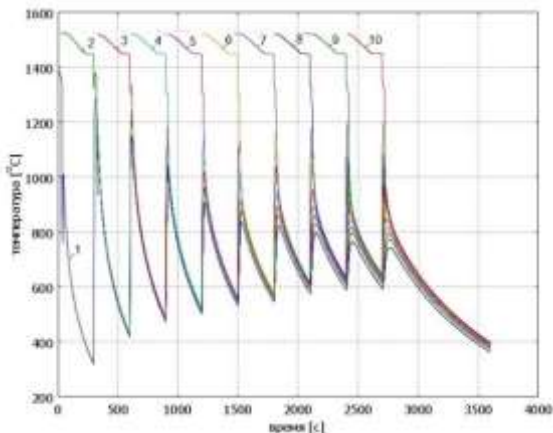


Рис.9 Временные диаграммы температуры на боковой поверхности при охлаждении в кристаллизаторе с коэффициентом теплопроводности футеровки $10 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ и временем цикла 300 с в точках: 1 – $z=0,001 \text{ м}$; 2 – $z=0,016 \text{ м}$; 3 – $z=0,031 \text{ м}$;

4 – z=0,046 м; 5 – z=0,061 м; 6 – z=0,076 м; 7 – z=0,091 м; 8 – z=0,106 м;
9 – z=0,121 м; 10 – z=0,136 м.

В момент времени, равный 3000 секунд, средняя температура слитка имеет значение 350 градусов, что меньше на 80 градусов по сравнению с предыдущим вариантом.

Определение минимальной длительности интервала заливки-охлаждения

Расчеты процесса кристаллизации при различных коэффициентах теплопроводности показали, что температура слитка в конце каждого интервала достаточно снижается, и не происходит повторного расплавления нижних слоев. Целесообразно проведение поиска минимального интервала. Для этого выполнен ряд расчетов, в которых время интервала изменялось от 200 до 50 секунд. Результаты расчета представлены в табл.3

Таблица 3

Сравнительная таблица температур и времени цикла

$t_{ц}, с$	$t_{фин}, с$	$T_{ср}, °C$	$T_{фин}, °C$	$T_{мин}, °C$	$T_{3000}, °C$
300	3000	400	300	150-300	350
200	2000	500	500	210-500	150
100	1000	800	900	400-730	70

При длительности интервала 200 секунд, видно, что минимальное значение температуры кремния изменялось в пределах от 210 до 470 градусов, а теперь находится в пределах от 400 до 720 градусов. Уменьшение длительности интервала до 100 с привело к увеличению средней температуры, которая составляет более 800 градусов.

При уменьшении времени цикла до 50 с расчеты показали, что процесс кристаллизации протекает неудовлетворительно. На последних интервалах в жидком состоянии находятся несколько слоев расплава. Такой режим не предусмотрен конструкцией индукционного кристаллизатора, сила отталкивания недостаточна для удержания столба расплавленного кремния в заданных размерах.

В пятой главе рассмотрены вопросы реализации индукционной системы электромагнитного кристаллизатора

Для обеспечения функционирования системы индукционного нагрева и управления процессом кристаллизация выполнены расчеты, связанные с определением параметров индукционной системы в ходе процесса, а также с поиском алгоритма построения системы управления мощностью индуктора.

Для нескольких вариантов расчетов с разным числом слоев жидкого кремния определены интегральные характеристики индуктора и представлены в табл. 4. В соответствии с данными из табл.4 определена зависимость полного сопротивления индуктора от числа кристаллизовавшихся слоев. В соответствии с этой зависимостью необходимо задать напряжение на индукторе.

На рис.10 приведена расчетная зависимость напряжения индуктора от полного сопротивления индуктора, которая соответствует требуемому

значению мощности индуктора для каждого варианта распределения удельного сопротивления (агрегатного состояния) кремния по высоте.

Таблица 4

Интегральные параметры индуктора в процессе кристаллизации

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{заг}$, кВт	21,2	16,8	16,3	19,2	16,8	15,3	21,2	9,24	4,56
$P_{инд}$, кВт	60,94	48,9	46,9	53,9	45,4	39,8	33,17	22,05	10,35
U, В	306	277	273	292	267	248	225	181	123
I, А	4620	4150	4050	4300	3900	3605	3240	2605	1750
R, мОм	2,865	2,84	2,86	2,91	2,98	3,06	3,15	3,2	3,38
X, мОм	0,066	0,067	0,067	0,068	0,068	0,07	0,069	0,069	0,07

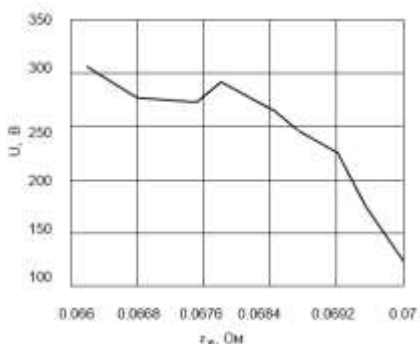


Рис.10 Расчетная зависимость напряжения индуктора от полного сопротивления индуктора.

Для применения полученной диаграммы для построения замкнутой системы управления осуществлен переход к другой системе координат – вместо числа кристаллизовавшихся слоев используется величина полного сопротивления индуктора z .

Для практического применения в системе управления необходимо ввести расчетные значения для сопротивления и напряжения индуктора.

Работоспособность системы регулирования при таком подходе полностью зависит от соблюдения расчетных значений мощности индуктора, тепловых потоков через основание, верхнюю и боковую стенки футеровки.

Определение параметров индуктора при пуске и при завершении кристаллизации

Сравнение параметров индуктора при пустом индукторе (имеется подложка из твердого кремния) и при наличии всех слоев с жидким кремнием является важной задачей, так как происходит резкое изменение объема загрузки. Этот процесс требует быстрой перенастройки колебательного контура, чтобы не произошло отключения преобразователя частоты из-за перегрузки по току. В процессе работы ток возрастает с 1750 до 4620 А, напряжение увеличивается с 127,5 до 305,9 В, мощность в

загрузке - с 7 до 21 кВт, а мощность индуктора – 7 до 61 кВт.

При сравнении параметров индуктора без загрузки и индуктора, заполненного жидким кремнием, видно, что отклонения и составляют 13,9% для реактивной мощности и 10% для тока индуктора.

Расчетные значения коэффициента мощности не изменяются при столь резком изменении характера загрузки. Из анализа режимов работы индуктора при переходе из режима холостого хода параметров и необходимости дополнительной настройки колебательного контура условием безаварийного перехода является включение индуктора на пониженное напряжение $U=127,5$ В с последующим подъемом до расчетного значения $U=305,9$ В после окончания заливки.

Согласно проведенным расчетам в режиме максимальной нагрузки получены следующие значения: полный ток индуктора $I=4620$ А; напряжение на индукторе $U=305,9$ В; мощность в загрузке $P_{загр}=21,2$ кВт; мощность индуктора $P_{инд}=60,9$ кВт. Принята мощность источника питания $P=80$ кВт при максимальном значении тока $I=200$ А, напряжение на выходе 400 В.

С учетом сделанных выше рекомендаций в качестве источника питания принимается ТПЧ мощностью 80 кВт на частоту 500 Гц с выходным напряжением 400 В.

Для управления электромагнитным кристаллизатором разработана система управления. В программно-задающем устройстве формируется график изменения полного сопротивления индуктора во времени. Для этого используется информация о расчетных значениях температуры в точках для каждого слоя на каждом временном участке. По этим значениям определяется состояние каждого слоя. Комбинация состояний для всех слоев позволяет найти значения мощности и напряжения, соответствующие каждому варианту.

Разностный сигнал, поступающий на вход регулятора $\varepsilon = z_{зад} - z_{инд}$, используется для расчета требуемого напряжения и формирования управляющего воздействия на его выходе u_d . Для формирования сигнала, пропорционального полному сопротивлению индуктора z , используется математический блок, в котором осуществляется деление сигнала напряжения на токовый сигнал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Обзор промышленных технологий производства кремния показал, что имеются неиспользованные резервы для повышения качества и снижения затрат при производстве кремния для солнечных панелей.
2. Выполнен анализ состояния проблем моделирования, показывающий необходимость применения методов численного моделирования электромагнитных и тепловых процессов при проектировании электромагнитного кристаллизатора.
3. Предложен алгоритм численного расчета взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов методом конечных элементов в

системе «индуктор – расплав кремния – теплоизоляция», позволяющий учесть изменение электро- и теплофизических свойств кремния, в том числе теплоту плавления.

4. Использование ступенчатой зависимости электропроводности от температуры в модели процесса кристаллизации отражается на перераспределении электромагнитных сил и внутренних источников тепловыделения в ходе процесса, что позволяет определить соотношения геометрических параметров индуктора и системы охлаждения, а также динамически корректировать мощность для получения цилиндрической формы слитка.

5. Проведено исследование электромагнитных и тепловых процессов при кристаллизации в условиях значительного неравномерного по объему изменения электропроводности и теплопроводности кремния, показавшее необходимость поиска параметров кристаллизатора и условий, способных обеспечить заданную траекторию движения фронта кристаллизации для предотвращения раковин в слитке и остаточных термонапряжений.

6. Определены конструктивные параметры кристаллизаторов периодического и методического действия, а также мощность резистивного нагревателя верхней крышки футеровки, мощность бокового индуктора и тепловой поток охладителя, обеспечивающие получение качественного слитка.

7. Найден геометрические размеры и предложена программа изменения мощности индуктора в кристаллизаторе периодического действия, при которых обеспечивается формирование цилиндрического слитка с отклонениями не более 5%, минимизация энергозатрат и времени кристаллизации.

8. Найден геометрические размеры и предложена программа изменения мощности индуктора в кристаллизаторе методического действия, при которых обеспечивается формирование цилиндрического слитка и снижение мощности индукционной системы по сравнению с кристаллизатором периодического действия в 23 раза (2,6 кВт) и времени кристаллизации в 1,25 раза.

9. Разработана система индукционного нагрева на основе преобразователя частоты мощностью 80 кВт, обеспечивающая стабилизацию коэффициента мощности, равного 0,98, при изменении импеданса индуктора за счет автоматической настройки частоты.

10. Разработана система управления мощностью индуктора на базе ПЛК, обеспечивающая изменение мощности тепловыделения и электромагнитной силы в расплаве в функции импеданса индуктора, зависящего от средней температуры слитка.

11. Разработана методика проектирования электромагнитного кристаллизатора периодического действия, позволяющая определить на основе моделирования электромагнитных и тепловых процессов параметры индуктора и систем подогрева верхней крышки футеровки, а также охладителя в его основании.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Базаров А.А., Навасардян А.А. Система индукционного нагрева в производстве технического кремния / Вестник СамГТУ. Технические науки №1, 2016. с.87-95.
2. А.А. Базаров, Навасардян А.А. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в индукционном кристаллизаторе кремния / Вестник СамГТУ. «Технические науки». Выпуск №3(55), 2019. с. 105-119.
3. А.А. Базаров, А.А. Навасардян, Н.В. Бондарева Конструкция электромагнитного кристаллизатора алюминия периодического действия / Вестник СамГТУ. «Технические науки». Выпуск 29, №3, 2021. с.100-116.

Работы, индексированные в базе Scopus:

4. Bazarov, A.A., Navasardian, A.A., Bondareva, N.V. Processes Modeling in a Silicon Induction Crystallizer /Lecture Notes in Mechanical Engineering 2022 vol 2 с. 657-667.

Работы в других журналах и материалах научных конференций:

5. А.А. Навасардян, Н.В. Бондарева. Моделирование процесса кристаллизации кремния с дискретным изменением объема / «EurasiaScience» XXV Международная научно-практическая конференция. 15 ноября 2019. Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». Сборник статей. Часть I. 2019, с.64-68.
6. Навасардян А.А., Бондарева Н.В. Электромагнитный кристаллизатор кремния периодического действия / Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы; достижения и инновации: сборник статей XLIV Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2021. – с. 238 . с.74-80.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

(протокол №10 от «26 июля» 2022г.)

Заказ № . Тираж 100 экз.

Формат 60x84/16. Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати

443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244