


«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям
ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.
д.х.н., профессор

 Остроумов И.Г.
2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» на диссертационную работу Навасардяна Ашота Александровича на тему «**Электромагнитный кристаллизатор кремния для получения слитков цилиндрической формы**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.10 – «Электротехнология» (технические науки).

1. Актуальность темы диссертационной работы

Существующие технологии производства кремния различаются в зависимости от назначения конечного продукта. Самая качественная очистка достигается при производстве кремния для электронной промышленности. Более экономичным подходом для производства «солнечного» кремния является очистка металлургического кремния. В производстве кремния для солнечной энергетики часто используется металлургический метод направленной кристаллизации.

Применение индукционных устройств на этапе кристаллизации позволяет исключить попадание загрязняющих веществ с поверхности футеровки при использовании эффекта отталкивающих сил, как в известных электромагнитных кристаллизаторах. Создание достаточных для удержания расплава сил сопровождается дополнительным нагревом, что затрудняет процесс кристаллизации кремния. Таким образом, при определении параметров кристаллизатора требуется учет противоречащих друг другу требований.

В настоящее время детально исследованы вопросы расчета параметров электромагнитных кристаллизаторов для сплавов, отличающихся высокой электропроводностью. Для кремния подобные задачи затруднены из-за резко снижающейся электропроводности при кристаллизации, а также необходимости учета высокой хрупкости в твердом состоянии. Процесс кристаллизации кремния остается мало исследованным.

В процессе кристаллизации распределение плотности тока в кремнии значительно изменяется, что приводит к необходимости корректировки тока индуктора и регулирования реактивной мощности, чтобы обеспечить минимум энергозатрат и минимальное отклонение формы слитка от цилиндрической.

В связи с этим задачи разработки уточненных математических моделей, создания на их базе алгоритмов эффективного управления режимом работы электромагнитного кристаллизатора периодического и методического действия и способов их реализации имеют существенное значение и являются актуальными.

2. Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства

Развитие солнечной энергетики сопровождается ростом генерируемой мощности в мире около 5% в 2022 году. По прогнозу Международного энергетического агентства, солнечная энергетика к 2040 г. станет номером один в мире – на ее долю к 2050 г. придется 27 % производства электроэнергии. В России к 2022 году ежегодный объем вводов солнечной генерации по стране достигнет 429 МВт, что позволит увеличить долю солнечной электростанции (СЭС) в балансе установленной мощности страны до 0,8%. Политика развития новых источников энергии сформулирована в стратегических отраслевых документах — Доктрине энергетической безопасности и утвержденной в 2020 году Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года. Доля возобновляемых источников электроэнергии в российской энергосистеме к этому году составит 3-5%.

Одной из проблем медленного развития является высокая стоимость оборудования солнечных электростанций. На 2020 год средняя общая стоимость солнечной электростанции без аккумуляторов мощностью 10 МВт составляет 410,0 млн. рублей. С литий-ионными аккумуляторами стоимость увеличивается до 710 млн. рублей.

Для ускорения темпов развития солнечной энергетики в России необходимо снижение затрат на оборудование для солнечных панелей. Проведенные автором исследования позволяют обеспечить снижение затрат в производстве кремния, пригодного для солнечной энергетики.

3. Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Проведенные исследования при разработке электромагнитного кристаллизатора кремния отличаются новизной, обусловленной комплексным характером задачи, учетом изменения физических свойств и параметров индуктора. Для получения цилиндрической формы слитка предложена коническая форма индуктора с регулированием мощности по мере кристаллизации.

Для обеспечения качественного функционирования предложенного индуктора разработан алгоритм изменения мощности в зависимости от

внутреннего сопротивления, обусловленного температурой слитка.

Полученные в результате расчетов параметры индуктора, конструктивные и теплофизические параметры футеровки позволяют решить задачу формирования слитка без термонапряжений во время кристаллизации.

Выводы и рекомендации отражают новые результаты и позволяют реализовать их на практике.

4. Значимость результатов рассматриваемой диссертации для науки и производства

Значимость результатов рассматриваемой диссертации для науки определяется новыми знаниями, отражающими взаимосвязь электромагнитных и тепловых процессов в электромагнитном кристаллизаторе кремния с помощью комплекса математических моделей, учитывающих изменение агрегатного состояния и электропроводности и ориентированных на определение параметров процесса кристаллизации расплава при программном управлении.

Основные результаты:

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.

Разработанные А.А. Навасардяном методика проектирования электромагнитного кристаллизатора кремния и алгоритмы управления для кристаллизаторов периодического и методического действия обеспечивают высокую производительность и требуемую форму слитков.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применения предложенных автором математических моделей и методик расчета не только для решения поставленной задачи, но и для других практически важных задач индукционного нагрева.

Значимость диссертационной работы для производства определяется тем, что ее результаты использованы в ООО «Вольтс» (г. Самара) в качестве «Методики расчета индукционных систем для технологического подогрева», и в ООО «ПриволжскНИПИнефть» в качестве «Методики расчета тепловых процессов в установках локального индукционного нагрева участков трубы во время сварки, используемых при ремонте трубопроводов», что подтверждается актами внедрения.

5. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты разработки конструкций электромагнитных кристаллизаторов и систем управления рекомендуется использовать в производстве на предприятиях: ООО УКМ СИНТЕЗ (г. Подольск), ООО КАРБОН РЕСУРС (Московская область, г. Щербинка), ОАО Подольский химико-металлургический завод (г. Москва), ЗАО СИЛТЕК-9 (г. Москва).

Результаты теоретических исследований рекомендуется использовать в продолжении и развитии исследований в научных организациях: ФГУП НИИ приборов (Московская область, г. Лыткарино), ФГУП Отраслевая проблемная лаборатория ГНИИ НПО ЛУЧ (г. Москва).

6. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Основные положения, выводы и рекомендации, представленные в работе, получены Навасардяном А.А. на основе применения известных численных методов решения задач математической физики, использования современных эффективных методов расчета, базирующихся на методах теории электромагнитного поля, теории теплопроводности, численного моделирования в программной среде Elcut, Comsol, Mathcad.

В выводах убедительно отражена научная и практическая ценность проведенных исследований при разработке электромагнитных кристаллизаторов периодического и методического действия;

Результаты численных экспериментов подтверждают обоснованность всех сформулированных в диссертации научных положений, выводов и заключений.

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

7. Оценка содержания диссертации

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.

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулированы 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 автор выполнил анализ существующих технологий выплавки и кристаллизации кремния

Рассмотрены различные технологии получения кремния разной чистоты. Получение металлургического кремния производится карботермическим

восстановлением из песка и является менее затратным. Для солнечной энергетики требуется дальнейшее увеличение чистоты кремния. Существуют химические и металлургические методы производства кристаллического кремния. Основной металлургический метод, получивший широкое распространение, - это направленная кристаллизация.

Лучшие экономические и технические показатели процесса изготовления слитков мультикристаллического кремния. Приведен пример использования индукционных нагревателей, обеспечивающих градиентный нагрев тигля с расплавленным кремнием, что в совокупности с системой охлаждения позволяет контролировать форму фронта кристаллизации для получения качественного слитка.

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

Для определения электромагнитных сил, необходимых для удержания расплава, автор использует численный расчет индуктора. Величина тока в расплаве обеспечивает необходимую величину электромагнитной силы и давления для компенсации гидростатического давления столба жидкости. Одновременно в кремнии при использовании индукционного нагрева происходит выделение большого количества тепла.

Распределение температуры в расплавленном и кристаллизующемся кремнии формируется с учетом внутренних источников тепла, тепловых потоков, обусловленных всеми видами теплообмена между расплавом, теплоизоляцией и охладителем, а также окружающей средой. Для расчета данного процесса также применен численный метод.

Кроме рассмотренных задач автором разработана модель процессов упругой деформации, вызываемых кристаллизацией в условиях значительных перепадов температуры, которые влияют на рост кристаллов. В процессе затвердевания могут возникать замкнутые области с жидких кремнием, ограниченные твердыми границами. Значительное изменение объема кремния при кристаллизации приводит к возникновению деформаций и напряжений.

Третья глава посвящена вопросам расчета параметров электромагнитного кристаллизатора кремния периодического действия.

При построении диаграммы распределения силы возникла задача проектирования индуктора, обеспечивающего создание электромагнитной силы, компенсирующей гидростатическое давление. В результате расчетов принята коническая форма индуктора с углом наклона направляющей, равным 30 градусам, определены высота индуктора и его смещение относительно нижней поверхности слитка.

Высокое удельное сопротивление кремния в расплавленном состоянии является причиной большой мощности тепловыделения, что ограничивает массогабаритные показатели слитка. При высоте слитка, равной 0,15 м, и диаметре, равном 0,3 м, мощность тепловыделения в загрузке составляет 15 кВт, а мощность индуктора 60 кВт при частоте тока 500 Гц.

В ходе процесса кристаллизации кремний частично переходит в твердое состояние, что приводит к изменению распределения мощности и силы по высоте слитка. Для приведения значения сил в соответствие с требуемыми определены новые значения тока индуктора и его мощности.

Выполнен поиск величин тепловых потоков с боковой и верхней поверхностей слитка, чтобы обеспечить движение фронта кристаллизации от основания к верхней поверхности. Для улучшения процесса в верхней части установлена теплоизолирующая крышка с резистивным подогревом.

Проведено исследование термонапряжений в процессе кристаллизации кремния. Рассмотренные варианты процессов, характеризующиеся требуемым фронтом кристаллизации, показали низкие значения термонапряжений.

В четвертой главе выполнен поиск параметров электромагнитного кристаллизатора методического действия.

В кристаллизаторе методического действия заливка расплава осуществляется за десять шагов порциями, обеспечивающими высоту слоя, равную 1,5 см. Мощность индуктора снижена до 1 кВт. Индуктор имеет цилиндрическую форму. Расчеты показывают, что при определенных условиях повторного расплавления затвердевшего слоя не происходит. Исследования процесса произведены для различного времени цикла между операциями заливки. Найдено минимальное значение времени цикла, равное 100 с, при котором процесс завершается успешно, то есть весь слиток переходит в твердое состояние. При меньшем времени наступает момент, когда процесс кристаллизации прекращается. В целом, данный способ кристаллизации является более экономичным, но начало каждого цикла сопровождается очень быстрым переходом в твердое состояние основания верхнего слоя, что нежелательно из-за термонапряжений.

В пятой главе автор рассмотрел вопросы реализации индукционной системы электромагнитного кристаллизатора периодического действия.

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

На основании расчетов с разным числом слоев жидкого кремния определены интегральные характеристики индуктора. В соответствии с полученными результатами построена зависимость полного сопротивления индуктора Z от температуры.

На основании анализа режимов работы индуктора при переходе из режима холостого хода и необходимости дополнительной настройки колебательного контура предусмотрено включение индуктора на пониженное напряжение с последующим плавным увеличением до расчетного значения.

Для управления электромагнитным кристаллизатором разработана система управления с программно-задающим устройством, в котором формируется график изменения полного сопротивления индуктора во времени.

Выполненные исследования логически связаны, представляют собой единое целое. Результат в виде разработанного технического устройства с системой управления придает работе законченный вид.

8. Замечания по работе

1. Учет вектора скорости в системе уравнений Максвелла (2.1) в данной задаче не обоснован, так как скорость перемещения расплава кремния мала и не приведет к заметному изменению в распределении тока (стр.38).

2. В системе уравнений тепловой задачи (2.19-2.22), описывающих процессы теплопроводности в загрузке и теплоизоляции, не учтено движение расплавленного кремния (стр.44).

3. В диссертации использован нестандартный термин: «1. Разработана нелинейная тепловая модель процесса индукционной кристаллизации жидкого кремния» (стр.61).

4. На стр.70 указано, что «...исследования влияния длины индуктора (высоты) и угла наклона направляющей конуса показали перспективность применения конической формы с углом наклона направляющей 25 градусов». При этом приведенные на рис.3.7 -3.9 диаграммы получены при одном значении угла наклона направляющей индуктора - 25 градусов для разной длины и смещения относительно загрузки. Неясно, как обоснован выбор этого значения.

5. В таблицах 3.24-3.27 (стр.89-91) показаны значения мощности в слоях расплавленного и твердого кремния. В качестве подложки используется электропроводный материал. Потери мощности в нем не отражены, хотя в отдельных случаях они могут быть значительными. Их неучет, при поставленной цели повышения энергоэффективности процесса, требует пояснения.

6. В таблице 3.32 (стр.103) приведены параметры тепловых процессов при кристаллизации расплава кремния. Коэффициенты теплообмена, значения мощности и тепловые потоки представлены в виде постоянных величин. Неясно, учтено ли их изменение в зависимости от температуры кремния и теплоизоляции, как это сказывается на погрешности вычислений?

7. При расчете параметров индуктора методического действия не рассмотрен вопрос определения сил, воздействующих на расплав кремния. В условиях сильных краевых эффектов из-за малой длины загрузки и снижения мощности и силы в слоях форма слитка будет далека от цилиндрической (стр.119-126).

9. Соответствие содержания диссертации заявленной научной специальности

Оценка содержания диссертационной работы Навасардяна А.А. проведена по паспорту научной специальности 05.09.10 «Электротехнология»:

- **направлениями исследования** являются «... процессам преобразования электрической энергии в другие виды энергии с целью достижения определенного технологического эффекта»;

- **область исследования** соответствует пунктам: 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». 3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнологических комплексов и систем, их оптимизация, разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности»;

- **объектом исследования** являются «... электротехнологические комплексы и системы».

В соответствии с этим следует констатировать, что тема и содержание диссертации Навасардяна А.А. соответствуют паспорту специальности 05.09.10 «Электротехнология».

10. Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат диссертации Навасардяна А.А. полностью соответствует диссертационной работе по всем квалификационным признакам, а именно: по цели, задачам и основным положениям, определениям актуальности, новизны и достоверности, научной и практической значимости.

11. Публикации и апробация диссертационной работы

Основные положения диссертационной работы Навасардяна А.А. отражены в 9 публикациях, 3 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах из Перечня, утвержденного ВАК.

Положения диссертации докладывались на 6 международных научных конференциях, в том числе 1 статья в журнале, индексируемом в базе Scopus.

12. Заключение

Диссертационная работа Навасардяна Ашота Александровича «Электромагнитный кристаллизатор кремния для получения слитков цилиндрической формы», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, полностью отвечает квалификационным признакам и принципам соответствия, которые установлены нормативным документом «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842.

Диссертация Навасардяна Ашота Александровича является законченной научно-квалификационной работой. Приведенные выше замечания не имеют принципиального характера и не снижают ценности диссертации.

В диссертационной работе представлено решение актуальной проблемы создания электромагнитного кристаллизатора кремния для получения

слитков цилиндрической формы, имеющей существенное значение в области электротехнологии.

Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор Навасардян Ашот Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.10 – Электротехнология.

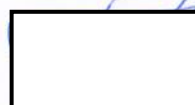
Диссертация рассмотрена и одобрена на заседании кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.» «31» августа 2022 г., протокол № 1. На заседании присутствовало 4 профессора, 3 доцента, специалистов по теме диссертации Навасардян А.А. и 3 аспиранта кафедры. Результаты голосования «ЗА», единогласно.

Калганова Светлана Геннадьевна,

почетный работник сферы образования РФ,
доктор технических наук, доцент,
Заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»,
тел: 8 (8452) 99-88-72,
e-mail: s.kalganowa2016@yandex.ru



Секретарь кафедры
«Электроэнергетика и электротехника»



Г.Х. Мукатова

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.».

Почтовый адрес: 410054, г.Саратов, ул. Политехническая,77.

Телефон: 8(8452) 99-86-03

E-mail: sstu_office@sstu.ru