Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Животягин Денис Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК МЕТОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ НАГРЕВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПЕРЕД ДЕФОРМАЦИЕЙ

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

Диссертация на соискание

ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

профессор Данилушкин А.И.

Самара 2020

Содержание

			стр.
1		Введение	5
I		Проблема моделирования и управления	20
		индукционными нагревателями с дискретным	
		перемещением заготовок	• •
	1.1	Описание процессов индукционного нагрева	20
	1.0	методического деиствия	\mathbf{a}
	1.2	Современное состояние вопроса проектирования	LL
		систем управления индукционными нагревателями	
	1.0	методического деиствия	27
	1.3	Анализ электромагнитных и тепловых процессов в	27
		системах индукционного нагрева алюминиевых	
	1 /	слитков перед пластической деформацией	37
2	1.4	Молецирование электромагнитных и тепловых	32 34
4		процессов в многосекционном инлукторе	54
	2.1	Разработка модели расчета тепловых процессов в	34
		системе «теплоизоляция многосекционного индуктора	
		– загрузка».	
	2.2	Задание температурных зависимостей параметров	38
		модели	
	2.3	Определение термического сопротивления между	40
		заготовками в индукционном нагревателе	
		методического действия	
	2.4	Процессы лучистого теплообмена между	42
		поверхностями заготовок и футеровок секций	
		индуктора	
	2.5	Модель электромагнитных процессов в системе	44
		«многосекционныи индуктор – загрузка» с учетом	
	26	изменения температуры Розработка минитифизической (срязенией)	17
	2.0	газработка мультифизической (связанной)	4/
		Ограничения при построении модели	
	2.7	Молелирование программного управления	49
		электротепловыми процессами в системе	-
		«многосекционный индуктор – загрузка»	
	2.8	Моделирование замкнутой системы управления	50
		тепловыми процессами в системе «многосекционный	
		индуктор – загрузка»	
		Выводы по главе	52

3			Определение параметров индукционной системы при программном управлении нагревом	54
	3.1		Расчет параметров секций инлукторов и определение	55
			частоты напряжения при настройке контура на	
			резонанс токов	
	3.2		Исследование влияния теплового сопротивления	59
			контактного слоя межлу заготовками на тепловые	
			пропессы	
	3.3		Программное управление инлукционным нагревом с	71
			одинаковым током секций индуктора	
	3.4		Оценка погрешности молелей	80
	3.5		Инлукционный нагрев с программным управлением и	85
			настройкой мошностей секций инлуктора	
			Выволы по главе	92
4			Молепирование тепловых процессов в загрузке с	93
•			лискретно перемещаемыми заготовками при	10
			использовании САР	
	41		Молепирование процесса нагрева лискретно	98
			перемешаемых заготовок с многоканальным	20
			регулятором температуры	
		411	Исспелование варианта системы нагрева с интервалом	99
			нагрева 800 с	//
		4.1.2	Исспелование варианта системы нагрева с интервалом	102
			нагрева 900 с	102
		413	Исспедование варианта системы нагрева с интервалом	104
			нагрева 1000 с	101
		4.1.4	Исспелование варианта системы нагрева с интервалом	106
			нагрева 1100 с	100
	4.2		Исследование влияния количества контрольных точек	112
			на управляемость системы инлукционного нагрева	
		4.2.1	Молелирование системы индукционного нагрева с 6	115
			каналами регулирования температуры	
		4.2.2	Молелирование инлукционной системы с тремя	119
			каналами регулирования	/
		4.2.3	Моделирование индукционной системы с тремя	121
			каналами регулирования и уменьшенной мошностью в	
			первых трех секциях	
		4.2.4	Моделирование индукционной системы с двумя	122
			каналами регулирования	
		4.2.5	Моделирование индукционной системы с лвумя	125
			каналами регулирования и уменьшенной мошностью в	
			первых секциях	
			1 ·	

4.3		Выбор параметров системы программного управления индукционной системой при смене сплошных заготовок							
		на пустотелые							
	4.3.1	Выбор параметров индукторов при смене темпа выдачи	129						
		пустотелых заготовок диаметром 1075 мм							
	4.3.2	Определение параметров секций индуктора при	134						
		переходе смене сплошных заготовок на пустотелые							
4.4		Определение параметров индукционной системы с	141						
		системой автоматического регулирования при смене							
		типов заготовок							
	4.4.1	Моделирование тепловых при смене пустотелых	141						
		заготовок сплошными с интервалом нагрева 900 с							
	4.4.2	Моделирование тепловых процессов при смене	145						
		сплошных заготовок пустотелыми с интервалом							
		нагрева 900 с							
	4.4.3	Моделирование тепловых процессов при смене	148						
		пустотелых заготовок сплошными с интервалом							
		нагрева 1000 с							
	4.4.4	Сравнение направления перехода при смене заготовок с	151						
		интервалом нагрева 1100 с							
4.5		Сравнение затрат энергии на потери при разных	155						
		интервалах нагрева							
4.6		Реализация системы индукционного нагрева	156						
		Выводы по четвертой главе	163						
		Заключение	164						
		Библиографический список	166						
		Приложения	178						

введение

Актуальность проблемы

Диссертация посвящена проблеме повышения энергоэффективности функционирования многосекционных индукционных нагревателей заготовок из алюминиевых сплавов в переходных и установившихся режимах нагрева.

Высокие темпы развития электротермии и внедрения ее во многие отрасли производства определяются теми широкими возможностями, которые открывает электронагрев при решении задач, связанных с повышением качества материалов и изделий промышленного и бытового назначения; с дальнейшим ростом производительности труда; с экономией материальных и энергетических ресурсов; с решением проблемы защиты окружающей среды. По прогнозам специалистов разных стран, влияние указанных факторов на дальнейшее развитие электротермии будет усиливаться, а применение электронагрева расти опережающими темпами. Наибольшее влияние на эти темпы оказывает возрастающий спрос на высококачественные материалы и изделия, получение которых без электронагрева невозможно ИЛИ нецелесообразно. В этих условиях экономически большое значение приобретают соответствующие задачи совершенствования установок и систем управления индукционным нагревом металла, обладающим существенными преимуществами перед другими видами нагрева.

Накопленный опыт применения индукционных установок ДЛЯ технологического нагрева заготовок в линиях горячей обработки металла показывает, что они являются перспективными по ряду важнейших признаков. Такие преимущества, как высокая скорость нагрева, обеспечивающая интенсификацию производства И, следовательно, высокую производительность, высокая точность отработки требуемых температурных угара металла, высокий уровень режимов, уменьшение окалины И автоматизации, минимальное влияние на окружающую среду способствуют все более широкому внедрению в промышленность индукционных установок для нагрева металла перед обработкой давлением. Они надежны и компактны

и позволяют легко осуществить автоматическое управление процессом нагрева. Компактность индукционных нагревателей позволяет размещать их непосредственно там, где производится последующая обработка, тем самым исключая потери тепла при транспортировке заготовок к деформирующему оборудованию.

В современных условиях развития производства большое значение приобретает проблема достижения экстремальных значений техникоэкономических показателей технологических комплексов «индукционный нагрев – обработка металла давлением» и гибкость технологического процесса, позволяющего оперативно переходить на другой тип заготовок. Поставленная проблема может быть успешно решена лишь при решении задачи поиска конструктивных и режимных параметров индукционного обеспечивающих эффективное нагревателя, функционирование В установившемся и переходном режимах при нагреве заготовок разных типогабаритов в одном нагревателе.

В состав индукционных нагревательных установок входят индуктор, конденсаторы, регулируемый источник питания, система управления, контроля и защиты. В установках для нагрева немагнитных заготовок под обработку на деформирующем оборудовании по мере необходимости вводят регулятор коэффициента мощности, поддерживающий в процессе нагрева на определенном уровне коэффициент мощности установки. Альтернативой такому решению является система регулирования коэффициента мощности за счет подстройки частоты [3], что не только снижает реактивные токи, потребляемые контуром, но и избавляет от необходимости применять коммутирующие аппараты, упрощает схему и снижает потери мощности в цепях.

Функциональная схема индукционной установки представлена на рис. 1.



Рис. 1. Функциональная схема индукционной нагревательной установки

Источник питания ИП индукционной установки (регулируемый печной трансформатор, автотрансформатор или преобразователь частоты) подключается к системе электроснабжения предприятия и обеспечивает требуемую частоту тока, необходимый диапазон регулирования мощности, осуществляет заданный напряжение. Система управления алгоритм управления подводимой к индуктору мощности и темп выдачи нагретых заготовок.

Установки для нагрева под пластическую обработку имеют ряд особенностей. Режим работы нагревательной установки должен быть строго согласован с режимом работы последующего по технологической цепи деформирующего оборудования. Мощность нагревательной установки соизмерима с мощностью прессового оборудования, поэтому эффективность работы нагревателей существенно сказывается на себестоимости конечной продукции. Наконец, точность и повторяемость конечного температурного состояния заготовки перед прессованием в значительной степени определяет качество готового изделия.

В процессе эксплуатации технологической линии «методический индукционный нагреватель – деформирующее оборудование» возникает необходимость первоначального запуска нагревателя в работу, вывода нагревателя на установившийся режим нагрева после кратковременных остановок или смена одного типогабарита заготовок на другой с минимальным перерывом в работе технологического оборудования. Опыт работы машиностроительных производств показывает, что в течение рабочей

смены происходит от трех до пяти плановых остановок оборудования различной длительности. Последующий запуск технологической линии сопровождается неизбежными простоями деформирующего оборудования вследствие принципиальной невозможности вывода нагревательной установки на установившийся режим работы без существенных временных и энергетических потерь. Простои деформирующего оборудования приводят к снижению экономических показателей работы.

Важным вопросом в решении задачи совершенствования процесса управления эффективным функционированием методического нагревателя является повышение точности математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в переходных режимах. При методическом нагреве заготовок под пластическую деформацию задача моделирования процесса нагрева в переходных режимах усложняется существенно нелинейной зависимостью распределения удельной мощности нагрева по длине нагревателя от температурного распределения. Особенно заметно это влияние сказывается в условиях частой смены номенклатуры заготовок. Переход нагревательной установки на нагрев новой партии заготовок, отличающихся по длине и диаметру, в установившихся и переходных режимах работы нагревателей методического действия приводит к изменению температурного распределения в металле по длине нагревателя, а, следовательно, и электрических параметров системы «индуктор-металл». Длина заготовки не совпадает с длиной секции нагревателя, и как следствие, координаты торцевых поверхностей заготовок не совпадают с границами секций нагревателя. Это приводит к наличию в одной заготовке двух независимых источников тепла, наведенных индукторами смежных секций, что существенно усложняет расчет температурного распределения в загрузке и поиск закона регулирования подводимой к индуктору мощности в процессе выхода на установившийся режим работы с заданным темпом выдачи заготовок.

В связи с этим создание инженерной методики расчета алгоритмов управления, обеспечивающих при заданных характеристиках нагрева

показателей повышение технико-экономических эксплуатационных И индукционных нагревательных комплексов на основе разработки математических моделей, максимально учитывающих специфику исследуемого объекта, имеет важное значение и является актуальной.

Объект исследования

Объектом исследования является многосекционная индукционная лействия нагревательная установка методического для нагрева цилиндрических заготовок из сплавов алюминия перед обработкой на деформирующем оборудовании. Столб заготовок движется по направляющим из жаропрочной стали. Очередная нагретая заготовка выталкивается в приемный лоток и транспортируется к обжимному устройству пресса. Для перемещения заготовок используется многодвигательный рольганг. Футеровка индуктора выполнена из жаростойкого бетона. Основными элементами системы индукционного нагрева являются: многосекционный индукционный нагреватель с автономными регулируемыми источниками питания каждой секции, конденсаторная батарея для компенсации реактивной мощности индуктора, многодвигательный привод рольганга для перемещения заготовок, системы контроля, управления и защиты.

<u>Цель работы</u>

Целью работы является повышение энергоэффективности функционирования многосекционных индукционных нагревателей заготовок из алюминиевых сплавов в переходных и установившихся режимах нагрева.

Достижение поставленной цели осуществляется путем совершенствования алгоритмов результатов управления на основе математического моделирования электромагнитных И температурных процессов в системе «многосекционный индуктор-загрузка» в условиях вариации пространственно-временных параметров внутренних источников тепла и создания на базе проведенных исследований системы управления, реализующей полученные алгоритмы.

Решение поставленных задач составляет основное содержание диссертационной работы, выполненной автором в Самарском государственном техническом университете. Работа выполнялась в рамках фундаментальной НИР <u>при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-</u> <u>00212 А</u> по заданию Министерства образования РФ.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

– Разработка уточненных численных математических моделей процесса индукционного нагрева заготовок из сплавов алюминия, ориентированных на решение задач исследования установившихся и переходных режимов многосекционного индукционного нагревателя методического действия;

 Исследование электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор–загрузка» в переходных режимах с учетом изменяющихся в процессе выхода на установившийся режим нагрева электрических параметров системы;

– Разработка и исследование алгоритмов управления переходными режимами работы в условиях существенного изменения электрических параметров нагревателя в процессе выхода на установившийся режим и обусловленной этим необходимостью учета предельных возможностей источника питания;

 Разработка рекомендаций по выбору алгоритмов управления переходными и стационарными режимами, обеспечивающих снижение непроизводительных затрат электроэнергии на нагрев «ложных» заготовок;

 Разработка и техническая реализация системы автоматического управления режимами работы многосекционного методического индукционного нагревателя.

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

Методы исследования

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

Достоверность результатов работы оценивалась путем анализа результатов численных экспериментов и сравнения их с данными, полученными в работах других авторов.

<u>Научная новизна</u>

Предложена численная математическая модель нестационарного процесса методического индукционного нагрева дискретно перемещающихся крупногабаритных заготовок из сплавов алюминия в переходных и установившихся режимах работы, отличающаяся учетом электромагнитных и тепловых краевых эффектов и ориентированная на решение задачи совершенствования алгоритмов управления режимами функционирования многосекционного индукционного нагревателя методического действия;

 – разработана методика расчета температурного распределения в загрузке многосекционного методического индукционного нагревателя, отличающаяся учетом наличия двух независимых источников тепла в одной заготовке;

– разработана методика поиска параметров управления многосекционным нагревателем в переходных и установившихся режимах, отличающаяся учетом зависимости распределения удельной мощности нагрева по секциям нагревателя от распределения температуры по длине загрузки в условиях смены номенклатуры заготовок;

– разработаны и исследованы алгоритмы управления многосекционным индукционным нагревателем методического действия, обеспечивающие программное управление максимальной мощностью секций и одновременное функционирование замкнутой системы регулирования в условиях ограниченной наблюдаемости.

Практическая полезность работы

Практическая польза проведенных исследований определяется следующими результатами:

 – Разработан и реализован на ЭВМ алгоритм расчета электромагнитных и тепловых полей в переходных и установившихся режимах индукционной нагревательной установки методического действия с учетом изменяющихся в процессе нагрева электрических параметров системы;

 Предложены алгоритмы управления процессом нагрева заготовок в многосекционном индукционном методическом нагревателе в переходных и установившихся режимах работы, обеспечивающие снижение непроизводительного расхода энергии;

 разработана структура автоматической системы, реализующей функционирование многосекционного индукционного нагревателя в переходных и установившихся режимах с заданными показателями в условиях ограниченной наблюдаемости.

Результаты работы использованы в научно-исследовательской работе в виде алгоритмического и программного обеспечения при исследовании электромагнитных и тепловых полей в системах индукционного нагрева и в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

<u>Апробация работы</u>

Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: IV международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике» 19 декабря 2017г, г. Барнаул; на 24 Междунар. научн. техн. конф. студентов и аспирантов РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. Тез. докл. – М.: МЭИ, 15–16 марта 2018. Москва;. На 4-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». (18-19 февраля 2019г.). Юго-Зап. гос. ун-т,

г. Курск.; на VIII МНПК «Актуальные проблемы энергетики АПК», ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2017г., (Саратов);

<u>Публикации</u>

По результатам диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, 3 из которых в изданиях из списка ВАК, 2 – индексированы в базе Scopus.

<u>Структура и объем диссертации.</u> Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 165 страницах машинописного текста; содержит 148 рисунков и 45 таблиц, список использованных источников, включающий 89 наименований, два приложения.

На защиту выносятся следующие положения:

– Методика численного расчета параметров управления переходными и установившимися режимами функционирования многосекционного индукционного нагревателя методического действия с немагнитной загрузкой, позволяющая, в отличие от известных, учитывать влияние на температурное распределение наличия двух независимых источников тепла в заготовках, находящихся в двух смежных секциях;

— Методика поиска параметров управления многосекционным нагревателем в переходных и установившихся режимах, отличающаяся учетом зависимости распределения удельной мощности нагрева по секциям нагревателя от распределения температуры по длине загрузки в условиях смены номенклатуры заготовок;

– Алгоритмы эффективного управления многосекционным индукционным нагревателем методического действия в условиях нелинейной зависимости электрических параметров нагревателя, теплофизических характеристик заготовок и теплового потока излучением между поверхностями заготовок и футеровки от распределения температуры по длине, позволяющие, в отличие от известных, исключить использование «ложных» заготовок в переходных режимах пуска или смены типогабарита заготовок;

Система автоматического управления многосекционным нагревателем,
 реализующая эффективное функционирование многосекционного
 индукционного нагревателя в переходных и установившихся режимах с
 заданными показателями в условиях ограниченной наблюдаемости.

– Рекомендации по выбору эффективных алгоритмов управления переходными и установившимися режимами, исключающих непроизводительные затраты на нагрев «ложных» заготовок и сокращение времени простоя деформирующего оборудования.

Краткое содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель и основные задачи исследования, краткая информация об объекте исследования, характеризуется новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе выполнен обзор современного состояния и проблемы моделирования и управления процессом индукционного нагрева металла перед обработкой на деформирующем оборудовании.

Приводится обзор научных работ в области технологии индукционного нагрева, разработки математических моделей электромагнитных и тепловых полей, ориентированных на проектирование и управление индукционными нагревательными установками.

Показано, что наиболее сложными в управлении и при исследовании взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов при индукционном температур пластической деформации нагреве металла ДО являются многосекционные индукционные установки методического действия. Использование эффективных численных методов расчета электромагнитных и тепловых процессов широко распространено при проектировании установок периодического или методического действия, функционирующих В установившемся режиме и не охватывают всего комплекса проблем, связанных с разработкой конструкции и алгоритмов управления переходными режимами многосекционных индукционных нагревательных установок методического

действия. Последние отличаются более сложным характером зависимости распределения внутренних источников тепла по длине нагревателя и обусловленной этим фактором необходимостью использования сложных математических моделей для описания процессов нагрева.

Разработке энергоэффективных режимов работы многосекционных индукционных нагревателей методического действия нагрева для цилиндрических алюминия под обработку заготовок из сплавов на деформирующем оборудовании на базе численных математических моделей взаимосвязанных электромагнитных И тепловых полей посвящены приведенные ниже исследования.

Приведен краткий обзор существующих методов решения задач моделирования процессов периодического и методического индукционного нагрева, оптимального управления режимами нагрева в переходных и установившихся режимах работы. Показано, что опубликованные до настоящего времени исследования, касающиеся рассматриваемой проблемы, в недостаточной мере раскрывают вопросы эффективности функционирования индукционных нагревателей с дискретной выдачей заготовок в переходных и установившихся режимов работы.

На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи исследований, выполненных в диссертационной работе.

Во втором разделе рассматриваются вопросы математического моделирования электромагнитных и тепловых процессов в осесимметричной системе «индуктор – металл», приведен алгоритм расчета электромагнитных и тепловых полей в многосекционном нагревателе с немагнитной дискретно перемещающейся загрузкой.

При проектировании системы нагрева используется несколько алгоритмов, нацеленных на применение программного управления или замкнутой системы регулирования. При разработке численных моделей используются программные средства, построенные на основе метода конечных элементов Elcut, Comsol.

Наиболее полный учет всех особенностей теплообмена выполнен при разработке модели расчета тепловых процессов в системе «теплоизоляция многосекционного нагревателя – загрузка». Теплообмен излучением между поверхностями учитывает распределение температуры по всей длине загрузки и футеровки.

Для корректного отражения зависимости теплофизических параметров от температуры предложены аппроксимирующие выражения, которые имеют минимальную погрешность и обеспечивают более простой способ задания свойств при формировании компьютерных моделей всех элементов системы.

Ha процессы переноса тепла между заготовками оказывает существенное влияние величина термического сопротивления, обусловленная шероховатостью торцевых поверхностей, наличием окисной пленки и величиной воздушного зазора между контактирующими поверхностями соседних заготовок. В работе проведено исследование термического сопротивления заготовками индукционном нагревателе между В методического действия.

Для расчета параметров индукционного нагревателя и мощности тепловыделения в заготовках разработана модель электромагнитных процессов в системе «многосекционный индуктор – загрузка» с учетом изменения температуры по всей длине индуктора.

Моделирование электромагнитных и тепловых процессов в многосекционном индукторе обеспечивается с минимальной погрешностью при использовании мультифизической (связанной) электротепловой модели с учетом нелинейности задач. При формировании такой модели в работе учтены ограничения, обусловленные особенностями расчета теплообмена излучением между поверхностями: воздушная среда, необходимая в электромагнитной задаче, создает преграду для потока излучения в тепловой задаче. Поэтому в связанной электротепловой модели вместо теплообмена между поверхностями задается теплообмен между поверхностью и пространством при подборе коэффициента лучистого теплообмена. Для решения задач синтеза программного управления электротепловыми процессами в системе «многосекционный индуктор – загрузка» разработана модель, позволяющая рассчитывать изменяющиеся во времени значения мощности тепловыделения в заготовках и температуры с учетом дискретного перемещения. Зависимость от температуры ярко проявляется в изменении краевых эффектов на краях секций.

Большими возможностями обладает замкнутая система регулирования, для моделирования которой разработана специальная модель, построенная на основе тепловой задачи с добавлением элементов измерения температуры в контрольных точках и расчета управляющего воздействия с помощью ступенчатых функций, что исключает необходимость применения сложных алгоритмов.

В третьем разделе на основе предложенных в разделе 2 моделей произведено определение параметров индукционной системы при программном управлении нагревом дискретно перемещающихся заготовок с использованием нелинейных электротепловых моделей.

Выполнено исследование влияния температуры заготовок на электрические параметры секций индуктора. Произведен расчет частоты напряжения для каждого значения удельного сопротивления заготовок, изменяющегося с ростом температуры.

Термическое сопротивление в контактном слое между заготовками оказывает влияние на передачу тепла при градиенте температур, возникающем в многосекционных нагревателях. Для упрощения тепловой модели выполнено отдельное исследование влияния теплового сопротивления контактного слоя между заготовками на тепловые процессы, по результатам которого в численной модели определены параметры специальных вставок между заготовками.

При выборе алгоритма управления мощностью нагрева необходим учет влияния температуры на удельное сопротивление. Моделирование электромагнитных процессов может быть выполнено при одинаковом

значении тока секций или при разных значениях. Программное управление индукционным нагревом с одинаковым током секций индуктора проще реализовать, мощности и напряжения имеют близкие значения и не создают проблем с несимметричностью нагрузки по фазам. По результатам расчетов выявлено, что недостатком является необходимость увеличения времени нагрева, чтобы добиться нужного перепада температуры в заготовке.

Проведено исследование индукционного нагрева с программным управлением и настройкой мощностей секций индуктора. Этот способ управления является более эффективным, так как за счет быстрого разогрева поверхностного слоя заготовок в первых секциях позволяет обеспечить подтягивание температурного распределения за меньшее время. По результатам исследования сделан вывод о целесообразности применения в качестве источников питания преобразователей частоты для каждой секции.

Четвертый раздел посвящен разработке и технической реализации автоматической системы управления переходными и установившимися режимами работы многосекционного индукционного нагревателя методического действия. В качестве расчетной модели использована тепловая модель с учетом теплообмена излучением между заготовками и футеровкой, а также учетом зависимости теплофизических свойств от температуры. Электромагнитные процессы рассматривались отдельно.

Произведено моделирование тепловых процессов в загрузке при применении САР температуры дискретно перемещаемых заготовок. Определены уставки заданных значений температуры для каждой секции, обеспечивающие минимальное отклонение в выходной заготовке для каждого значения темпа выдачи. Выполнено исследование влияния темпа выдачи заготовок на достижимые значения отклонения температуры от заданного распределения.

Проведено исследование качества функционирования системы регулирования при различном числе каналов измерения и регулирования.

Выполнено моделирование процессов нагрева при смене типогабарита заготовок. Показана возможность перехода на другой типогабарит при определенном темпе выдачи. Произведено определение параметров индукционной системы с системой автоматического регулирования при смене типогабарита заготовок. Более эффективным показал себя вариант с многошаговым изменением заданной температуры для некоторых секций. Это обеспечивает более плавный и быстрый переход без перегревов.

Предложена структура автоматической системы управления, реализующей рассчитанную по предложенной в работе методике программу управления секциями нагревателя при выходе на установившийся режим нагрева с последующим переходом на режим стабилизации температуры в установившемся режиме.

Приведены итоговые выводы по диссертационному исследованию.

1. ПРОБЛЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫМИ НАГРЕВАТЕЛЯМИ С ДИСКРЕТНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ЗАГОТОВОК

1.1 Описание процессов индукционного нагрева методического действия

Системы индукционного нагрева разделяются в зависимости от режима работы: периодического, непрерывного и методического действия. В результате нагрева на выходе из индуктора формируется распределение температуры с симметричным по длине градиентом или с несимметричным. В зависимости от параметров индуктора (длина, число секций) и загрузки (коэффициент теплопроводности, магнитные свойства), а также от условий теплообмена с окружающей средой, мощности и времени нагрева формируются различные распределения температуры по длине и радиальной координате. При нагреве массивных заготовок обычно используется ток промышленной частоты без устройства регулирования амплитуды. Такое более ограничивает решение является экономичным, НО способы регулирования мощности. В основном применяется двухпозиционное регулирование, обеспечивающее два значения мощности.

Отличительной конструктивной особенностью, исследуемой индукционной нагревательной установки, является наличие нескольких секций с автономными источниками питания. Установка предназначена для нагрева крупногабаритных заготовок из сплавов алюминия для последующей обработки на деформирующем оборудовании. В установке осуществляется, нагрев заготовок широкой номенклатуры – сплошных и полых различного диаметра и длины. Эскиз многосекционного индукционного нагревателя методического действия приведен на рис.1.1.

Полная загрузка индукционного нагревателя может включать от шести заготовок. Число заготовок, до восьми находящихся в нагревателе, определяется длиной заготовки. При этом координаты торцов заготовок могут не совпадать с координатами торцов катушек индуктора. Это обстоятельство моделирование И расчет значительно усложняет температурных распределений в каждой заготовке и выбор управляющих воздействий для секций нагревателя.

Длина заготовок может изменяться от 0,8 м до 1,8 м. Для таких относительно протяженных заготовок температуры торцевых поверхностей смежных заготовок могут значительно отличаться. При этом возникает дополнительная неравномерность температуры по длине заготовки.

В связи с указанными особенностями усложняется моделирование температурных полей и расчет управляющих воздействий для каждой секции нагревателя. Для исследования процесса индукционного нагрева в рассмотренной ситуации в работе испльзуется численная математическая модель температурных полей, с помощью которой определены температурные распределения по радиусу и аксиальной координате.



Рис.1.1 Общий вид индукционного нагревателя: 1 – заготовки; 2 – бункер; 3 – индуктор; 4 – толкатель; 5 – ролики транспортера.

Индукционный нагрев является одним ИЗ наиболее сложных электротермических процессов и в строгой постановке требует рассмотрения физической явлений разной Основными взаимосвязанных природы. процессами являются электромагнитные и тепловые [1-4]. В ходе нагрева происходят сопутствующие физико-химические процессы - процессы роста зерна, поверхностного обезуглероживания, окисления и т.п. Электрическое удельное сопротивление заготовок с ростом температуры меняется, что тепловыделения приводит к изменению мощности И расстройке колебательного контура [5]; на краях секций индуктора проявляются краевые эффекты, изменяющиеся в ходе нагрева; теплообмен с окружающей средой и футеровкой циклически изменяется при перемещении заготовок. Из этого следует, что анализ, моделирование, определение конструктивных и режимных параметров процессов индукционного нагрева необходимо проводить, рассматривая систему "индуктор - загрузка".

Основная сложность возникает здесь в разработке адекватных

математических моделей и алгоритмов поиска управления, учитывающих эффективность функционирования установки при протекании в ней нескольких взаимосвязанных процессов. Различные аспекты анализа, моделирования и оптимизации системы "индуктор-загрузка" рассмотрены в достаточно большом числе работ, посвященных процессам индукционного нагрева [6-33].

1.2. Современное состояние вопроса проектирования систем управления индукционными нагревателями методического действия

Процесс индукционного нагрева металлических заготовок описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Зависимость параметров процесса от температуры (коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости, удельного электрического сопротивления) и от напряженности магнитного поля (магнитная проницаемость ферромагнитных материалов) делает решение задачи очень сложной. Численные методы решения развивались одновременно с вычислительной техникой. Применение аналитического решения в виде различных методик позволяло определить конструктивные параметры индукционных установок. Возможность аналитического решения получена с помощью упрощения исходной постановки задачи в виде разделения процесса на две составляющие тепловую и электромагнитную задачи, и линеаризации зависимостей параметров процесса от температуры. Погрешность вычислений была довольно значительной – 15%. Особенностью тепловых процессов при нагреве заготовок является недопустимость превышения температуры, ЧТО обусловлено структурными изменениями сплавов. С другой стороны, заготовки усложняет процесс деформации. недогрев Таким образом, невысокое качество расчетов делает необходимым этап доводки технологии до нужных показателей с помощью экспериментов.

Переход к численным методам расчетов позволяет все большую часть времени и затрат на проектирование переносить в область вычислений.

Первые примеры решения взаимосвязанных электромагнитных и тепловых задач были получены в Санкт–Петербургском (Ленинградском) электротехническом институте. Численные модели [6–9] позволили

рассчитать двухмерные электромагнитные поля индукционных нагревателей с немагнитной и ферромагнитной загрузкой.

Вопросам аналитического и численного моделирования при индукционном нагреве для задач проектирования посвящены работы А.Е. Слухоцкого, А.Б. Кувалдина, В.С. Немкова, В.Б Демидовича и др. [2–10]. Развитие таких методов расчета, как метод конечных разностей и метод конечных элементов, нашло отражение в работах, посвященных как теории методов [7,22], так и практическому применению в различных задачах.

Совершенствование вычислительных алгоритмов, которыми вначале занимались разработчики прикладных пакетов, теперь осуществляется на более высоком уровне программирования с использованием встроенных математических средств и функций, входящих в состав таких пакетов как Elcut, Comsol, Ansys, Flux и других [34–37]. Кроме встроенных средств некоторые пакеты имеют возможность взаимодействовать с программными комплексами типа Autocad, что ускоряет обмен информацией при разработке проектной документации. Дополнительно, моделирование систем управления для процессов нагрева может быть реализовано средствами программного комплекса Matlab.

Требования, предъявляемые к работе нагревательной установки с точки зрения технологии пластической деформации (прокатка, прессование, раскатка, вальцовка и т.д.), носят, как правило, многофакторный, а в ряде случаев противоречивый характер. При решении проблемы создания универсальной конструкции индукционного нагревателя, способной удовлетворить требования технологии, сталкиваются с необходимостью решения совместных задач проектирования и синтеза алгоритмов управления системами с распределенными параметрами [38–42].

Принимая во внимание тот факт, что в реальном технологическом процессе постоянно присутствуют различные технологические возмущающие воздействия (вариации геометрических размеров, электро- и теплофизических параметров), для разрешения проблемы проектирования и синтеза управления применительно к нелинейной системе с распределенными параметрами необходимо привлекать современный математический аппарат, способный решать задачи для объектов с распределенными [20, 26, 27, 29, 38, 42].

При проектировании устройств индукционного нагрева требуется обеспечение ряда требований:

1. Допустимое отклонение конечного распределения температуры от заданного значения.

2. Ограничение максимального значения температуры.

3. Скорость нагрева, обеспечение заданной производительности.

4. Энергетические показатели индуктора: коэффициент мощности, КПД, мощность тепловыделения в процессе нагрева.

5. Удовлетворение требований системы электроснабжения: поддержание заданного значения коэффициента мощности, отсутствие бросков тока.

6. Быстрый переход на другой режим при смене типа заготовок.

При исследовании процесса методического индукционного нагрева металла как объекта управления возникает задача определения поведения объекта в условиях наиболее существенных возмущений (потери напряжения в сети и в источнике питания, скорость перемещения изделий через нагреватель, изменение начальной температуры изделия и окружающей среды, условия теплообмена и т.д.). При решении задач расчета режимов индукционного нагрева заготовок используются приближенные и более точные комплексные электротепловые модели, позволяющие исследовать основные закономерности процессов. Объединение нескольких задач в единый вычислительный процесс серьезно замедляет решение. Поэтому более удобен вариант с заранее заданным управляющим воздействием, что ускоряет вычисления.

Предметом исследования является нагревательная установка для индукционного дискретно-непрерывного нагрева цилиндрических заготовок обработкой ИЗ алюминиевых сплавов перед на деформирующем Общий индукционного нагревателя оборудовании. ВИД для нагрева цилиндрических заготовок перед прессованием показан на рис. 1.1. Установка рассчитана на нагрев цилиндрических заготовок диаметром до 1075 мм. Температура нагрева зависит от марки сплава и находится в пределах от400 до 450 град. Столб заготовок движется по направляющим из жаропрочной стали. Очередная нагретая заготовка выталкивается в приемный лоток И транспортируется к прессу. Передвижение заготовок осуществляется по рольгангу. Загрузка холодных заготовок осуществляется с помощью

механизма возвратно-поступательного действия. Основными элементами системы индукционного нагрева являются: индукционная установка, источник питания, конденсаторная батарея, система управления и система электроснабжения.

Вопросы проектирования индукционных нагревательных установок на базе численных методов моделирования широко освещены в работах в работах В.С. Немкова, В.Б.Демидовича, Кувалдина А.Б., Прахта В.А., Сарапулова Ф.Н., Руднева В.И., Головенко Е.А. и др. [6, 8,13, 15, 16, 43, 44]. В работах А.Б. Кувалдина [10, 37, 45] рассмотрены вопросы расчета, проектирования и практического применения индукционных установок для нагрева ферромагнитных сталей в различных технологических процессах.

Общая идеология оптимального проектирования систем индукционного нагрева в комплексах «индукционная нагревательная установка – обработка металла давлением» дана в работах Л.С. Зимина [17].

Выбору удельных мощностей, обеспечивающих максимальное сокращение времени ускоренного нагрева, посвящены работы [33, 45–47]. В работе рассматривается способ нагрева, объединяющий в себе положительные стороны «ускоренного» и обычного нагрева – малое время нагрева и простоту упрощения конструкции индуктора. Предлагается для конструкции индуктора, реализующего способ «ускоренного» нагрева, уменьшить число секций двух. Управление процессом непрерывного его ДО нагрева осуществляется за счет выбора числа секций и пространственного распределения удельной мощности В секциях. Анализ результатов что предыдущих исследований показывает, алгоритмы распределения удельной мощности источников внутреннего тепловыделения вдоль осевой координаты индукционной системы зачастую выбираются на основе предшествующего опыта проектирования и эксплуатации индукционных нагревателей, при этом, однако, не содержат в строгой форме ни одного критерия оптимальности, что не позволяет считать их оптимальными.

Моделирование индукционного нагрева сплавов из цветных металлов освещено в работе Немкова В.С., Демидовича В.Б. и др. [47–50]. На основе численных расчетов показаны особенности расчетов тепловых и электромагнитных процессов. Изменение удельной мощности и краевых

эффектов в загрузке обусловлено изменением удельного сопротивления по мере прогрева.

Дальнейшее развитие методов моделирования отражено в работах Прахта В.А., Сарапулова Ф.Н., Головенко Е.А. и других авторов [13, 23, 51].

Использование индукционного нагрева для крупногабаритных слитков позволяет реализовать некоторые методы теории оптимального управления, хорошо адаптированные к аналитическим и численным моделям тепловых процессов. В работах Э.Я. Рапопорта [38-41] дано систематизированное изложение альтернансного метода параметрической оптимизации процессов нестационарной теплопроводности при индукционном нагреве, на основании разработаны которого инженерные методики расчета алгоритмов оптимального управления индукционными нагревательными установками в линиях обработки металла давлением. С позиций системного подхода рассмотрена общая задача совместной оптимизации процессов индукционного нагрева и последующего прессования металла по совокупному критерию качества.

В работе М.Ю. Лившица [52] исследуется задача совокупного оптимального проектирования и управления технологическими процессами тепломассопереноса. Для широкого класса индукционных нагревателей поставлены и решены задачи сосредоточенного и распределенного управления промышленными установками периодического и непрерывного действия в установившихся и нестационарных режимах работы.

В работах Плешивцевой Ю.Э. [40, 42, 53] разработаны основы теории и техники применения эффективного метода точного решения краевых задач оптимизации технологических объектов с распределенными параметрами и предложены на базе этого метода вычислительные алгоритмы для решения широкого круга задач оптимального управления электротехнологическими процессами.

Применение непрерывного или методического индукционного нагрева для слитков или прутков с нелинейными функциональными зависимостями затрудняет использование теории оптимального управления [54]. Движущиеся объекты с распределенными параметрами в каждом случае требуют определения возможности достижения заданных показателей ввиду разной

погрешности моделей, связанных с аппроксимацией. Вопрос выбора точек контроля температуры решается непросто [55]. Поэтому в последнее время используется подход с применением численного моделирования электромагнитных и тепловых процессов в задачах поиска конструктивных параметров, требуемого распределения удельной мощности по длине загрузки. Вопросы настройки регуляторов обычно не выделяются. Одной из причин являются большая тепловая инерционность объектов и малый запас мощности источников, позволяющих обойтись регуляторами простого вида.

1.2 Анализ электромагнитных и тепловых процессов в системах индукционного нагрева алюминиевых слитков перед пластической деформацией

Индукционный нагрев массивных цилиндрических слитков вносит определенные проблемы, связанные с большой массой заготовок, которые давят на направляющие и на футеровку. Усиление несущей конструкции под индуктором, увеличение прочности футеровки и лобовых частей теплоизоляции катушек сказываются на конструктивных габаритах и параметрах тепловых и электромагнитных моделей.

Показанная на рис.1.2 упрощенная конструкция многосекционного нагревателя содержит кроме катушек секций индуктора систему перемещения слитков, состоящую из рольганга с несколькими электродвигателями. На рисунке не показана система измерения температуры заготовок. При использовании термопар в качестве датчиков возникает проблема обеспечения хорошего теплового контакта с движущимися объектами.

В процессе нагрева загрузки индуктора происходит изменение физических свойств металла – удельного электрического сопротивления, коэффициента теплопроводности и теплоемкости. Это приводит к проявлению различных эффектов в диаграммах распределения плотности тока по толщине и длине заготовок. С ростом удельного сопротивления увеличивается глубина проникновения, причем неравномерное температуры в поверхностном слое приводит к существенному отклонению вида функции от экспоненциальной. Для материалов с высокими значениями коэффициента теплопроводности это явление практически не заметно. Более существенное влияние оказывает изменение удельного сопротивления на краевые эффекты. Для получения более качественной картины распределения температуры в заготовках необходим учет изменения распределения плотности тока.

В номенклатуре нагреваемых заготовок имеются изделия различной длины, что создает проблемы при выборе заглубления (рис.1.3), так как наличие краевых эффектов способно привести как к недогреву, так и значительному перегреву крайней заготовки [9]. Отношение плотности тока в зоне краевых эффектов к плотности тока в регулярной зоне зависит от длины индуктора и удельного сопротивления загрузки (рис.1.4).

Влияние изменения свойств металла при нагреве на параметры индуктора

Алюминиевые сплавы, используемые для нагрева в индукционных установках ИН1100, имеют диапазон изменения удельного электрического сопротивления от $\rho = 2,7 \cdot 10^{-8}$ до $\rho = 8,7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

Индукционные нагреватели загрузки из сплавов алюминия отличаются невысокими значениями КПД и коэффициента мощности. Во время нагрева постоянно изменяются параметры индуктора, что требует принятия мер для стабилизации мощности тепловыделения в загрузке и тока, потребляемого контуром «индуктор – конденсаторная батарея».

Выбор рабочих температур при нагреве алюминиевых сплавов перед прессованием должен учитывать ограничения, связанные с особенностью поведения материалов, содержащих два или более компонентов. Наиболее ярко проявляется влияние в рассматриваемых в работе сплавах меди на диаграмму состояния системы Al-Cu.



Рис.1.2 Многосекционный нагреватель с механизмом загрузки



Рис.1.3 Многосекционный индуктор с заготовками



Рис.1.4 Диаграммы плотности тока по длине поверхности загрузки: 1 - ρ = 27 нОм · м , $L_{\rm инд}$ = 1,1 м; 2 - ρ = 27 нОм · м , $L_{\rm инд}$ = 1 м; 3 - ρ = 27 нОм · м , $L_{\rm инд}$ = 0,9 м; 4 - ρ = 87 нОм · м , $L_{\rm инд}$ = 1,2 м; 5 - ρ = 87 нОм · м , $L_{\rm инд}$ = 1,1 м; 6 - ρ = 87 нОм · м , $L_{\rm инд}$ = 1 м; 7 - ρ = 87 нОм · м , $L_{\rm инд}$ = 0,9 м.

	OTTO	DIJUTAATAIA	ODOHOTDO	TT	VIIOII IIOO	OOTIN	OTIDHOULIO	οπιονιμιμα
	CHIOU		скоиства	И	VICILIANCE		отиклснис.	апноминия
-	•11010 q		•Dolle1Da		, дельное	• • • • • • •		could on the second sec
					•	1		

]	Габлица 1.1
Т, К	300	400	500	600	700	800
<i>С</i> , Дж/(кг· <i>K</i>)	900,7	951,3	991,8	1036,7	1090,2	1153,8
$k, Bт/(M \cdot K)$	236	239	235	230	224	220
$ ho, imes 10^{-8}, 0$ м · м	2,73	3,87	5	6,13	7,35	8,7

Т, К	298	373	473	573	673
<i>С</i> , Дж/(кг · <i>K</i>)	-	921	1047	1130	1172
$k, BT/(M \cdot K)$	117	130	146	163	-
$\rho, \times 10^{-8}, 0$ м · м	5,2 (8,6)				

Теплофизические свойства и удельное сопротивление сплава Д16

Таблица 1.2

Из диаграммы (рис.1.5) видно, что при содержании меди от 0 до 53% имеет место простая эвтектическая система $Al(\alpha) - Al_2Cu(\theta)$ с эвтектикой при температуре 548°C и содержании 33% Cu. Максимальная растворимость (при эвтектической температуре) меди в α -твердом растворе - 57%. Растворимость меди уменьшается с понижением температуры и при температуре 300°C составляет 0,5%. Нерастворившаяся медь находится в равновесном состоянии в виде фазы Al_2Cu . При средних температурах в результате распада пересыщенного твердого раствора образуются метастабильные промежуточные фазы (θ' и θ'').



Рис.1.5 Диаграмма состояния системы Al-Cu

При температуре выше 548 °С имеются две составляющие – жидкость (Al) и соединение в твердой форме (Al₂Cu). При содержании меди выше 5,7% температура, при которой появляется жидкая фаза равна 548 °С. При снижении меди до 0% температура жидкой фазы возрастает до 658 °С.

Сплав Д16 содержит медь в пределах 3,8 – 4,9%, что приводит к предельному значению температуры нагрева 548 °C.

Аналогичные явления возникают при наличии других компонентов в сплаве алюминия. Температура плавления может снизиться до 449 °C при наличии большого количества магния (больше 15%). При формировании технологической карты сплава Д16 максимальное значение температуры

ограничено значением 500 °С. Таким образом, при выборе параметров интервалов управления при программном управлении или уставок и настроек систем автоматического регулирования недопустимо превышение указанной величины, что усложняет реализацию системы нагрева, так как требуется контроль температуры во всем объеме заготовок и ограничение перерегулирования в САР или перегрева при программном управлении.

Распределение температуры в заготовках зависит не только OT поглощаемой мощности в процессе нагрева, но и от условий теплообмена с окружающей средой. Коэффициент излучения (степень черноты) сплава зависит от шероховатости поверхности и степени окисления поверхности. Для неокисленной поверхности слитка из алюминия коэффициент излучения изменяется в диапазоне $\varepsilon = 0.02 - 0.06$ при изменении температуры от 20 до 500 °C, для окисленной в нормальных условиях поверхности $\varepsilon = 0.11 - 0.19$ при изменении температуры от 200 до 500 °C, для сильно окисленной (при 500 C) поверхности $\varepsilon = 0,11 - 0,3$ при температуре от 200 до 500 °C. Слитки, прессования, отливаются И предназначенные для охлаждаются на металлургических предприятиях с последующей транспортировкой к месту производства. Время достаточно для создания равномерной окисной пленки. В тепловых расчетах среднее значение коэффициента излучения близко к величине ε=0,2.

Значительный разброс возможных значений коэффициента излучения необходимо учитывать при определении распределения температуры в области боковой и торцевой поверхностей на этапе транспортировки заготовки от индуктора к прессу. Здесь возможен вариант с выравниванием распределения, но также и вариант значительного отклонения от заданной величины.

1.4. Выводы

1. Вопросы разработки математических моделей электромагнитных и тепловых процессов установок индукционного нагрева должны рассматриваться в единой постановке с учетом взаимных связей.

2. Показано, что в настоящее время проблема управления многосекционными индукционными нагревателями массивных заготовок из сплавов алюминия с позиций максимально возможного достижения качества расчетов решена не полностью и требует дальнейшего развития.

3. Вопрос выбора вида управления (программное или САР) процессом методического индукционного нагрева дискретно перемещаемых массивных заготовок в многосекционных нагревателях зависит от конкретных технологических требований и остается открытым.

4. Приведенные диаграммы краевых эффектов распределения токов по длине загрузки для многосекционного нагревателя доказывают необходимость их учета при выборе заглубления крайней заготовки для каждого типогабарита.

5. Свойства алюминиевых сплавов В температур диапазоне пластической деформации резко изменяются, что может привести к браку небольшом Это обстоятельство при перегреве. приводит даже К необходимости уменьшать допустимые отклонения температуры заготовки на выходе из нагревателя.

2 Моделирование электромагнитных и тепловых процессов

в многосекционном индукторе

2.1 Разработка модели расчета тепловых процессов в системе «теплоизоляция многосекционного индуктора – загрузка»

Индукционная многосекционная установка для нагрева алюминиевых сплавов состоит из трех сдвоенных индукторов, расположенных вплотную друг к другу. Зазоры между секциями практически не влияют на теплообмен с окружающей средой. Потери тепла излучением от заготовок приходятся на футеровку и только в последней секции торцевая поверхности заготовки излучает тепло в окружающее пространство. Дополнительно к излучению присутствуют конвективные потоки. При довольно малом воздушном зазоре между заготовками и футеровкой циркуляция затруднена и коэффициент конвективного теплообмена незначительно отличается от минимальных значений. Тепловой поток через футеровку направлен к поверхности катушки водоохлаждаемого индуктора. Температура катушки определяется требованиями недопустимости перегрева вода, сопровождающегося отложением солей на стенках трубки индуктора.



Рис.2.1 Геометрическая модель системы «заготовки – футеровка»: 1 – контактный слой между заготовками; 2 – заготовка; 3 – слой заготовки с внутренними источниками тепла; 4 – футеровка.

На представленной на рис.2.1 геометрической модели заготовки содержат слой, в котором происходит выделение тепла от протекающего тока. На передачу тепла между заготовками оказывает влияние контактный слой, обусловленный наличием шероховатостей, окисных пленок и воздуха. Размеры зазоров и состояние поверхностей торцов заготовок не могут быть фиксированными величинами и имеют разброс значений. Передача тепла через воздух осуществляется посредством теплопроводности и конвекции, что требует применения гидравлических расчетов. Для упрощения процедуры в модели предусмотрена замена этих процессов только теплопроводностью через небольшой слой с характеристиками, которые необходимо определить в ходе исследования.

Моделирование тепловых процессов при индукционном нагреве заготовок в индукторе методического действия осуществляется на основе дифференциального уравнения в частных производных [4]

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \left(-k\nabla T\right) - \rho C_P \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q$$
(2.1)

Здесь: ρ - плотность материала; k - коэффициент теплопроводности; C_P - удельная теплоемкость; $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}$ - оператор набла; **u** – вектор

скорости; Q – объемная плотность мощности тепловыделения в загрузке.

Температура Т измеряется в Кельвинах К.

Уравнение (2.1) описывает процессы теплопроводности в заготовках и футеровке с учетом различных параметров. Постановка задачи дополняется граничными условиями, описывающими теплообмен между заготовками, футеровкой, окружающим воздухом и катушкой индуктора с помощью процессов конвекции, излучения и теплопроводности.

Теплообмен между внешними торцевыми поверхностями первой и последней заготовок и окружающей средой в индукционном многосекционном нагревателе осуществляется с помощью процессов излучения и конвекции

$$-k\frac{\partial T}{\partial n} = h(T_c - T) + \varepsilon\sigma_0(T_c^4 - T^4).$$
(2.2)

Здесь: n – нормаль по отношению к поверхности теплообмена; h – коэффициент конвективного теплообмена с окружающим воздухом; ε –

коэффициент излучения материала (степень черноты); $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ $Bm / (m^2 K^4)$ – постоянная Стефана – Больцмана.

При теплообмене излучением между боковыми поверхностями заготовок и футеровки секций индуктора выражение (2.2) преобразуется и содержит температуры поверхностей заготовки и футеровки

$$k\frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma_0 \left(T_3^4 - T_{\phi}^4\right) \tag{2.3}$$

В этом случае расчет конвективного теплообмена в системе «заготовка – воздух – футеровка» не предусмотрен, и требуется привлечение средств расчета гидродинамических процессов, что сопровождается увеличением числа приложений и времени расчета.

Передача тепла от внешней поверхности футеровки к водоохлаждаемой катушке индуктора может быть описана в виде граничных условий первого рода

$$T_{\phi} = T_{uh\partial} \tag{2.4}$$

Перенос тепла между соседними заготовками в индукторе зависит от термического сопротивления контактного слоя. Толщина слоя невелика, однако определение ее затруднительно. Расположение заготовок нельзя считать строго горизонтальным, так как несмотря на принятые меры по увеличению жесткости конструкции индуктора неизбежны прогибы опорной поверхности. Это приводит к отклонению торцевых поверхностей от вертикальной плоскости и увеличению зазоров между заготовками в верхней или нижней частях. Кроме того, оказывает влияние сила сжатия между заготовками, которая, в свою очередь, зависит от сил трения при перемещении заготовок по направляющим. Для упрощения расчета сложный теплообмен между торцевыми поверхностями соседних заготовок заменен на передачу тепла через твердое тело. Коэффициент теплопроводности принимается с учетом оценочных значений перепада температуры в месте контакта.

Уравнение (2.1) содержит вектор скорости движения нагреваемого тела. Такой вид вполне подходит при моделировании процессов в установках непрерывного действия. Переход от непрерывного движения к методическому, когда длительности паузы и перемещения близки, и в целом, преобладает скорость механического переноса тепла над скоростью,
обусловленной теплопроводностью, вполне может обеспечить допустимую погрешность аппроксимации. Такой способ математического описания задачи нагрева движущейся загрузки обусловлен стремлением ускорить процессы расчета и повысить устойчивость вычислений. Наличие вектора скорости в уравнении теплопроводности проявляет себя аналогично нелинейностям с большим диапазоном изменения параметров. Для описания движения с переменной скоростью требуется в уравнении задать функцию скорости. От ее вида зависит сходимость вычислительного процесса. Если аналитическое решение задач в такой постановке неосуществимо, то численное вполне возможно с некоторыми ограничениями на параметры.

Реализация расчетной схемы может быть основана на базовой схеме с заданием алгоритма изменения вектора скорости с помощью ступенчатой функции [56], позволяющей через определенные промежутки времени изменять значения в требуемом диапазоне

$$v = v_1 + v_2 \cdot \left(H(t - t_1) - H(t - t_2) + \dots + H(t - t_m) - H(t - t_n) \right).$$
(2.5)

Временная диаграмма скорости при $v_1 = 0$ имеет вид



Рис. 2.2 Временная диаграмма скорости перемещения загрузки в индукторе

Такой способ имеет недостаток, связанный с необходимостью формировать выражение большой длины.

Использование программ, не содержащих скорость в основном уравнении, в некоторых случаях можно приспособить для моделирования процессов нагрева заготовок, перемещающихся в отдельные моменты времени. Имитация перемещения через индуктор осуществляется ступенчатым изменением мощности – поочередным включением при продвижении через индуктор. Сложность такого подхода заключается в необходимости на каждом этапе изменять распределение внутренних источников тепла. Однако большим плюсом является большая устойчивость вычислительного процесса. Применение регулирования мощности и температуры не создает значительных проблем.

$$Q = Q_m \cdot \left(1 - a_1 \cdot H(t - t_1) + \dots + a_m \cdot H(t - t_2)\right) \cdot \left(1 - H(u_j - T_3)\right).$$
(2.6)

Ступенчатая функция в выражении (2.6) используется одновременно для ступенчатого изменения мощности, связанного с перемещением через индуктор, и для регулирования температуры с помощью двухпозиционного регулятора. Необходимым условием такого решения является способность программного обеспечения назначать контрольные точки для измерения интересующей переменной u_j (в данном случае, температура). Применение простейшего вида регулятора оправдано отсутствием серьезных возмущений и большой инерционностью процессов. Более сложные ситуации, например, при нагреве тонкостенных изделий, требуют использования внешних средств управления. Для этой задачи может быть использовано приложение Simulink из пакета Matlab.

2.2 Задание температурных зависимостей параметров модели

Для использования в численных расчетах значения теплофизических характеристик, взятые из справочной литературы [57], представлены в таблице 2.1.

Т, К	298	373	473	573	673
С, Дж / (кг · К)	-	921	1047	11130	1172
$\lambda, Bm/(M^2 \cdot K)$	117	130	146	163	-
γ, кг / м ³	2780				
$\rho, \times 10^{-8} O_{M} \cdot M$	5,2 (8,6)				

Теплофизические характеристики сплава Д16

Таблица 2.1

Удельное сопротивление сплава зависит от способа старения и может иметь значения от $3,4\cdot 10^{-8}$ до $5,7\cdot 10^{-8}$ *Ом* · *м* при температуре 273 К.

Табличные значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости для сплава Д16 представлены в виде аппроксимирующих полиномов

$$k = 117 + 0.16 \cdot (T - 273) - 1.9 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273)^2 - 4.3 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 273)^3; \quad (2.5)$$

$$C = 820 + 1, 2 \cdot (T - 273) - 7, 7 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273)^{2}$$
(2.6)

По значениям коэффициентов из таблицы 2.1 и выражениям (2.5), (2.6) построены диаграммы, которые представлены на рис. 2.3, 2.4.



Рис.2.3 Температурная зависимость теплоемкости сплава Д16: 1 – табличные значения; 2 – аппроксимация.



Рис.2.4 Температурная зависимость коэффициента теплопроводности сплава Д16: 1 – табличные значения; 2 – аппроксимация.

В диапазоне температур 273 – 870 К погрешность аппроксимации не превышает 2%.

2.3 Определение термического сопротивления между заготовками в индукционном нагревателе методического действия

Расчет тепловых процессов в системе контактирующих твердых тел целесообразно проводить без участия воздушных прослоек, чтобы исключить гидродинамические процессы и сократить время вычислений. Поэтому в работе выполнен расчет передачи тепла через воздушный зазор с целью замены его твердым телом с низким коэффициентом теплопроводности, чтобы термическое сопротивление твердой прослойки между заготовками было равноценно комбинированному тепловому сопротивлению, обусловленному процессами конвекции и теплопроводности. В качестве расчетной модели использована стационарная задача переноса тепла через две прямоугольные области со свойствами алюминия и вставку с теплофизическими параметрами воздуха. В качестве граничных условий задано постоянное значение температуры на правом краю области и плотность теплового потока на левом краю. Верхняя и нижняя стороны области приняты теплоизолированными. Температура правой стенки равна 273, размеры областей равны 0,45x0,2 м. Ширина вставки изменялась от 0,002 м до 5 · 10⁻⁵ м. Плотность потока задана изменяющейся в диапазоне q=1000 - 30000 Вт/м². В результате расчетов получен набор значений температуры на левом краю области T₁, левой и правой стенках вставки T_2 и T_3 , при стабильном значении температуры на правом краю области Т₄. Значения температуры, полученные для разных значений ширины вставки Δx и плотности теплового потока, представлены в таблицах 2.1-2.5. Расчетная величина коэффициента теплопроводности определена по выражению

$$\lambda = q * dx / (T_2 - T_3).$$

Таблица 2.2

Параметры процесса теплопроводности в системе двух пластин с воздушной вставкой при величине плотности теплового потока q=1000 Bт/м².

N⁰	Δ <i>x</i> , м	<i>T</i> ₁ , ℃	<i>T</i> ₂ , ℃	<i>Т</i> ₃ , °С	<i>T</i> ₄ , °C	λ, Bτ/
						(м∙°С).
1	0,002	79	77	3	0	0,027
2	0,001	44	42	3	0	0,026
3	0,0005	26	23	2,5	0	0,024
4	0,0002	14	11	3	0	0,025
5	0,0001	9,5	7	2,8	0	0,024
6	0,00005	7,5	5	2,7	0	0,022

Таблица 2.3

N⁰	Δ <i>x</i> , м	<i>T</i> ₁ , °C	<i>T</i> ₂ , ℃	<i>T</i> ₃ , ℃	<i>T</i> ₄ , °C	λ, Вт/
						(м·°С).
1	0,002	310	295	12	0	0,035
2	0,001	187	175	15	0	0,031
3	0,0005	115	102	15	0	0,029
4	0,0002	65	52	14	0	0,026
5	0,0001	47	34	14	0	0,025
6	0,00005	37	24	14	0	0,025

Параметры процесса теплопроводности в системе двух пластин с воздушной вставкой при величине плотности теплового потока q=5000 Bt/м².

Таблица 2.4

Параметры процесса теплопроводности в системе двух пластин с воздушной вставкой при величине плотности теплового потока q=10000 Bt/м².

N⁰	Δ <i>x</i> , м	<i>T</i> ₁ , °C	<i>T</i> ₂ , °C	<i>T</i> ₃ , °C	<i>T</i> ₄ , °C	λ, Вт/ (м · °С).
1	0,002	525	500	25	0	0,048
2	0,001	325	305	25	0	0,036
3	0,0005	208	184	27	0	0,032
4	0,0002	122	98	27	0	0,028
5	0,0001	90	65	26	0	0,026
6	0,00005	74	48	28	9	0,025

Таблица 2.5

Параметры процесса теплопроводности в системе двух пластин с воздушной вставкой при величине плотности теплового потока q=30000 Bt/м².

N⁰	Δ <i>x</i> , м	<i>T</i> ₁ , °C	<i>T</i> ₂ , °C	<i>T</i> ₃ , ℃	<i>T</i> ₄ , °C	λ , BT/
1	0.002	1160	1100	80	0	0.059
2	0.001	760	695	80	0	0.049
3	0,0005	505	440	78	0	0,041
4	0,0002	320	250	78	0	0,035
5	0,0001	240	175	80	0	0,032
6	0,00005	202	130	81	0	0,031

Табличное значение коэффициента теплопроводности полностью согласуется с полученными расчетными значениями, представленными в таблицах 2.1 – 2.5.



Рис.2.5 Диаграммы температуры в двух пластинах с воздушным зазором 0,05 мм при плотности теплового потока: 1 – 30000 Вт/м²; 2 – 10000 Вт/м²; 3 – 1000 Вт/м².

2.4 Процессы лучистого теплообмена между поверхностями заготовок и футеровок секций индуктора

Теплообмен между поверхностями заготовок и футеровок секций индуктора происходит согласно выражению (2.3). При этом учитывается многократное отражение тепловых потоков, излучаемых разными участками поверхностей как заготовок, так и футеровок. Величина плотности потока зависит от температур поверхностей и от угла падения на поверхность. Таким образом, современные программные средства позволяют повысить точность расчетов процесса лучистого теплообмена. При формировании геометрической модели многосекционной индукционной системы нагрева кроме самих заготовок, соприкасающихся через контактный слой, добавляются области футеровок (рис.2.6).



Рис.2.6 Иллюстрация геометрической модели для тепловой задачи с лучистым теплообменом

Для модели, изображенной на рис.2.4, имеются два варианта теплообмена: для торцевой поверхности заготовки плотность теплового потока определяется соотношением (2.2). Влияние потоков с поверхности футеровки практически отсутствует, так как заглубление заготовки в индуктор мало.

$$k\frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma_0 \left(T_3^4 - T_{oc}^4\right) + h \left(T_3 - T_{oc}\right). \tag{2.7}$$

Коэффициент конвективного теплообмена в первом приближении принимается равным 5 *Bm* / M^2 .

Теплообмен боковой поверхности заготовок с поверхностями футеровок осуществляется, в основном, за счет потоков излучения. Как отмечалось выше, температура воздуха неизвестна, и для ее определения требуется отдельная задач. Для указанных поверхностей задаются условия теплообмена. Поверхности могут быть сгруппированы в зависимости от их взаимного расположения, чтобы учитывались только те, оторые находятся в зоне прямой видимости друг друга.

$$k\frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma_0 \Big(T_3^4 - T_{\phi 1}^4 \Big). \tag{2.8}$$

В данной задаче все объекты находятся или на одной линии, например, все заготовки, или просматриваются, хотя и под большим углом, как например, первая заготовка и футеровка последнего индуктора.

2.5 Модель электромагнитных процессов в системе «многосекционный индуктор – загрузка» с учетом изменения температуры

Электромагнитная задача формулируется в виде уравнений Максвелла [1, 36], описывающих связь между основными электромагнитными величинами, такими как напряженность магнитного поля и индукция.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}^{e}; \qquad (2.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \qquad (2.10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0; \tag{2.11}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \qquad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \tag{2.13}$$

Здесь: **H**, **E** – векторы напряженности магнитного и электрического поля; **B**, **D** – векторы индукции магнитного и электрического поля; J^e – вектор плотности внешнего тока; **v** – вектор скорости движущегося проводника; σ - электропроводность материала; ρ - плотность электрического заряда.

Важнейшим критерием квазистационарной постановки задачи является то, что токи и электромагнитные поля меняются медленно. Это условие соблюдается, когда размеры структуры в задаче являются небольшими по сравнению с длиной волны.

Используя определения потенциалов,

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} ; \qquad (2.14)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \qquad (2.15)$$

и устанавливающее отношение $\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$, закон Ампера можно переписать как

$$A_{\varphi} = A_{0\varphi}. \tag{2.16}$$

Здесь М – вектор намагниченности.

Уравнение непрерывности, которое получается путем определения приращения для вышеуказанного уравнения, дает нам уравнение

$$-\nabla \cdot \left(\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma \nabla V - \mathbf{J}^{e}\right) = 0.$$
(2.17)

Эти два уравнения дают нам систему уравнений для двух потенциалов **A** и V.

Электрические и магнитные потенциалы не определяются однозначно из электрических и магнитных полей через выражения (2.14, 2.15).

Для решения проблемы используются два новых потенциала

$$\mathbf{A} = \mathbf{A} + \nabla \psi \; ; \tag{2.18}$$

$$V = V - \nabla \psi \,. \tag{2.19}$$

Это дает одинаковые электрические и магнитные поля:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V = -\frac{\partial (\mathbf{A} - \nabla \psi)}{\partial t} - \nabla (\bar{V} + \frac{\partial \psi}{\partial t}) = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \bar{V}; \qquad (2.20)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \nabla \times (\mathbf{A} - \nabla \psi) = \nabla \times \mathbf{A}.$$
 (2.21)

Переменное преобразование потенциалов называется калибровочным преобразованием. Чтобы получить уникальное решение, требуется выбрать калибр, то есть наложить ограничения на Ψ, которые делают решение уникальным. Одна конкретная калибровка - это кулоновская калибровка, определяемая ограничением

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0. \tag{2.22}$$

Для рассматриваемых в работе двухмерных задач использование этой калибровки решает проблему неоднозначности.

В случае гармонического во времени анализа уравнение Ампера включает ток смещения:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J}^e.$$
(2.23)

При анализе нестационарных процессов включение этого члена привело бы к уравнению второго порядка по времени, но для время-гармонического анализа таких осложнений нет. Используя определение электрического и магнитного потенциалов, система уравнений принимает вид

$$-\nabla \cdot ((j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0)\mathbf{A} - \sigma v \times (\nabla \times \mathbf{A}) + (\sigma + j\omega\varepsilon_0)\nabla V - (\mathbf{J}^e + j\omega\mathbf{P}) = 0; \quad (2.24)$$

$$(j\omega\sigma - \omega^{2}\varepsilon_{0})\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_{0}^{-1}\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + (\sigma + j\omega\varepsilon_{0})\nabla V = (\mathbf{J}^{e} + j\omega\mathbf{P}); \quad (2.25)$$

Основное соотношение $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ было использовано для электрического поля. Получена конкретная калибровка, которая сокращает систему уравнений, при выборе $\psi = -jV/\omega$ в калибровочном преобразовании. Это дает

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \frac{j}{\omega} \nabla V; \qquad \bar{V} = 0. \qquad (2.26)$$

Поскольку из уравнений исчезает выражение для V, то остается

$$(j\omega\sigma - \omega^{2}\varepsilon_{0})\bar{\mathbf{A}} + \nabla \times \left(\mu_{0}^{-1}\nabla \times \bar{\mathbf{A}} - \mathbf{M}\right) - \sigma \mathbf{v} \times \left(\nabla \times \bar{\mathbf{A}}\right) = \left(\mathbf{J}^{e} + j\omega\mathbf{P}\right).$$
(2.27)

Работа с векторным магнитным потенциалом **Ã** является удобным вариантом, так как для задач индукционного нагрева можно указать все как внешние токи **J**^e.

Для перехода к численному решению исходная система преобразуется в терминах векторного магнитного потенциала к виду:

$$(j\omega\sigma - \omega^{2}\varepsilon_{0})\mathbf{A} + \nabla \times \left(\mu_{0}^{-1}\nabla \times \mathbf{A}\right) - \sigma \mathbf{v} \times \left(\nabla \times \mathbf{A}\right) = \left(\frac{\sigma V_{eum}}{2\pi r} + \mathbf{J}_{\varphi}^{e}\right); \quad (2.28)$$

$$\mathbf{A} = A_{\varphi} e^{\varphi} \,. \tag{2.29}$$

Здесь: $\omega = 2\pi f$ - круговая частота; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды; V_{gum} – 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

$$A_{\varphi} = A_{0\varphi}. \tag{2.30}$$

На линии осевой симметрии граничное условие задается в виде равенства нулю производной функции магнитного потенциала.

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 нагрева сплава алюминия 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

$$Q = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left(J_z \sigma^{-1} J_z^* \right). \tag{2.31}$$

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

2.6 Разработка мультифизической (связанной) электротепловой модели с учетом нелинейности задач. Ограничения при построении модели.

Рассмотренные выше модели электромагнитной и тепловой задач формулируются в виде дифференциальных уравнений в частных производных

$$\nabla^2 \left\{ \overline{A} \right\} - j\omega\sigma(T) \left\{ \overline{A} \right\} - \left\{ \overline{J} \right\} = 0; \qquad (2.32)$$

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \left(-k\nabla T\right) - \rho C_P \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q. \qquad (2.33)$$

Они дополняются граничными условиями (2.16) и (2.7, 2.8). В уравнениях правая часть содержит источники. Связь между процессами обеспечивается через электропроводность в уравнении (2.32), зависящую от температуры и через источники тепла в уравнении (2.33). После преобразований исходные уравнения (2.32), (2.33) приводятся к конечному виду систем алгебраических уравнений, которые для совместной задачи объединяются

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} K_I \\ K_T \end{bmatrix} \{I\} = \{Q_I\}; \\ \begin{bmatrix} K_T \\ K_T \end{bmatrix} \{T\} = \{Q_T\}. \end{cases}$$
(2.34)

47

алгебраических уравнений (2.34) для нестационарной Система нелинейной задачи требует многократного решения на каждом шаге по времени. Учитывая зависимость параметров от температуры, так же, как и распределения токов в проводящей среде, сходимость вычислительных процессов и погрешность расчетов являются серьезной проблемой. Для решения задачи необходимо увеличивать число элементов и уменьшать шаг по времени. Однако серьезное влияние на сходимость оказывает еще и вид нелинейности. Более гладкие зависимости при решении создают меньше затруднений. Существуют задачи, где нелинейности имеют сложный вид. Например, кривая намагничивания в электромагнитных задачах ДЛЯ электрических машин описывается с малой погрешностью, что создает проблемы при переходе к полям с большими индукциями. В задачах индукционного нагрева, где имеются ферромагнитные объекты, переход между областями с малыми и большими значениями индукции представляет собой проблему. При моделировании в Comsol ввиду низкой мощности тепловыделения в областях с низкими значениями индукции участок кривой намагничивания представлен в упрощенном виде. Вместо восходящего участка зависимости магнитной проницаемости задана постоянная величина, соответствующая максимальному значению для литой стали.

Проблема со снижением сходимости вычислительного процесса возникает при решении задач, когда одновременно учитываются зависимости магнитной проницаемости от напряженности поля и от температуры. В случае моделирования электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве иногда не удается ограничиться неизменными во времени значениями тока или мощности. Необходимость применения системы регулирования приводит к резкопеременному характеру изменения тока. Ухудшение сходимости вычислительного процесса в связанной задаче в этом случае требует гораздо больших усилий на ее преодоление.

2.7 Моделирование программного управления электротепловыми процессами в системе «многосекционный индуктор – загрузка»

Моделирование электротепловых процессов в системе индукционного нагрева заготовок из сплавов алюминия позволяет учесть изменение теплофизических параметров. Самый простой вид управляющего воздействия в виде постоянного значения мощности позволяет в большинстве случаев получить требуемое распределение температуры. Вместе с тем, существуют нестационарные режимы, обусловленные запуском или повторным включением, переходом на другой тип заготовок, когда необходимо производить изменение мощности по заранее определенному алгоритму. Для моделирования таких процессов требуется в электротепловой модели предусмотреть возможность задания настроек параметров интервалов управления. В общем случае управляющее воздействие для *i*-й секции должно иметь вид

$$u_i(t) = a_i \cdot f_1(t) \cdot \left(1 - H(t - t_1)\right) + b_i \cdot f_2(t) \cdot H(t - t_1).$$
(2.35)

Здесь: a_i, b_i — масштабирующие коэффициенты, соответствующие уровням мощности до и после переходного процесса; $f_1(t), f_2(t)$ — функции, описывающие плавное изменение управляющего воздействия во время переходного процесса; $H(t - t_1)$ — ступенчатая функция (функция Хевисайда), описывающая скачкообразный переход от одного значения к другому (от 0 к 1); t_1 — момент времени, когда происходит переключение функции управления.

Изменение мощности тепловыделения возможно программировать разными способами. В первом случае функцию (2.35) можно непосредственно задать при описании источников в модели электромагнитной задачи. Тогда функция $u_i(t)$ будет иметь размерность тока (плотности тока) или напряжения

$$j_i(t) = a_i \cdot f_1(t) \cdot \left(1 - H(t - t_1)\right) + b_i \cdot f_2(t) \cdot H(t - t_1).$$
(2.36)

Второй вариант – это введение функции множителя перед выражением, выполняющим расчет мощности тепловыделения в элементе согласно (2.31)

$$Q_i(t) = Q_{1i} \cdot f_1(t) \cdot \left(1 - H(t - t_1)\right) + Q_{2i} \cdot f_2(t) \cdot H(t - t_1).$$
(2.37)

Для немагнитного материала загрузки оба варианта задания мощности источников тепловыделения равноценны, так как связь между плотностью тока и мощностью тепловыделения не содержит нелинейной составляющей, как в случае с ферромагнитными материалами. Дальнейшие расчеты показали работоспособность предлагаемых алгоритмов вычисления.

2.8 Моделирование замкнутой системы управления тепловыми процессами в системе «многосекционный индуктор – загрузка»

Замкнутая система управления в большинстве случаев эффективнее, чем управление, решает задачу обеспечения программное заданного распределения температуры в загрузке. Наличие нескольких факторов, таких, как изменение температуры окружающей среды, начальной температуры качество поверхности заготовок (окисная пленка, смазка, заготовок, шероховатость), отклонения поверхности направляющих от горизонтальной линии, отклонения напряжения источника питания, непостоянство коэффициента мощности В контуре, приводят К возникновению некомпенсируемых возмущений и отклонению от заданного состояния объекта управления.

Построение замкнутой системы регулирования в многосекционном индукторе возможно с использованием нескольких каналов управления. Применение преобразователей частоты для питания секций позволяет регулировать их мощности независимо друг от друга. Наличие теплового контакта между заготовками обусловливает тепловые потоки вдоль осевой Таким образом, система регулирования содержит линии. объект с внутренними связями, что усложняет процедуру синтеза. В известных работах, посвященных синтезу многосвязных систем автоматического регулирования [44, 48, 58], рассмотрены различные варианты определения передаточных матриц объекта и выполнен расчет регуляторов. Высокая сложность задачи предопределяет применение аналитических моделей видов объекта, полученных с помощью различных аппроксимации. Существенное снижение размерности при переходе К системе с сосредоточенными параметрами позволяет решить весь комплекс задач, но при этом возрастает погрешность моделирования. Формальное достижение заданных траекторий для ограниченного числа точек не гарантирует адекватного поведения всего объекта. В результате анализа ситуации принято решение о использовании численной модели тепловых процессов в качестве базовой для исследования поведения многосвязной системы управления.

Применение электротепловой модели для данной задачи встречает серьезные затруднения. В отличие от программного управления, где режимы переключения, сопровождающиеся перемещением заготовок, занимают относительно немного времени по сравнению с процессом нагрева неподвижных заготовок, практически все время происходит изменение управляющих воздействий. Кроме того, скорость изменения управляющего сигнала сложно контролировать, что также ухудшает сходимость. При программном управлении фронт ступенчатой функции и скорость изменения сигнала ограничиваются с помощью времени перехода от одного состояния к другому. Таким образом, проблемы с ухудшением сходимости для САР оказались намного сложнее, что вынудило перейти к использованию только тепловой модели.

Для формирования управляющего воздействия в САР возможно применение различных подходов. Качественное управление с использованием сложных регуляторов может быть обеспечено при организации совместной работы пакета, моделирующего тепловые процессы, и приложения Simulink. В этом случае Simulink выступает в роли внешней оболочки. Взаимодействие расчетных алгоритмов теоретически возможно, но требования к ресурсам компьютера сильно возрастают, не говоря уже о времени расчета. Более экономичным, хотя с меньшей функциональностью, является моделирование процесса автоматического регулирования средствами пакета, используемого для расчета тепловых процессов.

Для решения задачи предусматривается выбор контрольных точек на геометрической модели заготовок, обеспечение непрерывного отображения расчет управляющих воздействий температуры, для каждого канала управления (каждой секции) И изменение величины мощности тепловыделения в каждой заготовке с учетом таких особенностей, как краевые эффекты.

$$u_i(t_n) = k \big(T_{3i,n} - T_{i,n} \big).$$
(2.38)

Здесь: $T_{3i,n}$ – температура задания для *i*-го канала управления для момента времени t_n ; $T_{i,n}$ – расчетное значение температуры в *i*-й точке контроля для момента времени t_n ; k – коэффициент регулятора температуры.

Использование регулятора простейшего вида связано с ограничениями в наборе встроенных функций. Но, учитывая тепловую инерционность объектов нагрева, для данной задачи указанных возможностей оказалось достаточно.

Выражение (2.38) предполагает учет ограничений мощности и в то же время достижение требуемой температуры. Простым вариантом соблюдения указанных требований является использование двухпозиционного регулятора. Тогда управляющее воздействие может быть записано следующим образом

$$u_i(t_n) = \left(1 - H(T_{3i,n} - T_{i,n})\right).$$
(2.39)

Особенности аппроксимирующего выражения для ступенчатой функции позволяют получить не только значения 0 и 1, но и промежуточные в случае близких сравниваемых значений.

Выбор геометрической точки в качестве контрольной в каждой заготовке производится с помощью опций программы Comsol. Выбранной точке присваивается наименование и задается переменная. Например, для первой заготовки в индукторе (на входе) тока получает обозначение u1, а контролируемая переменная *T*. Если взять заданное значение температуры для первого канала T=500 K, то с учетом принятых обозначений выражение (2.39) примет вид

$$u_i(t_n) = (1 - H(500 - u1)).$$
(2.40)

Выводы по главе

- Разработана нелинейная тепловая модель процесса нагрева заготовок многосекционного индуктора, учитывающая теплообмен излучением между заготовками и футеровкой, теплопередачу между заготовками через контактный слой, с дискретно изменяющейся скоростью перемещения заготовок.
- Построены аналитические аппроксимирующие выражения для температурных зависимостей физических свойств сплава с погрешностью менее 2%.
- Построена модель электромагнитных процессов в системе «многосекционный индуктор – заготовки», учитывающая изменение температуры в загрузке при дискретном перемещении заготовок.

- Построена мультифизическая электротепловая модель индукционной системы с дискретно перемещающимися заготовками. Определены ограничения на параметры модели, связанные со сходимостью вычислительного процесса.
- 5. Предложен алгоритм построения системы программного управления нагревом заготовок в многосекционном нагревателе методического действия на основе полнофункциональной мультифизической модели индукционного нагревателя.
- 6. Предложен алгоритм построения замкнутой многоканальной системы регулирования температуры заготовок в многосекционном нагревателе методического действия на базе нелинейной тепловой модели.

3. Определение параметров индукционной системы при программном управлении нагревом

Способы управления системой индукционного нагрева зависят от возможностей источников питания, наличия необходимого количества измерительных систем и требований к качеству процесса управления в статических и динамических режимах. В данном разделе исследуются возможности системы программного управления в процессе выхода на установившийся режим, необходимость использования ложных слитков и влияние темпа выдачи заготовок на предельные отклонения температуры от заданного уровня. Программное управление индукционным нагревом может быть исследовано на базе связанных электротепловых моделей, но некоторые задачи приходится рассматривать отдельно, в частности, определение параметров индуктора и настройка колебательных контуров.

Исследования в работе проведены на основе индукционной установки, используемой в производстве завода Самарского металлургического завода. Для прессования используются установки двух типов, рассчитанных на разные габариты слитков (табл.3.1).

Таблица 3.1.

-				
Nº	Характеристика	Ед. измерения	Ин-800	Ин-1100
1	Производительность печи	т/час	9	12
2	КПД нагревателя		0,62	0,6
3	Температура нагрева слитков	град.	460÷550	460÷550
4	Допустимое отклонение	град.	±30	±30
5	Время нагрева слитков	Мин.	40÷240	75÷450
6	Размеры нагреваемых слитков			
7	диаметр	мм	480, 630, 780	630, 780, 935, 1075
8	длина	мм	700÷1850	700÷1850
9	масса	кГ	360±1400	610±2300
10	Количество одновременно	шт.	3÷8	3÷8
	нагреваемых слитков			
11	Длина индукционного нагревателя	MM	6746	6746

Параметры индукционных нагревателей и заготовок

3.1 Расчет параметров секций индукторов и определение частоты напряжения при настройке контура на резонанс токов

Математическая модель электромагнитных процессов формулируется для системы многосекционного индуктора с заготовками (рис.3.1), дискретно перемещающимися в сторону выхода на расстояние, равное длине одной заготовки. В связи с тем, что скорость перемещения невелика, при расчете наведенных токов и тормозящих усилий в загрузке ею можно пренебречь.

В процессе нагрева заготовок в индукторе формируется распределение температуре по длине загрузки. Электропроводность материала заготовок снижается. Это приводит к увеличению глубины проникновения тока. В результате, изменяются приведенные значения активного и реактивного сопротивлений заготовок и всей загрузки, что приводит к изменению мощности индуктора и коэффициента мощности. Для разных индукторов эти изменения отличаются по величине. В первой секции индукторов эти прогревается на меньшее значение температуры, поэтому изменение мощности будет меньше, чем для последней, шестой секции индуктора. Изменение коэффициента мощности имеет более сложную связь с параметрами заготовок и индукторов.





Температурные зависимости удельного сопротивления и электропроводности сплава Д16 представлены таблице 3.2 [48,50].

Таблица 3.2.

т, °С	20	100	200	300	400	450	500
$ ho$, х 10^{-8} Ом \cdot м	5	6	7	8	9	9	10
<i>g</i> , ×10 ⁶ См/м	20	16,6	14,3	12,5	11,1	10,05	10

Электрические свойства загрузки индуктора

По результатам расчета параметров индуктора при начальном и конечном распределении температуры в заготовках, находящихся в зоне воздействия электромагнитного поля рассматриваемого индуктора, получены значения мощности, напряжения, тока, позволяющие оценить сопротивления и коэффициент Ввиду мощности. сложности регулирования емкости конденсаторной батареи удобнее использовать подстройку частоты напряжения источника питания, чтобы поддерживать заданный коэффициент мощности колебательного контура. Для этого нужно выполнить расчеты на основе имеющихся данных. Пример определения частоты напряжения, обеспечивающей настройку контура, для одного из вариантов представлен ниже. При проведении расчетов ток задается только в одном индукторе, в остальных ток равен нулю.

Процедуру расчета параметров индуктора в программном пакете Elcut покажем на примере первой заготовки.

Напряжение на индукторе $U_{uho} = 375$ В;

частота напряжения f=50 Гц;

активная мощность индуктора $P_{uhd} = 397,6$ кВт;

полная мощность индуктора S=5821 кВА;

реактивная мощность индуктора

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{5821^2 - 397, 6^2} = 5807 \text{ kBAp}$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{397,6}{5821} = 0,068;$

Величина суммарной индуктивности индуктора с учетом всех близко расположенных заготовок $L = 72,16 \cdot 10^{-6}$ Гн; (определяется в ходе расчета индуктора);

Индуктивное сопротивление индуктора

$$x_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 76,16 \cdot 10^{-6} = 0,024$$
 OM

Исходное значение емкости определяется из условия настройки контура на резонанс токов при начальной температуре заготовок T=20 градусов и

частоте f=50 Гц. Для параллельной схемы замещения с компенсирующей емкостью должно выполняться соотношение

$$x_C = x_L = 0,024$$
 Om;

Вычисление реактивного сопротивления емкости производится по выражению

$$x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot C}$$

Отсюда можно рассчитать значение емкости

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot x_C} = \frac{1}{2 \cdot 3, 14 \cdot 50 \cdot 0, 024} = 0,134 \text{ } \Phi.$$

После этого вычисляем значения реактивной составляющей тока индуктора и тока компенсирующей емкости

$$I_L = \frac{U}{x_L} = \frac{350}{0,0238} = 14740$$
 A;

$$I_C = \frac{U}{x_C} = \frac{350}{0,0229} = 15230$$
 A.

Величина тока емкости значительно превосходит реактивную составляющую тока индуктора, следовательно, требуется дальнейшее снижение частоты для достижения баланса токов. После нескольких вариантов расчета определяем окончательные значения частоты тока для первой секции индуктора в установившемся тепловом режиме.

Согласно заданному по длине индуктора распределению температуры в заготовках (табл.3.1) производится заполнение значений удельной электропроводности и выполняется расчет параметров индуктора для новых значений тока (напряжения) и частоты.

Аналогичные расчеты проведены для других секций индуктора, результаты сведены в таблицу 3.3.

Nº	т, °С	I _и ,	<i>Р</i> _и ,	<i>U</i> _и ,	S,	<i>Q</i> _и ,	F, Гц	С,	cosφ	L,	<i>I</i> _C ,	I_L ,
инд		кА	кВт	В	кВА	кВАр		Φ		мкГн	ĸА	кА
1	20	14,51	341,6	350	5079	5067	50	0,132	0,073	76,99	14,51	14,48
	100	14,48	354,3	350	5068	5056	49,75	0,132	0,07	77,56	14,43	14,44
		14,55	357	350	5093	5080	49,5	0,132	0,07	76,45	14,36	14,51
		14,62	359,8	350	5117	5104	49,25	0,132	0,07	76,56	14,29	14,58
2	20	15	374,2	350	5250	5237	50	0,138	0,071	73,51	15,16	15,16
	200	15,49	406,7	350	5422	5407	48	0,138	0.078	74,05	14,93	16,08
		14,93	383,5	350	5208	5194	49,9	0,138	0,074	73,91	15,13	15,11
3	20	14,5	343,7	337,5	4894	4882	50	0,138	0.07	73,32	14,66	14,66
	300	14,79	392,9	350	5177	5162	50	0,138	0,076	74,4	15,2	14,98
		14,88	396,5	350	5208	5193	49,7	0,138	0,076	74,43	15,11	15,07
		14,9	397,7	350	5215	5200	49,6	0,138	0,076	74,43	15,08	15,1
4	20	14,61	349	340	4967	4955	50	0,138	0.07	73,32	14,56	14,92
	400	14,69	402,5	350	5142	5126	50	0,138	0,078	74,89	15,2	14,88
		14,96	414,9	350	5236	5220	49	0,138	0,079	74,97	14,9	15,17
		14,82	408,6	350	5187	5171	49,5	0,138	0,079	74,93	15.05	15.03
5	20	14,61	348,9	340	4967	4955	50	0,138	0,07	73,33	14,73	14,77
	450	14,59	410,7	350	5107	5090	50	0,138	0,08	75,32	15,2	14,8
		14,31	393,3	340	4865	4849	49,5	0,138	0,081	75,36	14,62	14,51
		14,36	395,7	340	4882	4866	49,3	0,138	0,081	75,38	14,56	14,57
6	20	13,75	312,8	340	4675	4665	50	0,13	0,067	78	14,73	13.88
	500	13,33	350,4	340	4532	4518	50	0,13	0,077	80,19	13,88	13,5
		13,46	355,6	340	4576	4562	49,5	0,13	0,078	80,24	13,74	13,63
		13,51	357,8	340	4593	4579	49,3	0,13	0,078	80,26	13,69	13,68

Параметры индукторов при определении резонансных частот

Отклонение частоты напряжения от начального значения не превышает 0,7 Гц для пятой и шестой секций индуктора. В других случаях значения отклонений меньше. В целом, токи индуктора и естественного коэффициента мощности при подстройке частоты изменяются не столь заметно. Однако активная составляющая тока индуктора равна для шестой секции индуктора $I_{\mu} = 921$ А и разница индуктивного и емкостного токов составляет

 $\Delta I_x = I_L - I_C = 14730 - 13880 = 850$ А, что приводит к возрастанию тока, потребляемого контуром до 1253 А, то есть прирост составляет 36% по отношению к активной составляющей.

В процессе нагрева загрузки с учетом перемещения заготовок и регулирования мощности распределения температуры могут быть различными. Система регулирования частоты обладает достаточным быстродействием, чтобы оперативно реагировать на возникающие отклонения. При выбранном варианте параметров индуктора определено значение мощности тепловых потерь в проводниках катушек индуктора и мощности тепловыделения в заготовках. Результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

№ инд	1	2	3	4	5	6		Сумма
$\Delta P_{_{\mathcal{U}\mathcal{H}\mathcal{O}}}$, кВт	155	146	143	141	139	141		865
№ заг	1	2	3	4	5	6	7	
<i>Р_{заг}</i> , кВт	179	160	166	175	184	195	217	1278

Мощности секций индуктора и заготовок

По суммарным значениям активных мощностей определено значение мощности, подведенной к индуктору

$$P_{uhd,\Sigma} = \Delta P_{uhd,\Sigma} + P_{3ac,\Sigma} = 2143 \text{ кBt},$$

и среднее значение электрического коэффициента полезного действия $\eta_{_{\mathcal{I}\!\mathcal{I}}} = P_{_{\mathcal{I}\!\mathcal{I}\!\mathcal{L}}} / P_{_{\mathcal{U}\!H\!\partial,\Sigma}} = 0,596$.

3.2 Исследование влияния теплового сопротивления контактного слоя между заготовками на тепловые процессы

Тепловые процессы в заготовках описываются дифференциальными уравнениями в частных производных вида

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-k\nabla T\right) - \rho C_P \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q.$$
(3.1)

Третья компонента в левой части характеризует зависимость температуры от скорости перемещения. Особенностью рассматриваемого процесса является небольшое время, затрачиваемое на движение, по сравнению временем между перемещениями (несколько секунд по сравнению с 20 минутами). Таким образом, градиент температуры по длине индуктора, причиной имеет не скорость перемещения, а перепад температуры в соседних заготовках. Для расчетов можно принять уравнение без компоненты, содержащей скорость

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-k\nabla T\right) = Q. \qquad (3.2)$$

Процесс перемещения заготовок при таком подходе заменяется на имитацию, когда изменяются условия: с помощью дискретного изменения теплопроводности контактных слоев и «включения» или «отключения» источников тепловыделения заготовки оказываются в условиях, как будто произошло перемещение.

Кроме функции коммутации контактные слои выполняют и задачу моделирования реальных процессов. Шероховатость торцевых поверхностей, отклонение поверхностей от вертикали, наличие окисной пленки создают проблему при расчете тепловых потоков между заготовками.

Неопределенность величины теплового сопротивления контактного слоя между заготовками усложняет процедуру выбора эффективного алгоритма управления процессом нагрева [59, 60]. Жесткие требования к отклонениям температуры в заготовке в процессе нагрева и непосредственно перед прессованием приводят к необходимости учета возможных вариантов изменения параметров. Цель данного исследования заключается В определении влияния параметров контактного слоя на тепловые потоки между заготовками и на распределение температуры. Особенность конструкции индуктора заключается в различии длин заготовок и секций индуктора, что приводит к существенным градиентам в осевом распределении удельной мощности тепловыделения. Заранее нельзя сказать, какой вид теплообмена предпочтительнее - с максимальными или минимальными потоками тепла через контактный слой.

Для снижения погрешности при моделировании использовалась связанная (мультифизическая) модель, использующая непосредственный обмен результатами расчета электромагнитных и тепловых процессов. Изменение параметров осуществлялось на каждом шаге по времени. Особенно важно было оценить влияние краевых эффектов при формировании распределения температуры в заготовке, расположенной в выходной секции индуктора.

На рис.3.2а представлена геометрическая модель электротепловой задачи, содержащая шесть секций индуктора и семь заготовок. Заготовки

60

смещены немного вперед, к выходу из индуктора, поэтому расположение несимметрично по длине. Между индуктором и заготовками имеется футеровка, однако в данной задаче расчет тепловых процессов выполняется без ее непосредственного учета, так как главное преимущество при расчете тепловых потоков излучения между элементами системы здесь не реализуемо из-за наличия газовой среды, исключающей использование корректное проведение расчетов. Для имитации перемещения заготовок через индуктор, а также для задания термического сопротивления на стыке заготовок предусмотрены области, моделирующие контактное сопротивление. При загрузке новой заготовки в индуктор происходит скачкообразное изменение коэффициента теплопроводности контактного слоя от нуля до расчетного значения. Выход заготовки из индуктора также имитируется: коэффициент теплопроводности контактного слоя снижается до нуля, а на линии между предпоследней и последней заготовками задается теплообмен с внешней средой вместо условия непрерывности.

При построении сетки конечных элементов области заготовок имеют сгущение только в районе контактных слоев (рис.3.26). Использование низкой частоты тока приводит к увеличению глубины проникновения и не требует уменьшения размеров элементов. Отсутствие ферромагнитных материалов позволяет использовать равномерную сетку. Определяющими требованиями к размеру элементов становятся геометрические размеры (толщина) контактного слоя и проблемы со сходимостью вычислительного процесса, чувствительного к размерам элементов и шагу по времени.

Более детальное изображение индуктора в районе первой заготовки представлено на рис.3.3.

В электромагнитной задаче в заготовках вводится выражение для расчета электропроводности с заранее подобранными параметрами

$$g = 2 \cdot 10^7 \left(1 - (T - 273) \cdot 0,001 \right)$$
CM. (3.3)

При нагреве автоматически производится пересчет электропроводности в зависимости от температуры *T*, определяемой в тепловой задаче.



Рис.3.2 Геометрическая модель электротепловой задачи шестисекционного индуктора: R1, R3, R5, R7, R9, R11, R13 – заготовки; R2, R4, R6, R8, R10, R12 – области контактных слоев между заготовками; R14 – воздушная среда; R15 – футеровка; R16, R17, R18, R19, R20, R21 - обмотки секций индуктора.

Мощность тепловыделения в заготовках, находящихся в первых трех секциях индуктора зависит только от температуры, так как напряжение принято максимальным. При прохождении последних трех секций индуктора мощность должна быть скорректирована, чтобы обеспечить траекторию температуры в заданных пределах. Так как реально процедура перемещения осуществляется имитация движения не предусмотрена, то за счет ступенчатого перехода от тока *i*-й секции к току (i+1)-й секции. Моменты времени переключения значений тока соответствуют перемещению заготовок на одну позицию. Длительность перемещения явно не задается (мгновенное перемещение), но реально в программе ограничена величиной зоны перехода ступенчатой функции между состояниями 0 и 1.



Рис.3.3 Геометрическая модель электротепловой задачи первой секции индуктора: R1 — первая заготовка; R2 — область контактного слоя между заготовками; R3 — вторая заготовка; R14 воздушная среда; R15 — футеровка; R16 — обмотка первой секции индуктора.

В качестве аппроксимирующего выражения ступенчатой в программе Comsol выбрана встроенная функция $flc1hs(t-t_1,\Delta t)$ [36]. Для предотвращения ухудшения сходимости вычислительного процесса в данных расчетах время перехода Δt задано равным 10 сек. Ниже рассмотрено составление выражений для системы, обеспечивающей темп выдачи заготовок единица за 1000 с. Поэтому моменты переключения для токов и мощностей кратны величине 1000 с.

В результате выбора этих параметров для четвертой секции индуктора плотность тока снижается на 5% в момент времени 4000 с:

$$J = (1 - 0.05 \cdot flc 1hs(t - 4000, 10)) \cdot 21 \cdot 10^{6} A / M^{2};$$

в пятой секции плотность тока снижается на 5% в момент времени 4000 с, на 25% снижается в момент времени 5000 с:

$$J = (1 - 0.05 \cdot flc hs(t - 4000, 10) - 0.25 \cdot flc hs(t - 5000, 10)) \cdot 20 \cdot 10^{6} A / M^{2};$$

в шестой секции плотность тока снижается на 5% в момент времени 4000 с, на 25% снижается в момент времени 5000 с, на 10% снижается в момент времени 6000 с

$$J = (1 - 0.05 \cdot flc1hs(t - 4000, 10) - 0.25 \cdot flc1hs(t - 5000, 10) - 0.1 \cdot flc1hs(t - 6000, 10)) \cdot 19 \cdot 10^{6};$$

В тепловой задаче для регулирования температуры результат расчета мощности тепловыделения, импортированный из электромагнитной задачи, используется в соответствии с алгоритмом изменения мощности, обусловленным перемещением заготовок через индуктор:

в первой заготовке

$$Q = Qav_emqa(flc1hs(t-6000,1) - flc1hs(t-7000,1)) Bm / m^3;$$

во второй заготовке

$$Q = Qav_emqa(flc1hs(t-5000,1) - flc1hs(t-7000,1)) Bm / M^3;$$

в третьей заготовке

$$Q = Qav_emqa(flc1hs(t-4000,1) - flc1hs(t-7000,1)) Bm / M^3;$$

в четвертой заготовке

$$Q = Qav_emqa(flc1hs(t-3000,1) - flc1hs(t-7000,1)) Bm / M^3;$$

в пятой заготовке

$$Q = Qav_emqa(flc1hs(t-2000,1) - flc1hs(t-7000,1)) Bm / m^3;$$

в шестой заготовке

$$Q = Qav_emqa(flc1hs(t-1000,1) - flc1hs(t-7000,1)) Bm / M^3;$$

в седьмой заготовке

$$Q = Qav_emqa(1 - flc_1hs(t - 7000, 1)) Bm / M^3.$$

Для моделирования процесса транспортировки последней заготовки к прессу предусмотрено отключение нагрева в момент времени 7000 с. Кроме этого, в контактном слое между шестой и седьмой заготовками одновременно

производится уменьшение коэффициента теплопроводности для имитации устранения теплового контакта. В течение времени сверх указанной величины 7000 с происходит остывание поверхностно слоя за счет конвекции и излучения и перераспределение температуры во внутренних областях.

Моделирование контактного слоя в реальном масштабе приводит к использованию слишком мелкой сетки элементов и неоправданному возрастанию оперативной памяти и времени расчета. Поэтому вместо реальных размеров воздушного зазора в пределах от 1 мм до 0,1 мм принята 10 коэффициента толщина равная MM с корректировкой слоя теплопроводности. Эффективный коэффициент теплопроводности определен с учетом процессов конвективного теплообмена между поверхностями. В результате приняты значения коэффициента в диапазоне от 0,5 до 5 Bт/(м · град).

При моделировании процесса нагрева заготовок при неизменной мощности каждой секции индуктора значения мощности были определены исходя из требования выхода на заданное температурное распределение. Учитывая ограничения, обусловленные длиной индуктора и временем и нагрева, а также отсутствие регулирования, отклонения температуры во всех экспериментах превысили допустимые значения.

Распределение температуры в загрузке после нагрева в течение 7000 с представлено на рис.3.4. Из рисунка видно, что градиент температуры по толщине заготовок ярко проявляется в первых заготовках, а затем снижается.

Диаграммы распределения температуры на поверхности и на осевой линии загрузки представлены на рис.3.5-3.8. Различия в диаграммах довольно незначительны. Можно отметить меньшее отклонение по длине диаграмм для случая зазора 1 мм.

Более подробно на рис.3.9-3.12 показаны диаграммы температуры на поверхности и на осевой линии последней заготовки в момент времени, когда прекращен нагрев заготовки, находящейся на выходе из индуктора, а также через 60 и 120 секунд после выхода из индуктора. В целом, перепады

температур при всех значениях зазора выходят за допустимые пределы. На рис.3.12 наблюдаются меньшие отклонения. Кроме того, максимальное значение температуры наблюдается не на краю, а посередине.



Рис.3.4 Распределение температуры в загрузке в момент времени 7000 с.









В зависимости от величины термического сопротивления контактного слоя изменяются значения тепловых потоков на границе соприкосновения заготовок. На рис.3.13-3.3.16 представлены диаграммы тепловых потоков через контактный слой вдоль радиальной координаты. Практически

неизменной остается диаграмма плотности потока между пятой и шестой заготовками при всех значениях толщины слоя. Между остальными заготовками величина потока снижается, что закономерно, так как термическое сопротивление увеличивается.



Рис.3.7 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) загрузки при зазоре между заготовками 0,5 мм в момент времени 7000 с.



Рис.3.9 Диаграммы температуры 7-й заготовки при зазоре между заготовками 0,1 мм: на поверхности 1 – при t=7000 c; 2 – при t=7060 c; 3 – при t=7120 c; на осевой линии 4 – при t=7120 c; 5 – при t=7060 c; 6 – при t=7000 c.



Рис.3.8 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) загрузки при зазоре между заготовками 1 мм в момент времени 7000 с



Рис.3.10 Диаграммы температуры 7-й заготовки при зазоре между заготовками 0,25 мм: на поверхности 1 – при t=7000 с; 2 – при t=7060 с; 3 – при t=7120 с; на осевой линии 4 – при t=7120 с; 2 – при t=7060 с; 3 – при t=7000 с.



Рис.3.11 Диаграммы температуры 7-й заготовки при зазоре между заготовками 0,5 мм: на поверхности 1 – при t=7000 с; 2 – при t=7060 с; 3 – при t=7120 с; на осевой линии 4 – при t=7120 с; 2 – при t=7060 с; 3 – при t=7000 с.



Рис.3.12 Диаграммы температуры 7-й заготовки при зазоре между заготовками 1 мм: на поверхности 1 – при t=7000 c; 2 – при t=7060 c; 3 – при t=7120 c; на осевой линии 4 – при t=7120 c; 2 – при t=7060 c; 3 – при t=7000 c



Рис.3.13 Диаграммы плотности теплового потока между заготовками при зазоре между заготовками 0,1 мм в момент времени 7000 с: 1 – между 5 и 6; 2 – между 6 и 7; 3 – между 1 и 2; 4 – между 3 и 4; 5 – между 2 и 3; 6 – между 4 и 5.



Рис.3.14 Диаграммы плотности теплового потока между заготовками при зазоре между заготовками 0,25 мм в момент времени 7000 с: 1 – между 5 и 6; 2 – между 6 и 7; 3 – между 1 и 2; 4 – между 3 и 4; 5 – между 2 и 3; 6 – между 4 и 5.

На основании анализа проведенных исследований и приведенных на рис.3.4-3.16 диаграмм, определены максимальные отклонения температуры для каждого значения зазора между заготовками. Результаты сведены в таблицу 3.5.

Проведенные при одних и тех же значениях мощности и времени нагрева расчеты для разных значений теплового сопротивления контактного слоя показали, что перепад температур в пределах одной заготовки, которая

находится на выходе из индуктора, снижается с уменьшением теплового сопротивления.





Рис.3.15 Диаграммы плотности теплового потока между заготовками при зазоре между заготовками 0,5 мм в момент времени 7000 с: 1 – между 5 и 6; 2 – между 6 и 7; 3 – между 1 и 2; 4 – между 3 и 4; 5 – между 2 и 3; 6 – между 4 и 5.

Рис.3.16 Диаграммы плотности теплового потока между заготовками при зазоре между заготовками 1 мм в момент времени 7000 с: 1 – между 5 и 6; 2 – между 6 и 7; 3 – между 1 и 2; 4 – между 3 и 4; 5 – между 2 и 3; 6 – между 4 и 5.

Таблица 3.5

			Окон	чание нагре	ева	После транспортировки			
Nº	λ,	Δx,	T_{MAKC} , T_{MUH} , ΔT ,			Т _{макс} , °С	Т _{мин} ,	ΔΤ,	
	Вт/(м · °С)	мм	°C	°C	°C		°C	°C	
1	5	1	522	472	50	506	478	28	
2	2	0,5	525	480	45	510	485	25	
3	1	0,2	528	487	41	513	491	22	
4	0,5	0,1	520	507	13	519	510	9	

Влияние величины термосопротивления контактного слоя на неравномерность распределения температуры в заготовке на выходе из индуктора

Снижение контактного сопротивления более логично должно быть причиной формирования гладкой зависимости температуры по длине загрузки. Но в данном случае, часть времени заготовки находятся в зоне действия двух индукторов, имеющих разную мощность. Перенос тепла между заготовками сказывается на выравнивании распределения температуры более значительно, чем строгая изоляция заготовок.

Сложность определения величины теплового сопротивления контакта между заготовками делает предпочтительным вариант расчета в наихудших

условиях, что дает заведомо более хороший результат при отклонении величины сопротивления в меньшую сторону.

Учет краевых эффектов в распределении удельной мощности заготовки, расположенной в выходной секции индуктора, показал, что при небольших зазорах между заготовками наблюдается превышение температуры относительно заданной величины. Только в случае большого зазора (1 мм) между заготовками возросшее тепловое сопротивление позволяет снизить перепад температуры до приемлемого уровня. Однако, даже в этом случае на выходе из индуктора распределение температуры имеет недопустимые отклонения. Решение проблемы возможно при увеличении длительности нагрева и снижения градиентов вдоль радиальной координаты. Но выявленная зависимость величины отклонения от зазора (табл.3.4) не позволяет гарантировать хороший результат ввиду случайного характера процессов при перемещении заготовок. Использование мультифизических моделей имеет ограничения, выявленные в ходе экспериментов. В приведенных расчетах удалось применить только программное управление, так как внешнее воздействие на токи секций (со стороны тепловой задачи при регулировании температуры) сразу приводит к неустойчивости вычислительного процесса. Таким образом, возникшие ограничения не дают возможности провести моделирование разнообразных ситуаций и способов управления:

1. Модель тепловых процессов в случае высоких температур должна теплообмен необходимые учитывать излучением. Однако, В электромагнитной задаче воздушная среда или вакуум в тепловой задаче имеют свойство непрозрачности, которое является преградой для излучения. Таким образом, теплообмен излучением между областями В мультифизической модели нереализуем.

2. Комбинация таких способов регулирования температуры, как программное управление с помощью переключения мощности во времени, и система автоматического регулирования также неработоспособна, несмотря на то, что отдельно в тепловой задаче таких ограничений не существует.

Таким образом, мультифизические задачи могут быть использованы при настройке моделей. В большинстве практических ситуаций необходимо вводить аппроксимирующие выражения, позволяющие исключить электромагнитную модель.

3.3 Программное управление индукционным нагревом

с одинаковым током секций индуктора

Моделирование тепловых процессов в многосекционном индукторе предполагает на каждом этапе перемещения заготовок загрузку холодной и выгрузку горячей. Перед первой заготовкой располагается еще одна, всегда холодная, так как в ней нет источников теп ла. При перемещении она занимает место первой, и температура в этой области снижается до начального значения 273 К. Перемещение заготовок реализуется с помощью задания скорости на короткое время во всех областях одновременно. Скорость перемещения и длительность операции подбираются таким образом, чтобы происходило смещение всей загрузки на длину одной заготовки. Использование нелинейных моделей позволяет автоматически пересчитывать все параметры для каждой заготовки в электромагнитной и тепловой моделях. В электромагнитной модели значительно изменяются условия: напряженность магнитного поля и расположение заготовок относительно секций индуктора.

В электромагнитной задаче электропроводность во всех заготовках задается зависящей от температуры в виде соотношения (3.3).

Процесс перемещения ввиду его кратковременности и незначительного влияния на величину мощности не учитывается.

В тепловой задаче параметры задаются зависящими от температуры, мощность тепловыделения импортируется из электромагнитной задачи

$$C_P = 820 + 1.2 \cdot (T - 273) - 0.00077 \cdot (T - 273)^2 \quad \text{Arc} / (\kappa_2 \cdot \circ C); \qquad (3.4)$$

$$Q = Qav_emqa \ Bm / M^3. \tag{3.5}$$

В контактных областях коэффициент теплопроводности изменяется ступенчато при достижении момента перемещения заготовки в индуктор

$$k = flc1hs(t - 6600, 10) \cdot 5 + 0,001 \ Bm/(M \cdot {}^{\circ}C).$$
(3.6)

Скорость перемещения имеет зависимость в виде отдельных кратковременных импульсов на общем графике (рис.3.17).

71

Длительность импульсов на диаграмме соответствует интервалу перемещения, а отрезок времени между импульсами соответствует интервалу нагрева.



Рис.3.17 Временная диаграмма скорости перемещения заготовок через индуктор

Скорость движения заготовок зависит от мощности механизма толкателя и допустимых нагрузок на направляющие, возникающих от взаимодействия сил толкателя и сил трения. Для удобства программирования скорость перемещения привязана к длине заготовки с целью обеспечения синхронизацию процессов. Так как при моделировании предусмотрены ситуации с изменением скорости движения, то нужна четкая привязка позиций заготовок и контактных слоев.

v=0.09*(flc1hs(t-1000,1)-flc1hs(t-1010,1)+flc1hs(t-2000,1)-flc1hs(t-2010,1)+flc1hs(t-3000,1)-flc1hs(t-3010,1)+flc1hs(t-4000,1)-flc1hs(t-4010,1)+flc1hs(t-5000,1)-flc1hs(t-5010,1)+flc1hs(t-6000,1)-flc1hs(t-6010,1)+flc1hs(t-7000,1)-flc1hs(t-7010,1)).(3.7)

Произведение значений скорости и времени перемещения дают расстояние, соответствующее длине заготовки. В данном случае в моменты времени, кратные 1000 с, происходит включение скорости на 9 секунд, что приводит к смещению всей загрузки на 0,9 метра.

Использование связанных электротепловых моделей, учитывающих взаимное влияние тепловых и электромагнитных процессов, обеспечивает малую погрешность при моделировании. В то же время в силу ряда причин отсутствует возможность применения регулирования температуры. Таким образом, остается вариант программного изменения мощности. Целью
исследования является определение параметров процесса, обеспечивающего достижение заданного перепада температуры по объему заготовки.

Для сравнения проведено моделирование с разными интервалами нагрева сплошных заготовок диаметром 1090 мм – от 900 с до 2000 с.

Главной задачей было выявление перепадов температуры при заданном значении. Для каждого значения интервала нагрева параметры подбирались путем последовательного изменения значений мощности с последующим расчетом и коррекцией. Результаты моделирования представлены на рис.3.18 – 3.27.

Моделирование тепловых процессов с интервалом нагрева 900 с

(общее время нагрева заготовки 6300 с)

Моделирование процесса нагрева заготовок В индукционном шестисекционном нагревателе с интервалом выдачи 900 с имеет цель определения достижимой погрешности температурного распределения при заданном значении 450 градусов и перепаде 30 градусов. Проведенные расчеты позволили экспериментальным путем подобрать значения токов в секциях индуктора, при которых диаграммы температуры в заготовках имеют близкие к наиболее приемлемым значениям (рис.3.18). Особенностью использования электромагнитной модели в Comsol является сложность задания одинаковых токов в витках катушки индуктора при ненулевой электропроводности. По этой причине вместо задания напряжения на катушке (секции) приходится задавать одинаковую плотность тока при нулевой электропроводности. В результате с ростом температуры сопротивление заготовок увеличивается и возрастает тепловыделение.

Диаграммы температуры имеют пилообразную форму. Особенностью является нестабильность максимального значения температуры на выходе из индуктора. Причина этого заключается в непостоянстве параметров заготовок, оказывающихся одновременно в каждой секции. Это приводит к перераспределению токов и мощностей в этих заготовках. В итоге с определенной цикличностью максимальная температура меняет свое значение.



Рис.3.18 Временные диаграммы температуры на поверхности заготовок: 1 – седьмая заготовка; 2 – шестая заготовка; 3 – пятая заготовка; 4 – четвертая заготовка; 5 – третья заготовка; 6 – вторая заготовка; 7 – первая заготовка.

Диаграммы температуры на рис.3.18 показывают, что допущен значительный перегрев. Для более подробного анализа построены диаграммы по длине загрузки на поверхности и осевой линии в момент времени 6300 с (рис.3.19).



Рис.3.19 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) загрузки в момент времени 6300 с.

В момент выхода заготовки из индуктора температуры на поверхности и на осевой линии значительно отличаются. Перепад температур находится в пределах 75-105 градусов. За время транспортировки к прессу такой перепад устранить сложно. Для иллюстрации изменения свойств системы представлены значения мощности в заготовках в процессе нагрева (табл.3.6). Особенно заметны изменения мощности в заготовках ближе к выходу из индуктора. Ток одновиткового индуктора для всех секций равен189 кА. Среднее значение перепада температур между поверхностью и центром равно 85 град.

Таблица 3.6

№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум
Р, кВт	164	133	124	136	125	134	139	955
при t=20 с								
Р, кВт	174	144	139	157	150	168	177	1109
при t=6300 с								

Мощность в заготовках в начале и конце нагрева

Для достижения требуемого распределения температуры в заготовках проведены аналогичные расчеты при уменьшении тока в секциях индуктора при одновременном увеличении интервалов времени на нагрев.

Диаграмма удельной мощности на поверхности загрузки показана на puc.3.20. В начальный момент времени, когда температура во всех заготовках одинаковая, удельные мощности совпадают во всех заготовках. По мере прогрева удельное сопротивление по длине загрузки приобретает вид возрастающей ступенчатой линии.



Рис.3.20 Диаграмма удельной мощности на поверхности загрузки в начальный момент времени при времени интервала нагрева 900 с.

Для интервала выдачи заготовок 1400с построена временная диаграмма удельной мощности на серединах поверхности заготовок (рис.3.21). Пилообразная форма диаграмм для каждой секции иллюстрирует изменение удельной мощности в небольшом диапазоне, так как приращение температуры для каждой заготовки не превышает 100 градусов.



Рис.3.21 Временные диаграммы удельной мощности на середине поверхности заготовок при времени интервала нагрева 1400 с.

Результаты расчетов представлены в таблицах 3.7 – 3.12 и проиллюстрированы на рис.3.22-3.27.

Таблица 3.7

Мощность в заготовках в начале и конце нагрева при токе секций 168 при времени интервала выдачи 1100 с

№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум
Р, кВт	130	105	98	107	98	106	110	754
при t=20 с								
Р, кВт	139	114	110	125	119	133	140	880
при t=7000 с								

Таблица 3.8

Мощность в заготовках в начале и конце нагрева при токе секций 165 кА при времени интервала 1200 с

№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум
Р, кВт при	125	101	94	103	95	102	106	726
t=20 c								
Р, кВт при	134	110	107	121	116	129	136	853
t=8400 c								

Перепад температур между поверхностью и центром снизился до 50-70 градусов.

Таблица 3.9

Мощность в заготовках в начале и конце нагрева при токе секций 154 кА при времени интервала

№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум
Мощность, кВт при t=20 с	109	88	82	90	82	89	92	632
Мощность, кВт при t=9800 с	110	95	90	103	98	109	115	720

Значение перепада температур между поверхностью и центром составляет 40-65 градусов.

Таблица 3.10

Мощность в заготовках в начале и конце нагрева при токе секций 151 кА при времени интервала 1500 с

№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум
Мощность, кВт при t=20 с	104	84	79	86	79	85	88	691
Мощность, кВт при t=10500 с	111	91	87	100	95	107	112	703

Перепад температур между поверхностью и центром составляет 35-65 градусов.

Мощность в заготовках в начале и конце нагрева при токе секций 141 кА при времени интервала 1800 с

№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум
Мощность, кВт при t=20 с	90	73	69	75	69	74	77	527
Мощность, кВт при t=10500 с	96	79	77	88	84	94	99	617

Перепад температур между поверхностью и центром находится в пределах 30-50 градусов.

Таблица 3.12

Мощность в заготовках в начале и конце нагрева при токе секций 134 кА при времени интервала 2000 с

№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум
Мощность, кВт при t=20 с	83	67	62	68	62	66	70	478
Мощность, кВт при t=10500 с	88	72	70	80	76	85	90	561

Перепад температур между поверхностью и центром находится в диапазоне 30-45 градусов.

Диаграммы температуры на поверхности и осевой линии в момент прохождения всего индуктора при t=7700 с представлены на рис.3.22. Перепад температур между поверхностью и центром снизился до 70-100 градусов, что не удовлетворяет требованиям и требует дополнительных расчетов.



Рис.3.22 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) при нагреве при времени интервала нагрева 1100 с в момент времени 7700 с.



Рис.3.23 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) при нагреве при времени интервала нагрева 1200 с в момент времени 8400 с.



Рис.3.24 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) при нагреве при времени интервала нагрева 1400 с в момент времени 9800 с.



Рис.3.26 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) при нагреве при времени интервала нагрева 1800 с в момент времени 12600 с.



Рис.3.25 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) при нагреве при времени интервала нагрева 1500 с в момент времени 10500 с.



Рис.3.27 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) при нагреве при времени интервала нагрева 2000 с в момент времени 14000 с.

Ha основании анализа результатов расчета параметров системы индукционного нагрева дискретно перемещаемых заготовок при питании всех секций одинаковым током можно сделать вывод о том, что для получения допустимых отклонений температуры от заданного значения требуется соответствующих увеличение времени интервалов нагрева, времени интервала нагрева 1800 – 2000 с. Такой вывод справедлив только с учетом транспортировки к прессу, BO время которой времени происходит выравнивание распределение температуры достижение полного И соответствия требованиям.

3.4 Оценка погрешности моделей

Построение расчетных моделей при проектировании индукционных систем нагрева всегда имеет различные ограничения, связанные С вычислительной мощностью компьютера, временем, затрачиваемым на решение задач, заданной погрешностью. Известно, что нелинейные задачи решаются гораздо медленнее, поэтому часто производится линеаризация различных параметров, таких как электропроводность, теплопроводность, теплоемкость. Ниже рассмотрены три варианта расчета электромагнитных и тепловых процессов в многосекционном нагревателе при неизменных значениях токов в секциях индуктора: 1 – нелинейная электротепловая модель; 2 – дискретно линеаризованная электромагнитная и нелинейная тепловая модели; 3 – дискретно линеаризованные электромагнитная и тепловая модели; 4 – линейная электротепловая модель. Дискретная линеаризация для каждой заготовки производилась на основании распределения температуры, полученного в результате решения нелинейной электротепловой задачи. Усреднение параметров для рабочего диапазона температур производилось для каждой заготовки с помощью исходных температурных зависимостей в пределах изменения коэффициентов и температуры. Как было указано ранее, принятая расчетная модель не может учесть все особенности реальных процессов, но число допущений невелико, и погрешность может быть снижена за счет экспериментальных или теоретических исследований. В частности, в электротепловой задаче теплообмен излучением между заготовками и футеровкой приходится упрощать и в граничных условиях заменять температуру футеровки на температуру окружающей среды с корректировкой коэффициента лучистого теплообмена.

В выражениях для коэффициентов электропроводности, теплопроводности и удельной теплоемкости вместо разности температур подставлены константы, соответствующей средним за интервал значениям температуры в каждой заготовке. Для четвертого варианта параметры приняты одинаковыми для всех заготовок и соответствующими температуре 230 градусов (табл.3.13).

80

Nº	1	2	3	4	5	6	7
Тср, С	35	100	165	230	295	360	425

Средние за интервал значения температуры на поверхности заготовок

Проведенные расчеты для трех вариантов моделей представлены в виде диаграмм на рис.3.28, 3.29 и таблицы 3.14.

Значения мощности тепловыделения в заготовках совпадают для второго, третьего и четвертого вариантов и являются неизменными в каждой заготовке в течение всего процесса нагрева. Для нелинейной модели значения мощности по мере нагрева изменяются. В первой и седьмой заготовках уровень мощности зависит еще и от краевых эффектов. В целом, в конце интервала суммарные значения мощностей составляют 537,6 и 530,3 кВт. Суммарные значения мощности в заготовках отличаются на 1,3%.

Таблица 3.14

Nº	1	2	3	4	5	6	7	сум
				$\rho=f(T)$				
Р, кВт	83.7	70.5	67.9	77.2	73.6	82.2	87.5	537,6
				$\rho_n = const$				
Р, кВт	83.6	69.4	67	75.8	72.1	80.8	81.6	530,3

Мощности тепловыделения в заготовках для линейных и нелинейных электромагнитных моделей

Проведенные для четырех вариантов моделей расчеты проиллюстрированы в виде диаграмм температуры на рис.3.28, 3.29. На осевой линии и на поверхности отличия диаграмм для линейных и дискретно линеаризованных моделей имеют свои особенности: на осевой линии в первых заготовках разница значений температуры для полностью линеаризованной (тепловая и электромагнитная) и линейной моделей невелика, что меньше, чем для пары частично линеаризованной (электромагнитная) и нелинейной моделей на 30 – 50 градусов. С продвижением к выходу из индуктора диаграмма для дискретно линеаризованной модели приближается к диаграмме более точной нелинейной модели. Разница составляет 5 – 25 градусов. Аналогичная картина наблюдается для диаграмм на поверхности, однако максимальная разница на участках с низкой температурой не превышает 30

градусов. Диаграмма для модели с постоянными параметрами (кривая 4) на всем протяжении находится ниже на 50 градусов.

Подводя итог проведенным исследованиям, можно сказать, что для установившегося режима, когда предварительно определены границы значений температуры для каждой заготовки, возможно использование полностью (электромагнитная и тепловая) или частично (электромагнитная) линеаризованных моделей дискретно для расчетов температурного распределения в загрузке. В последней заготовке максимальные значения перепадов температуры по длине и по радиусу для трех типов моделей не превышают 25 градусов, а средние значения отклонений не превышают 10 градусов, что допустимо. Нужно учитывать дополнительный эффект от выравнивания распределения на этапе транспортировки к прессу.



Рис.3.28 Диаграммы температуры на осевой линии по длине загрузки в момент времени 14000 с: 1 — нелинейная электротепловая модель; 2 - нелинейная тепловая и дискретно линеаризованная электромагнитная модель; 3 — дискретно линеаризованная электротепловая модель; 4 - линейная электротепловая модель.

Для случая с неизвестными заранее значениями температуры картина распределения будет близка к виду кривых 4 на рис.3.28 и 3.29. Отклонения температуры превышают допустимую величину и не могут быть устранены за счет этапа транспортировки. Сравнение времени решения задач для разных моделей показало, что значения находятся в пределах 2385 – 2550 секунд. Самое маленькое значение соответствует линейной модели. Столь малая разница между значениями объясняется тем, что самые большие затраты времени связаны с переходными процессами при включении перемещения. График диаграммы сходимости на этих участках становится резко переменным со значительным уменьшением шага по времени, что приводит к росту числа шагов.



Рис.3.29 Диаграммы температуры на поверхности по длине загрузки в момент времени 14000 с: 1 — нелинейная электротепловая модель; 2 - линеаризованная электротепловая модель; 3 линеаризованная электромагнитная и нелинейная тепловая модель; 4 - линейная электротепловая модель.

Сходимость вычислительного процесса достигается автоматическим подбором шага по времени независимо от того, выбран в решателе фиксированный шаг или произвольный. В случае с хорошей сходимостью шаг может быть очень большим, и задача решается очень быстро. При выборе фиксированного шага в решателе максимальное значение ограничивается выбранным значением. В рассматриваемой задаче в моменты передвижения заготовок формулировка дифференциального уравнения видоизменяется: добавляется компонента, содержащая скорость перемещения. В этом случае сходимость ухудшается, и шаги по времени уменьшаются. На рис.3.30 эти моменты отмечены локальными всплесками, показывающими обратную величину к шагу по времени. Если заданный шаг по времени равен 10 с, и в нормальном режиме (нагрев неподвижных заготовок) график проходит при неизменном значении 0,1, то во время перемещений шаг меняется (уменьшается) и график поднимается до значений от 1 ДО 10. B рассматриваемой задаче приняты меры по снижению максимального значения с помощью увеличения числа конечных элементов. Результаты решения получены при числе элементов ne=30000, что приводит к объему оперативной памяти 6 Гб. Соотношение объема оперативной памяти и времени расчета соответствуют возможностям персонального компьютера. При снижении числа элементов проблема сходимости при решении нелинейной задачи проявляется в виде более значительного уменьшения шага по времени и роста времени расчета. При определенных условиях (малое число элементов) процесс вообще не сходится.

На диаграмме время на оси абсцисс не соответствует реальному времени расчета.



Рис.3.30 Временная диаграмма изменения шага по времени, настраиваемого решателем

При исследовании погрешности расчета температуры на базе различных моделей были учтены процессы сходимости.

Обеспечение приемлемой погрешности расчетов возможно при использовании процедуры линеаризации процессов отдельно для каждой заготовки в случае с заранее известными границами температуры.

Для модели с неизменными параметрами во всем объеме загрузки результаты расчета являются неудовлетворительными. Наиболее эффективным способом является использование нелинейных моделей электротепловых процессов.

Уменьшение перепада температуры в заготовке на выходе со 100 до 30 градусов достигается снижением суммарной мощности тепловыделения в загрузке с 1109 кВт до 561 кВт и изменением интервала нагрева с 900 с до 2000с.

3.5 Индукционный нагрев с программным управлением и настройкой мощностей секций индуктора

Полученные в предыдущем разделе параметры индукционных нагревателей иллюстрируют медленное снижение перепада температуры по толщине заготовок при значительном увеличении времени нагрева. При фиксированной длине нагревателя ЭТО приводит к низкой производительности. Согласно имеющемуся опыту управления тепловыми процессами при ограничении на максимальное значение температуры подходящим вариантом является увеличение мощности в первых секциях для быстрого разогрева поверхностного слоя и последующего выравнивания температуры до заданного значения.

При интервале нагрева, равном единице за 900 с, подобраны на основании нескольких экспериментов значения мощности для каждой секции (табл.3.15), чтобы температура во всех заготовках в любой момент времени на превышала предельно допустимых значений, и в последней заготовке распределение имело минимальные отклонения от требуемого значения (рис.3.31, 3.32).

Таблица 3.15

Мощность в заготовках											
№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум			
Мощность при t=20 с, кВт	206	195	168	143	95	80	92	979			
Мощность при t=6300 с, кВт	224	220	199	175	120	102	117	1157			
		Токи	секций ин	дуктора							
№ секции	1	2	3	4	54	6					
Плотность тока, $A / M M^2$	19	21	20	16	13	14					
Ток, кА	209	231	220	176	143	154					

Параметры индукционных нагревателей при времени интервала нагрева 900 с



Рис.3.31 Диаграммы температуры на середине поверхности заготовок: 1 — первая заготовка; 2 вторая заготовка; 3 — третья заготовка; 4 — четвертая заготовка; 5 — пятая заготовка; 6 —шестая заготовка; 7 — седьмая заготовка.



Рис.3.32 Диаграммы температуры на поверхности (1) и оси (2) загрузки в момент времени 6300 с

Перепад температур между поверхностью и осевой линией выходит за допустимые отклонения только в области торцевой поверхности седьмой заготовки, что при некоторых условиях может быть устранено при транспортировке к прессу. На рис.3.33 показаны временные диаграммы удельной мощности в середине заготовок. В отличие от первого способа задания тока в секциях наблюдается значительное снижение: максимальное значение равно $5,6 \cdot 10^6$ BT/M³, а минимальное $2,1 \cdot 10^6$ BT/M³, что приводит к снижению мощности в заготовках со значения 206 кВт до 95 кВт при начальной температуре.



Рис.3.33 Временные диаграммы удельной мощности: 1 — первая заготовка; 2 — вторая заготовка; 3 — третья заготовка; 4 — четвертая заготовка; 5 — пятая заготовка; 6 — седьмая заготовка; 7 — шестая заготовка.

Дальнейшее увеличение времени нагрева заготовок на каждом интервале до 1000 секунд проиллюстрировано в виде таблицы 3.16 и рисунков 3.34, 3.35.

Таблица 3.16

Мощность в заготовках									
№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум	
Мощность, кВт	206	195	182	141	96	105	120	1045	
при t=20 с									
Мощность, кВт	226	226	224	171	93	64	57	1061	
при t=7000 с									
			Токи сен	кций индук	тора				
№ секции									
Плотность тока,									
A / MM^2									
Ток, кА	209	231	231	165	165	175			
при t= 20 с									
Ток, кА	209	231	231	157	116	106			
при t=7000 с									

Параметры индукционных нагревателей при времени интервала нагрева 1000 с

Отличие от предыдущего варианта параметров нагревателя заключается в том, что токи в четвертой, пятой и шестой секциях изменяются по мере продвижения заготовок. Это позволяет учесть перетоки мощности между секциями и предотвратить перегрев заготовок. Суммарная мощность в заготовках вначале даже больше, чем в предыдущем варианте, но при выходе на установившийся режим общая мощность снижается, что соответствует сниженной производительности. Выражения для плотности тока в секциях имеют вид:

J1=19000000 А/м²;

J2=21000000 A/м²;

J3= 21000000 А/м²;

J4= $(1-0.05*flc1hs(t-4000,10))*15000000 \text{ A/m}^2;$

 $J5 = (1-0.05*flc1hs(t-4000,10)-0.25*flc1hs(t-5000,10))*15000000 \text{ A/m}^2;$

 $J6 = (1-0.05*flc1hs(t-4000,10)-0.25*flc1hs(t-5000,10)-0.1*flc1hs(t-6000,10))*16000000 \text{ A/m}^2.$

Диаграммы температуры на поверхности и осевой линии в момент времени 7000 с, показанные на рис.3.34, показывают, что перепад температуры между поверхностью и осевой линией снизился до 30 градусов уже в шестой заготовке. Небольшое превышение перепада наблюдается на краю (около 40 градусов).



Рис.3.34 Диаграммы температуры на поверхности (1) и оси (2) загрузки в момент времени7000 с

На временных диаграммах удельной мощности, показанных на рис.3.35, видно, что в момент времени t=4000 с, начинается ступенчатое снижение в последних секциях.

В целом, более сложный алгоритм задания токов секций позволяет не только быстрее выйти на заданный уровень температуры, но и показывает возможности программного управления в различных переходных режимах, как, например, при смене типа заготовок.



Рис.3.35 Временные диаграммы удельной мощности: 1 — первая заготовка; 2 — вторая заготовка; 3 — третья заготовка; 4 — четвертая заготовка; 5 — пятая заготовка; 6 — шестая заготовка; 7 — седьмая заготовка.

Дальнейшее снижение токов в секциях индуктора и изменение интервала времени нагрева до 1100 с проиллюстрировано с помощью таблицы 3.10 и рис.3.36. Суммарные значения мощности тепловыделения в заготовках в начале процесса нагрева и при выходе на установившийся режим снизились (табл.3.17). Согласно принятому алгоритму быстрый выход на максимальное значение температуры поверхности привел к тому, что уже на участке пятой заготовки перепад температуры составляет тридцать градусов. В данном варианте расчета корректировка токов последних секций не производилась. Это привело к тому, что минимальный перепад температуры между поверхностью и осевой линией седьмой заготовки выходит за допустимые значения. Проблема заключается в том, что мощность в седьмой заготовке, в частности краевой эффект, недостаточна для компенсации потерь на торце. В принципе, задача разрешима, но важен факт ограничения возможностей индукционного нагрева при неравномерном распределении системы мощности по длине загрузки.

Параметры индукционных нагревателей при времени интервала нагрева 1100 с

Мощность в заготовках								
№ заготовки	1	2	3	4	5	6	7	сум
Мощность, кВт при t=20 с	201	161	149	119	72	57	67	826
Мощность, кВт при t=7000 с	222	185	181	150	92	75	86	991
Токи секций индуктора								
№ индуктора	1	2	3	4	5	6		
Плотность тока, $A / M M^2$	19	19	19	13,5	11,5	13		
Ток, кА	209	209	209	149	127	143		



Рис.3.36 Диаграммы температуры на поверхности (1) и оси (2) загрузки в момент времени 7700 с

В результате исследования вариантов программного управления мощности секций индукционного нагревателя путем подбора токов во всех секциях следуют выводы:

возможности такого способа выше, чем при одинаковом токе секций, и достаточно интервала времени 1000 с;

снижение мощности последней секции имеет ограничения, обусловленные недостаточной компенсацией потерь на торце.

Выводы по главе

- Разработанная электромагнитная модель индукционного нагревателя, позволила рассчитать параметры секций индуктора и компенсирующих устройств, обеспечивающих функционирование с высоким коэффициентом мощности во всем диапазоне температур при наличии системы настройки частоты.
- 2. Проведенное исследование влияния термического сопротивления между заготовками в индукционном нагревателе на распределение температуры по длине загрузки показало диапазон изменения значений перепада температур в зависимости от эквивалентной толщины контактного слоя. Найденные параметры контактного слоя включены во все модели тепловых процессов многосекционного нагревателя.
- Обеспечение приемлемой погрешности расчетов при разработке программного управления многосекционным нагревателем возможно при использовании процедуры линеаризации процессов отдельно для каждой заготовки в случае с заранее известными границами температуры.
- 4. Наиболее эффективным способом является использование нелинейных моделей электротепловых процессов.
- 5. Использование одинакового тока во всех секциях нагревателя нерационально, так как уменьшение перепада температуры в заготовке на выходе со 100 до 30 градусов достигается увеличением интервала нагрева с 900 до 2000 с.
- Применение программного управления нагревом с коррекцией токов секций при выходе на установившийся режим позволяет вести процесс с интервалом нагрева 1000 с.
- Снижение мощности последней секции нагревателя имеет ограничения, обусловленные недостаточной компенсацией тепловых потерь на торце заготовки на выходе из индуктора.

4 Моделирование тепловых процессов в загрузке с дискретно перемещаемыми заготовками при использовании САР

Моделирование тепловых процессов в загрузке многосекционного индуктора требует знания о распределении удельной мощности по длине. Проведенные В предыдущих разделах расчеты показали влияние напряженностей магнитного поля в секциях и электропроводности в каждой заготовке на общую картину распределения удельной мощности (рис.4.1). Ha представленном рисунке мощности в первой и последней заготовках приняты меньше, чем в остальных, чтобы обеспечить заданное распределение температуры. Как видно, наблюдаются значительные провалы в зонах стыков секций и завышенные значения мощности на краях, что связано с краевыми эффектами. В зависимости от того, в какой части заготовки проявляется эффект, результат может привести к существенной неравномерности распределения температуры или быть полностью устранен за счет процессов теплопроводности в заготовках. Для корректного задания мощности в областях тепловыделения заготовок поверхностный слой разбивается на участки, для каждого из которых задается отдельное значение. В ходе моделирования мощности, связанные с определенной секцией индуктора, изменяются одновременно.



Рис.4.1 Диаграмма распределения удельной мощности по длине загрузки

Области тепловыделения в поверхностных слоях заготовок обозначены на рис.4.2. Как видно, протяженность зон тепловыделения больше длины заготовок и совпадет с длиной секций, исключая первую и седьмую заготовки. При каждом перемещении столба заготовок происходит сдвиг поля температур, что сопровождается изменением свойств. Для регулирования температуры в заготовках выбраны точки на расстоянии 0,1 м от выхода из индукторов. Таким образом, число каналов регулирования не совпадает с числом заготовок. На рис.4.3 показано расположение контрольной точки в первой заготовке.



Рис.4.2 Распределение зон мощности в заготовках: Заготовка 0 – перед входом в индуктор; Заготовка 1 – 7 – заготовки в индукторе; И1 – И6 – зоны тепловыделения секций индуктора; КЭ – области краевых эффектов в 1-й и 7-й заготовках.

Ввиду наличия множества участков с разными значениями мощности тепловыделения автоматизация процесса ввода затруднена и ограничивается объединением по секциям. Соотношение удельных мощностей в пределах секции зависит от температуры, так как краевые эффекты определяются величиной удельного электрического сопротивления. Величина коэффициента теплопроводности зависит от температуры, но в областях 94 контактных слоев выполняет функции ключа: до определенного времени коэффициент мал, чтобы ограничить распространение тепла, а потом возрастает и способствует выравниванию температурного поля.



Рис.4.3. Геометрическая модель первой заготовки в индукционном нагревателе; R2 – футеровка; R5 – область тепловыделения с краевым эффектом; R6 – область тепловыделения в зоне действия первой секции индуктора; R14 – область теплового контакта между заготовками; R22 – область заготовки без тепловыделения; R29 - область тепловыделения в зоне действия второй секции индуктора; PT1 – точка контроля температуры.

В последней заготовке такое управление коэффициентом теплопроводности позволяет перейти от имитации теплового контакта к теплообмену с окружающей средой путем конвекции и излучения.

В алгоритме моделирования предусмотрена возможность включения секций индуктора только после перемещения заготовок на одну позицию, что

позволяет исключить использование ложных слитков. Для предотвращения перегрева торца заготовки, крайней со стороны выхода, она при перемещении в последующие секции должна отстоять от края секции на 0,1 м, чтобы краевой эффект был достаточным для компенсации потерь, но не приводил к локальному перегреву.

В последующих расчетах использованы два типа заготовок – сплошные и пустотелые. Внешние размеры у них одинаковые: диаметр 1075 мм, длина 900 мм. У пустотелой внутренний диаметр равен 600 мм. Материал заготовок – сплав Д16. Заданная температура нагрева 450 градусов, перепад температуры по радиусу и длине не более 30 градусов.

Ниже представлена процедура подготовки параметров индукционной системы, работающей с интервалом нагрева 1000 секунд.

Коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости задаются в виде зависимостей от температуры

$$k = 117 + 0.16 \cdot (T - 273) - 1.9 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273)^2 - 4.3 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 273)^3; \quad (4.1)$$

$$C_P = 820 + 1, 2 \cdot (T - 273) - 7, 7 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273)^2.$$
(4.2)

Коэффициент теплопроводности для областей, имитирующих контакт, содержит ступенчатую функцию

$$k = flc1hs(t - 6000, 10) \cdot 5 + 0,001. \tag{4.3}$$

Между шестой и седьмой заготовками в подобласти контакта коэффициент теплопроводности в момент времени 1000 с принимает значение k=5, что соответствует появлению в индукторе еще одной заготовки и формированию теплового контакта. В момент времени t=7000 с коэффициент теплопроводности изменяет свое значение до нуля, что соответствует выгрузке седьмой заготовки из индуктора

$$k = (flc1hs(t-1000,10) - flc1hs(t-7000,10)) \cdot 5 + 0,001.$$
(4.4)

Для областей тепловыделения

Первая заготовка:

участок первой секции с зоной краевых эффектов

$$Q = 10^7 \cdot (flc1hs(t - 6000, 1) - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u1 - 373, 1)); \quad (4.5)$$

Участок первой секции с регулярной зоной

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t - 6000, 1) - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u1 - 373, 1)); (4.6)$$

Участок второй секции с регулярной зоной

 $Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t - 6000, 1) - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u2 - 373, 1)); (4.7)$ Вторая заготовка:

участок второй секции

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t-5000,1) - flc1hs(t-7000,1)) \cdot (1 - flc1hs(u2 - 473,1)).$$
(4.8)

Третья заготовка:

участок третьей секции

 $Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t - 4000, 1) - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u2 - 473, 1)).$ (4.9)

Четвертая заготовка:

участок третьей секции

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t - 3000, 1) - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u3 - 573, 1)); (4.10)$$
участок четвертой секции

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t - 3000, 1) - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u4 - 673, 1)).$$
(4.11)

Пятая заготовка:

участок четвертой секции

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t - 2000, 1) - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u4 - 673, 1)); (4.12)$$
участок пятой секции

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc_{1}hs(t - 2000, 1) - flc_{1}hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc_{1}hs(u5 - 763, 1)).$$
(4.13)

Шестая заготовка:

участок пятой секции

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t - 1000, 1) - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u5 - 763, 1)); (4.14)$$

участок шестой секции

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (flc1hs(t-1000,1) - flc1hs(t-7000,1)) \cdot (1 - flc1hs(u6-773,1)).$$
(4.15)

Седьмая заготовка:

участок шестой секции

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (1 - flc_{1}hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc_{1}hs(u6 - 773, 1));$$
(4.16)

участок шестой секции с зоной краевых эффектов

$$Q = 4 \cdot 10^{6} \cdot (1 + 3 \cdot flc1hs(t - 6000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(t - 7000, 1)) \cdot (1 - flc1hs(u - 773, 1));$$

$$(4.17)$$

В первой и седьмой заготовках крайние участки формируют краевые эффекты.

В момент времени t=7000 секунд седьмая заготовка выходит из индуктора, и мощность тепловыделения в ней становится равной нулю.

Выражения для источников тепла в слое тепловыделения каждой заготовки составляются с учетом изменения уставок одновременно с перемещением в новое положение.

4.1 Моделирование процесса нагрева дискретно перемещаемых заготовок с многоканальным регулятором температуры

Исследование возможностей программного управления, выполненное в предыдущем разделе, позволяет сделать вывод о том, что достижение заданного температурного распределения возможно лишь при увеличении времени нагрева или при увеличении длины индуктора. В настоящем разделе рассмотрен вариант с применением многоканальной замкнутой системы автоматического регулирования температуры. Моделирование замкнутой системы регулирования температуры возможно несколькими способами. Более простым в реализации является использование встроенных функций программы Comsol, обеспечивающих расчет управляющих воздействий в каждом канале И коррекцию мощности внутренних источников тепловыделения на каждом шаге по времени.

Система регулирования температуры В многосекционном индукторе рис.4.4. Контроль температуры на представлена на выходе секций осуществляется с помощью датчиков температуры ДТ1 ДT6. Для _ формирования управляющего воздействия используются простейшие пропорциональные регуляторы. Как показано выше в выражениях для расчета удельной мощности на каждом участке области тепловыделения заготовок, регулятор в моделирующей программе построен с помощью встроенных в Comsol ступенчатых функций $(1 - flc hs(u_k - T_k, \Delta t)).$



Рис.4.4 Функциональная схема шестисекционного индукционного нагревателя

Для определения возможностей САР в достижении заданного распределения температуры в заготовке, выгружаемой из индуктора на конвейер для транспортировки к прессу, проведен ряд расчетов для разного темпа выдачи заготовок. Каждое полученное решение является результатом нескольких численных экспериментов, в ходе которых корректировались значения мощности каждой секции на основании полученных диаграмм температуры на поверхности и на осевой линии всех заготовок в индукторе.

Исследования проведены с повышенным заданием температуры для диапазона интервала нагрева от 800 секунд до 1100 секунд.

4.1.1 Исследование варианта системы нагрева с интервалом нагрева 800 с

Системы регулирования всех шести каналов отрабатывают заданные сигналы качественно (рис.4.5), не возникает колебаний температуры, отклонения от заданных значений минимальны. Однако, это говорит о том, что именно в точке контроля все хорошо выглядит. На диаграммах температуры в момент времени t=5600 сек на поверхности и осевой линии перепад температуры по длине больше, чем по радиальной координате (рис.4.6). Так как заготовка подается к прессу с задержкой, то проведен расчет температуры в заготовке, вытолкнутой из индуктора. Диаграммы температуры вдоль поверхности и осевой линии представлены на рис.4.7.



Рис.4.5 Временные диаграммы температуры в контрольных точках секций на поверхности заготовок: 1 – седьмая; 3- шестая; 5 – пятая; 7 – четвертая; 9 – третья; 11 – вторая; 13 – первая; на осевой линии: 2 – седьмая; 4- шестая; 6 – пятая; 8 – четвертая; 10 – третья; 12 – вторая; 14 – первая.



Рис.4.6. Диаграммы температуры в загрузке в момент времени 5600 с: 1 – на поверхности; 2 – на осевой линии.



Рис.4.7. Диаграммы температуры в последней заготовке на поверхности: 1 - в момент времени 5600 с; 2 - в момент времени 5660 с: 3 – в момент времени 5720 с; на осевой линии: 4 - в момент времени 5720 с; 5 - в момент времени 5660 с: 6 – в момент времени 5600 с.

Исходный перепад температуры на поверхности составляет 50 градусов. Через одну минуту он снижается до 49 градусов, а через две минуты становится равным 28 градусам. В последнем случае проявляется эффект усиления охлаждения с торцевой поверхности.

На осевой линии характер кривой не меняется, но температура возрастает с 432 градусов до 435 через минуту и до 437 градусов через две минуты. Перепад

температуры в пределах заготовки меняется с 80 градусов до 70 через минуту и до 40 градусов через две минуты после выталкивания из индуктора.

Приведенные на рис.4.8 – 4.10 временные диаграммы мощности для всех секций индуктора показывают, что первоначальный разогрев во всех секциях начинается при максимальных значениях. Переход к режиму регулирования происходит тем медленнее, чем ближе среднее значение к номинальной мощности. Характер регулирования (частота переключений) отражен не полностью, что связано и с шагом по времени и со временем перехода между ступенями мощности.



Рис.4.8. Временная диаграмма удельной мощности в первой заготовке



Рис.4.9. Временная диаграмма удельной мощности в четвертой заготовке



Рис.4.10. Временная диаграмма удельной мощности в седьмой заготовке

4.1.2 Исследование варианта системы нагрева с интервалом нагрева 900 с

Увеличение времени нагрева на каждом этапе на 100 сек не очень заметно сказалось на временных диаграммах температуры (рис.4.11). В то же время, диаграммы температуры на поверхности и осевой линии загрузки значительно сблизились: отклонения по радиальной координате между ними не превышает 20 градусов (рис.4.12) в момент времени 6300 сек, что соответствует окончанию цикла.

Более детальное изображение диаграмм на поверхности и осевой линии для нескольких моментов времени показано на рис.4.13. Перепад температур в момент времени t=6300 сек составляет 22 градуса, через 60 секунд уменьшается до 15 градусов. А еще 60 секунд становится равным 22 градусам. Вначале температура выравнивается, а затем поверхность становится более холодной, хотя перепад остается очень небольшим.



Рис.4.11 Временные диаграммы температуры в контрольных точках секций на поверхности заготовок: 1 – седьмая; 3- шестая; 5 – пятая; 7 – четвертая; 9 – третья; 11 – вторая; 13 – первая; на осевой линии: 2 – седьмая; 4- шестая; 6 – пятая; 8 – четвертая; 10 – третья; 12 – вторая; 14 – первая.



Рис.4.12. Диаграммы температуры в загрузке в момент времени 6300 с: 1 – на поверхности; 2 – на осевой линии.



Рис.4.13. Диаграммы температуры в последней заготовке на поверхности: 1 - в момент времени 6300 с; 2 - в момент времени 6360 с; 3 – в момент времени 6420 с; на осевой линии: 4 - в момент времени 6420 с; 5 - в момент времени 6360 с; 6 – в момент времени 6300 с.

4.1.3 Исследование варианта системы нагрева с интервалом нагрева 1000 с

Дальнейшее увеличение времени нагрева и снижение темпа выдачи заготовок до одной за 1000 секунд приводит к увеличению длительности регулярного режима, когда секции индуктора работают в режиме ограничения мощности и поддержания температуры на заданном уровне (рис.4.14).

Сравнительно быстрый выход температуры поверхности во всех секциях на заданный уровень приводит к уменьшению перепада температур между поверхностью и осевой линией. В третьей секции перепад составляет 25 градусов. Только в первой и второй секциях перепад превышает допустимое отклонение.

Диаграммы температуры на поверхности и осевой линии во всей загрузке для момента времени 7000 сек, т.е. окончании времени цикла, проходят очень близко (рис.4.15).

Низкая интенсивность нагрева приводит к снижению перепада температуры по длине до 4 градусов на поверхности и до 6 на осевой линии, начиная с момента выхода из индуктора в течение 2 минут. Вдоль радиальной координаты отклонение снижается с 8 до 4 градусов (рис.4.16).



Рис.4.14 Временные диаграммы температуры в контрольных точках секций на поверхности заготовок: 1 – седьмая; 3- шестая; 5 – пятая; 7 – четвертая; 9 – третья; 11 – вторая; 13 – первая; на осевой линии: 2 – седьмая; 4- шестая; 6 – пятая; 8 – четвертая; 10 – третья; 12 – вторая; 14 – первая.



Рис.4.15. Диаграммы температуры в загрузке в момент времени 7000 с: 1 – на поверхности; 2 – на осевой линии.



Рис.4.16. Диаграммы температуры в последней заготовке на поверхности: 1 - в момент времени 7000 с; 2 - в момент времени 7060 с: 3 – в момент времени 7120 с; на осевой линии: 4 - в момент времени 7120 с; 5 - в момент времени 7060 с; 6 – в момент времени 7000 с.

Временные диаграммы удельной мощности в секциях показывают, что средние значения в регулярном режиме становятся еще меньше.

4.1.4 Исследование варианта системы нагрева с интервалом нагрева 1100 с

Увеличение времени цикла до 7700 секунд привело к дальнейшему увеличению доли регулярного режима на каждом этапе нагрева заготовок, перемещающихся через индуктор. Заготовки с высоким значением коэффициента теплопроводности не требуют такого низкого темпа. Однако, переходные режимы, возникающие во время смены типа заготовок или после вынужденных перерывов, могут сопровождаться чередованием фаз нагрева и стабилизации температуры. Изменение темпа в процессе работы установки приводит к значительным отклонениям температуры, поэтому желательно знать, каким резервом обладает система.

Временные диаграммы температуры в контрольных точках секций, представленные на рис.4.17, показывают устойчивые переходные процессы и

снижение перепадов температуры в каждой заготовке в процессе нагрева и продвижения через индуктор. Перепад температуры между поверхностью и осевой линией снижен до нескольких градусов.



Рис.4.17 Временные диаграммы температуры в контрольных точках секций на поверхности заготовок: 1 – седьмая; 3- шестая; 5 – пятая; 7 – четвертая; 9 – третья; 11 – вторая; 13 – первая; на осевой линии: 2 – седьмая; 4- шестая; 6 – пятая; 8 – четвертая; 10 – третья; 12 – вторая; 14 – первая.

Несмотря на существующий продольный градиент в первых заготовках, в двух последних он практически исчез (рис.4.18). Отклонения температуры по длине и по радиальной координате достигли возможного минимума (рис.4.19), обусловленного тепловыми потоками внутри заготовок и охлаждающими потоками.

На рис.4.20 – 4.22 показаны временные диаграммы мощности тепловыделения в точках посередине поверхности заготовок. Неизменная величина мощности в первой заготовке свидетельствует о том, что температура в контрольной точке не выходит на ограничение, и мощность секции выбрана без запаса. В четвертой и седьмой заготовках мощность используется лишь на 25 и 15 процентов.



Рис.4.18 Диаграммы температуры в загрузке в момент времени 7700 с: 1 – на поверхности; 2 – на осевой линии.



Рис.4.19 Диаграммы температуры в последней заготовке на поверхности: 1 - в момент времени 7700 с; 2 - в момент времени 7760 с; 3 – в момент времени 7820 с; на осевой линии: 4 - в момент времени 7820 с; 5 - в момент времени 7760 с;: 6 – в момент времени 7700 с.


Рис.4.20 Временная диаграмма удельной мощности в первой заготовке



Рис.4.21 Временная диаграмма удельной мощности в четвертой заготовке



Рис.4.22 Временная диаграмма удельной мощности в седьмой заготовке

Характер изменения удельной мощности в заготовках в течение каждого цикла нагрева в целом не меняется. Как и в предыдущих экспериментах стадия нагрева с максимальной мощностью сменяется резким снижением уровня, достаточного для стабилизации температуры поверхности и создания теплового потока к внутренним областям.

Достижение заданной температуры в заготовках с помощью системы автоматического регулирования не требует тщательного подбора уровня мощности во всех секциях, однако, как показали расчеты при разном темпе выдачи заготовок, все же целесообразно производить корректировку. Это связано с тем, что в каждом случае (разные темпы выдачи) из-за несинхронного изменения температуры и удельной мощности в отдельных областях некоторых заготовок возможны локальные недогревы и перегревы относительно заданного значения. Возникающие неравномерности на диаграммах устраняются довольно плохо и приводят к затягиванию процесса. Суммарные значения мощности тепловыделения в заготовках в начальный момент времени для разных вариантов приведены в таблицах 4.1-4.4. Как видно из таблиц, корректировке подверглись значения мощности в заготовках 1 и 7, соответственно в секциях 1 и 6.

Таблица 4.1.

Мощность тепловыделения в заготовках при интервале нагрева 800 с

№ заг	1	2	3	4	5	6	7
Р, кВт	229	221	221	221	221	221	259

Таблица 4.2.

Мощность тепловыделения в заготовках при интервале нагрева 900 с

№ заг	1	2	3	4	5	6	7
Р, кВт	113	221	221	221	221	221	220

Таблица 4.3.

Мощность тепловыделения в заготовках при интервале нагрева 1000 с

№ заг	1	2	3	4	5	6	7
Р, кВт	210	221	221	221	221	221	220

Таблица 4.4.

Мощность тепловыделения в заготовках при интервале нагрева 1100 с

№ заг	1	2	3	4	5	6	7
Р, кВт	205	221	221	221	221	221	220

После анализа приведенных на рис.4.7, 4.13, 4.16, 4.19 диаграмм температуры на поверхности и осевой линии седьмой заготовки для моментов времени, соответствующих выходу заготовки из индуктора и поступлению под пресс, для четырех вариантов системы нагрева выявлены отклонения, которые сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5

	$t_{ m Harp}, c$	OF	Окончание нагрева			После транспортировки			
N⁰		Т _{макс} , °С	Т _{мин} , °С	ΔT, °C	Т _{макс} , °С	Т _{мин} , ℃	ΔT, °C		
1	5600	512	432	80	476	437	39		
2	6300	501	480	21	488	477	11		
3	7000	502	487	15	497	488	9		
4	7700	515	488	27	488	488	0		

Влияние времени нагрева на неравномерность температурного поля

Как видно из таблицы при интервале нагрева заготовок 900 с и более отклонения температуры для заготовки на выходе из индуктора и

непосредственно перед прессованием укладываются в требуемый диапазон. Средний уровень температуры изменяется незначительно и находится в пределах допустимых отклонений. Улучшается равномерность распределения во всем объеме заготовки.

При интервале нагрева заготовок, равном 800 с, на выходе из индуктора перепад температур существенно превышает допустимые значения. Выравнивание температуры в процессе транспортировки в течение 120 секунд снижает перепад до 39 градусов, что близко к предельным значениям, равным 30 градусам.

4.2 Исследование влияния количества контрольных точек на управляемость системы индукционного нагрева

Исходная система управления содержит шесть точек контроля температуры, расположенных на расстоянии 0,1 м от выхода из секций. Относительно заготовок местоположение датчиков отличается в зависимости от номера заготовки в индукторе.

Качество регулирования температуры характеризуется отклонениями от заданного распределения не только на выходе из индуктора, но и непосредственно перед прессом, а также на всех этапах нагрева. Сплавы алюминия обладают высокой теплопроводностью, и в рамках границ рассматриваемой технологии не возникает опасность появления недопустимых термонапряжений. При программном управлении нагревом выбор мощности секций осуществляется с учетом ограничений на предельное значение Использование температуры. системы автоматического регулирования имеет большие возможности, но требуется создание резерва мощности для отработки возникающих возмущений. Это приводит к перегрева. Поэтому необходим возможности локального контроль температуры по всей длине индуктора. Наличие таких факторов, влияющих на надежность системы измерения, как высокая температура, движение заготовок, усложняет ее построение. При всех положительных сторонах САР требуется решение некоторых проблем.

Для систем с распределенными параметрами, к которым относится индукционный многосекционный нагреватель движущихся заготовок,

важным вопросом является управляемость. Существующие подходы, хорошо развитые для систем с сосредоточенными параметрами, в данном случае требуют дополнительных исследований методик расчета. В первую очередь, применения привычного математического аппарата необходимо ДЛЯ представление СРП в виде аппроксимирующих выражений, позволяющих адекватно описать систему. В большинстве случаев такой подход имеет низкую результативность, так как соотношение размеров векторов состояния и управления не позволяет обеспечить качественное управление. Термин «ограниченная управляемость» в данном случае не полностью раскрывает сложность вопроса. Вместе с тем есть несколько работ, где переход к ССП вполне оправдан [[44, 48, 58]]. При индукционном нагреве дисков на испытательном стенде оказалось возможным ограничиться одной радиальной координатой и сформировать векторы состояния, измерения и управления с последующим их использованием в задаче синтеза системы управления.

При анализе динамики линейных многомерных систем с постоянными параметрами можно использовать представление во временной области, т. е. в пространстве состояний [44]

$$dx / dt = Ax + Bu + \Gamma d,$$
 $x(t_0) = x_0,$ (4.18)

$$y = Cx, \qquad (4.19)$$

или же представление в области комплексной переменной s, т. е. в частотной области

$$\overline{y}(s) = G(s)\overline{u}(s) + G_d(s)\overline{d}(s).$$
(4.20)

Переход от представления (4.18) — (4.19) к представлению (4.20) единствен, он осуществляется применением преобразования Лапласа к уравнениям (4.18) и (4.19) с нулевыми начальными условиями (x₀ = 0):

$$\overline{y} = C(sI - A)^{-1}B\overline{u}(s) + C(cI - A)^{-1}\Gamma\overline{d}(s),$$
 (4.21)

откуда G(s), Gd(s) — матричные передаточные функции системы по управлению и по возмущению:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B,$$
(4.22)

$$G_d(s) = C(sI - A)^{-1}\Gamma.$$
 (4.23)

На рис. 4.23 представлена многомерная структурная схема многоканальной системы регулирования.

Важным при анализе систем управления является понятие управляемости. Неформально система управляема, если найдется такое управление u(t), которое обеспечивает ее перевод из произвольного начального состояния x_0 в произвольное же состояние x_d за конечное время. Более строго определение управляемости может быть сформулировано следующим образом.

Система называется полностью управляемой, если из любого начального состояния $x_o(t_o)$ она может быть переведена в любое наперед заданное состояние $x_d(t)$ с помощью некоторого управления u(t) за конечное время $t - t_0 \ge 0$.



Рис. 4.23. Блок-схема многомерной системы регулирования

Возможен случай частично управляемой системы, т. е. системы, имеющей подмножества начальных состояний, из которых достижение произвольного желаемого состояния за конечное время невозможно.

Из этого дескриптивного определения для конкретных классов систем можно получить конструктивные условия управляемости. Так, в случае постоянных матриц **A** и **B** система (4.18), (4.19) будет полностью управляема тогда и только тогда, когда ранг матрицы управляемости L_c равен *n*, где

$$L_{c} \equiv \left[\mathbf{B}\mathbf{M}\mathbf{B}\mathbf{M}^{2}\mathbf{B}\mathbf{M}.\mathbf{M}^{n-1}\mathbf{B} \right].$$
(4.24)

Для выполнения указанного требования не обязательно обеспечение равенства размеров векторов состояния и управления. Но при анализе возможностей САР нагревом движущихся заготовок необходим учет как количества каналов, так и возможных ограничений. При определении ранга управляемости никак не отражен вопрос качества управляющих воздействий. Речь идет о однополярном сигнале, так как отрицательное управление в индукционном нагреве не предусмотрено. Тепловые потери в виде конвективных и радиационных потоков не могут рассматриваться как полноценные воздействия, так как весьма незначительны. Не имея возможности расчета параметров системы вида (4.20), остается проблема экспериментального определения границ управляемости и способов ее расширения.

При исследовании системы управления координаты контрольных точек оставались неизменными во всех экспериментах. Расположение датчиков выбрано, исходя из удобства их размещения, на расстоянии 0,1 м от выхода из секций индуктора (табл.4.6).

Таблица 4.6

	Координаты контрольных точек										
n	1	2	3	4	5	6					
Ζ, Μ	0,6	1,7	2,95	4,05	5,2	6,26					
r, м	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54					

4.2.1 Моделирование системы индукционного нагрева с 6 каналами регулирования температуры

Эффективность управления САР температуры высока, и для сравнения с другими вариантами были произведены расчеты для разных интервалов нагрева заготовок. Определение уровня мощности для каждой секции индуктора, а также задающего сигнала выполнялось путем многократных расчетов, чтобы обеспечить формирование заданного распределения в последней заготовке и не допустить превышения температуры во всех заготовках в любой момент времени. Ввиду разницы длин секций и заготовок, ступенчатых диаграмм распределения температуры И удельного сопротивления мощность тепловыделения распределена неравномерно по длине, поэтому необходим учет диаграммы распределения мощности по всей длине загрузки. Полезная мощность для каждой секции суммируется в с диаграммой. При моделировании процесса соответствии нагрева использовалась только тепловая модель, поэтому в слое тепловыделения плотность мощности задавалась одинаковой, с учетом краевых эффектов секций, в пределах границ секций. Таким образом, в заготовке возможно ступенчатое распределение удельной мощности.

Моделирование САР температуры при интервале нагрева 900 с

Формирование заданного распределения температуры обеспечивается подбором мощности секций индуктора и хорошей работой системы регулирования. Кроме максимальных значений уровня мощности систему управления характеризуют средние или установившиеся значения мощности. таблице 4.7 Приведенные значения В мощности соответствуют установившемуся режиму или, точнее говоря, моменту времени перед перемещением заготовок после завершения цикла смены режима. Мощности тепловыделения найдены путем суммирования для каждой секции.

Таблица 4.7

n	1	2	3	4	5	6
Р, кВт	292	184	304	97	48	39

Мощность тепловыделения в заготовках для секций индуктора

Полученные временные диаграммы температуры в контрольных точках (рис.4.24) показывают, что в целом, система регулирования функционирует качественно. Мощность подобрана с некоторым запасом, чтобы обеспечить компенсацию различных возмущений. Последние три канала (секции 4, 5, 6) работают в режиме стабилизации. Указанные в таблице 4.7 значения мощностей в секциях 4 - 6 характеризуют среднюю мощность, а не максимальную, как в секциях 1 -3. Максимальный разогрев в первых секциях позволил снизить перепад температуры между поверхностью и центром до 20 градусов (рис.4.25). С учетом неравномерности вдоль осевой линии общий разброс температур составляет около 40 градусов. Этот разброс устраняется в ходе транспортировки заготовки к прессу. Тем не менее, последующие расчеты будут проведены для темпа выдачи заготовок 1100 секунд, чтобы упростить выход на режим при меньших мощностях И меньшем перерегулировании.



Рис.4.24 Диаграммы температуры в контрольных точках 1 – 6 в индукторе с 6 каналами регулирования при интервале нагрева 900 с: 1 – шестая точка; 2 - пятая точка; 3 – четвертая точка; 4 – третья точка; 5 – вторая точка; 6 – первая точка.



Рис.4.25 Диаграммы температуры на поверхности (1) и на осевой линии (2) 7-й заготовки в системе с шестью каналами регулирования при интервале нагрева 900 с в момент времени 6300 с.

Моделирование САР температуры при интервале нагрева 1100 с

Проведенные аналогичные расчеты для увеличенного времени нагрева заготовок при интервале нагрева 1100 сек показали похожую картину распределения температуры. Диаграммы не выходят за допустимые границы. Приведенные в таблице 4.2 значения мощности тепловыделения по секциям являются максимальными.

Таблица 4.8

n	1	2	3	4	5	6
Р, кВт	182	298	288	276	288	255

Мощность тепловыделения в заготовках для секций индуктора

Диаграммы температуры (рис.4.26) не дают полной информации о работе системы индукционного нагрева. Построение временной диаграммы мощности (рис.4.27) иллюстрирует изменение мощности нагрева всего индуктора. По мере продвижения заготовок к выходу из индуктора общее энергопотребление снижается. Это объясняется тем, что в индукторе все изначально холодные заготовки на всех позициях приобретают начальную температуру. Поэтому примерно через 4000 секунд все секции индуктора переходят в режим регулирования мощности. Среднее значение мощности снижается примерно в пять раз для всех секций по отношению к максимальному значению.



Рис.4.26 Диаграммы температуры в контрольных точках 1 – 6 в индукторе с 6 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с: 1 – шестая точка; 2 - пятая точка; 3 – четвертая точка; 4 – третья точка; 5 – вторая точка; 6 – первая точка.



Рис.4.27 Диаграммы мощности в загрузке в контрольных точках 4 – 6 в индукторе с 6 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с

Для нормальной работы системы нагрева допустимо снизить мощность источников питания, чтобы подведенную мощность не требовалось уменьшать за счет систем регулирования. Но при этом возникнет проблема увеличения длительности процесса выхода на регулярный режим.

4.2.2 Моделирование индукционной системы с тремя каналами регулирования

Уменьшение количества каналов регулирования до трех проведено при значениях мощности секций индуктора как в предыдущем эксперименте. В качестве контрольных оставлены точки 4 – 6.Параметры приведены в табл.4.9.

Таблица 4.9

n	1	2	3	4	5	6
Р, кВт	292	339	354	290	304	268

Мощность тепловыделения в заготовках для секций индуктора

Из диаграмм на рис.4.28, соответствующих нагреву с интервалом нагрева 1100 сек, видно, что температура на выходе из третьей секции выходит за предельно допустимые значения. Из этого следует вывод, что необходимо снизить тепловыделение в первых трех секциях.



Рис.4.28 Диаграммы температуры в контрольных точках 1 – 6 в индукторе с 3 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с: 1 – третья точка; 2 - шестая точка; 3 – пятая точка; 4 – четвертая точка; 5 – вторая точка; 6 – первая точка.

Избыточное значение мощности, как и в предыдущем случае, приводит к уменьшению среднего значения системой регулирования (рис.4.29).

На диаграммах не представлены температуры на поверхности и осевой линии. Но при перегреве в предыдущих секциях в последней секции перепад температур гарантированно удовлетворителен.



Рис.4.29 Диаграммы мощности в загрузке в контрольных точках 4 – 6 в индукторе с 3 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с: 1 – 6-я точка; 2 – 5 – точка; 3 – 4-я точка.

4.2.3 Моделирование индукционной системы

с тремя каналами регулирования и уменьшенной мощностью в первых трех секциях

Для предотвращения превышения температуры в заготовках в первых трех секциях, не имеющих системы регулирования, произведен ряд расчетов при разных значениях мощности. Найдены требуемые параметры первых секций, при которых температура в первых секциях близка к значениям, полученным при использовании шестиканальной системы регулирования. Значения мощности тепловыделения для секций индуктора представлены в табл.4.10.

Таблица 4.10

n	1	2	3	4	5	6
Р, кВт	182	298	288	275	288	255

Мощность тепловыделения в заготовках для секций индуктора

Если сравнить значения с величинами из предыдущего эксперимента, где не было ограничений, можно сделать вывод, что в первой секции мощность снижена на 110 кВт, во второй секции – на 41 кВт, в третьей секции – на 66 кВт. Это позволило получить требуемые диаграммы температуры в заготовках на протяжении всего процесса нагрева (рис.4.30).



Рис.4.30 Диаграммы температуры в контрольных точках в индукторе с тремя каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с: 1 – шестая точка; 2 - пятая точка; 3 – четвертая точка; 4 – третья точка; 5 – вторая точка; 6 – первая точка.

Диаграммы изменения удельной мощности в 4 – 6-м каналах практически не изменились, так как в этих секциях мощность не корректировалась (рис.4.31).



Рис.4.31 Диаграммы удельной мощности в загрузке в контрольных точках 4 – 6 в индукторе с 3 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с при уменьшенной мощности первых секций

4.2.4 Моделирование индукционной системы с двумя каналами регулирования

Для моделирования системы индукционного нагрева с двумя каналами управления мощность секций оставлена без изменений (таблица 4.11). Датчики температуры и регуляторы мощности задействованы в двух последних секциях.

Таблица 4.11

n	1	2	3	4	5	6
Р, кВт	292	239	303	290	303	268

Мощность тепловыделения в заготовках для секций индуктора

В результате расчетов получены диаграммы температуры для контрольных точек. На рис.4.32 видно, что температура контрольных точек 3 и 4 превышает предельные значения. Это свидетельствует о том, что в отсутствие контроля мощность первых секций избыточна и приводит к перегреву.



Рис.4.32 Диаграммы температуры в контрольных точках 1 – 6 в индукторе с 2 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с: 1 – четвертая точка; 2 - третья точка; 3 – пятая точка; 4 – шестая точка; 5 – вторая точка; 6 – первая точка.

Изображение диаграмм точек 4 – 6 на рис.4.33 в отдельности от остальных показывает более ясно, что система регулирования в каналах 5 и 6 уже не способна отработать возмущение.



Рис. 4.33 Диаграммы температуры в контрольных точках 4 – 6 в индукторе с 2 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с: 1 – четвертая точка; 2 – пятая точка; 3 – шестая точка.

Перегрев поверхностного слоя, достигнутый в заготовках третьей и четвертой секций, не может быть устранен за счет потерь тепла и тепловых потоков к

середине заготовки. Также важно, что ненаблюдаемые области нагрева в данном случае могут привести к состоянию, близкому к расплавлению или, по крайней мере, к ухудшению свойств металла, к явному браку.

Перепад температуры между поверхностью и центром седьмой заготовки возрос по сравнению с предыдущими вариантами систем регулирования (рис.4.34).



Рис.4.34 Диаграммы температуры на осевой линии (1) и поверхности (2) 7-й заготовки в системе с двумя каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с.

Диаграммы удельной мощности, представленные на рис. 4.35, показывают значительное снижение мощности, но эффективность управления в последних секциях не очень высока еще и по причине несовпадения координат контрольной с точкой максимального значения температуры.



Рис.4.35 Диаграммы мощности в загрузке в контрольных точках 4 – 6 в индукторе с 2 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с : 1 – 5-я точка; 2 – 4-я точка; 3 – 6-я точка.

4.2.5 Моделирование индукционной системы с двумя каналами регулирования и уменьшенной мощностью в первых секциях

Компенсация избыточного воздействия мощности тепловыделения достигнута путем снижения уровня мощности в первой секции на 130 кВт, во второй на 25 кВт, в третьей на 75 кВт, в четвертой на 87 кВт, в пятой на 75 кВт и в шестой на 65 кВт. Полученные значения приведены в таблице 4.12. Общая мощность в загрузке снижена с 1695 до 862 кВт, что составляет 49%.

Таблица 4.12

Мощность тепловыделения в заготовках для секций индуктора

n	1	2	3	4	5	6
Р, кВт	163	267	228	203	228	203

Диаграммы температуры во всех контрольных точках (рис.4.36) иллюстрируют правильный выбор мощностей и эффективность работы системы регулирования.



Рис.4.36 Диаграммы температуры в контрольных точках в индукторе с 2 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с: 1 – шестая точка; 2 - пятая точка; 3 – четвертая точка; 4 – третья точка; 5 – вторая точка; 6 – первая точка.

На временных диаграммах удельной мощности (рис.4.37) видно, что система регулирования начинает работать позже, чем в предыдущем случае, что подтверждает отсутствие избыточности мощности в первых секциях.



Рис.4.37 Диаграммы мощности в загрузке в контрольных точках 4 – 6 в индукторе с 2 каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с

В седьмой заготовке диаграммы температуры на поверхности и на осевой линии проходят с допустимым перепадом. Общий разброс температур в пределах седьмой заготовки в момент времени 7700 секунд не превышает 30 градусов. В целом, это хороший результат.



Рис.4.38 Диаграммы температуры на осевой линии и поверхности 7-й заготовки в системе с двумя каналами регулирования при интервале нагрева 1100 с и уменьшенных мощностях секций в момент времени 7700 с.

На основании проведенных исследований качества регулирования температуры в шестисекционном индукторе можно сделать следующие выводы:

1. Применение САР с двумя и тремя каналами регулирования возможно, но при ограничении уровня мощности в первых секциях.

2. Для каждого типа заготовок необходим расчет и настройка секций индуктора (переключение отпаек на катушке или программное изменение мощности преобразователя с помощью изменения уставок).

3. Использование шестиканального регулятора температура является предпочтительным, так как требует меньше переключений при смене типа заготовок.

4.3 Выбор параметров системы программного управления индукционной системой при смене сплошных заготовок на пустотелые

Нагрев сплошных и пустотелых заготовок осуществляется с разным темпом выдачи. Сплошные заготовки прогреваются медленнее, так как глубина проникновения тока существенно меньше радиуса заготовок. Несмотря на довольно высокие значения коэффициента теплопроводности для выравнивания распределения температуры требуется большее время, чем для пустотелых заготовок.

Смена типа заготовок в индукционном нагревателе без остановки процесса возможна без использования ложных слитков. В таком случае переход осуществляется в два этапа. Сначала производится корректировка темпа выдачи. После изменения времени нагрева на каждом шаге с пошаговой коррекцией мощности секций индуктора, осуществляется пошаговая замена сплошных заготовок на пустотелые. При смене типа заготовок путем последовательного заполнения секций также производится корректировка мощности секций индуктора.

Исследования выполнены на основе электротепловой модели с программным управлением. На геометрической модели (рис.4.39) заготовки представлены состоящими из двух слоев. Внутренний слой имеет одинаковые свойства с внешним слоем для первого этапа, когда заготовка подразумевается сплошной. На втором этапе свойства внутреннего слоя в определенные

моменты времени становятся как у воздуха, что практически устраняет теплообмен между слоями.

		Секция 1	Секция 2	Секци	я 3 Секц	ия 4	Секция 5	Секция 6	
	3ar.0	Заг.1	Заг.2	Заг.3	3ar.4	3ar.5	3ar.6	Заг.7	3ar.8
3	3ar.02	Заг.12	Заг.22	Заг.32	Заг.42	3ar.52	3ar.62	3ar.72	3ar.82

Рис.4.39 Геометрическая модель двухслойной загрузки многосекционного индуктора Исходные данные для модели электромагнитных процессов вводятся аналогично ранее рассмотренным задачам. В областях, соответствующих заготовкам, задается электропроводность, являющаяся функцией температуры

$$\sigma = 2 \cdot 10' \cdot (1 - (T - 273, 1)). \tag{4.25}$$

Для областей, соответствующих проводникам секций индуктора, электропроводность задается равной нуля, а плотность тока является ступенчатой функцией времени

$$j = 1,8 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0,12 \cdot flc hs(t - 8400,1)).$$
(4.26)

Ступенчатая функция позволяет смоделировать переключение величины плотности тока при переходе с одного типа заготовок на другой. Момент времени переключения определяется в ходе эксперимента. В приведенном выше выражении для первой секции время переключения равно 8400 секунд, а изменение плотности составляет 12%.

В модели тепловых процессов физические свойства задаются, зависящими от температуры. Кроме того, для моделирования смены сплошных заготовок на пустотелое предусмотрено ступенчатое изменение свойств, приводящее к такому же результату, как при реальной замене вида заготовок. В заданный момент времени для каждой заготовки производится коррекция коэффициента теплопроводности k_T , определяемого по выражению (4.1)

$$k_{T} = 117 + 0.16 \cdot (T - 273) - 1.9 \cdot 10^{-5} \cdot (T - 273)^{2} - 4.3 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 273)^{3}; (4.27)$$

$$k = k_{T} \cdot (1 - 0.999 \cdot flc1hs(t - 9600, 10)). \qquad (4.28)$$

Это позволяет устранить тепловые потоки между внешней областью, совпадающей по толщине с пустотелой заготовкой, и внутренней областью, в которой металл заменяется воздухом.

4.3.1 Выбор параметров индукторов при смене темпа выдачи пустотелых заготовок диаметром 1075 мм

На первом этапе выполняется исследование тепловых процессов и определение достижимой величины отклонений температуры по длине и толщине слитка. Вариантов распределения мощности секций индуктора по длине много, но переход от одного темпа выдачи к другому не при любых сочетаниях будет простым и потребует большого числа шагов. Чтобы упростить процедуру перехода, произведен поиск приемлемых вариантов.

Смена темпа происходит при увеличении длительности интервала нагрева. Процесс начинается в момент, когда система моделирования вышла на установившийся режим, то есть все слитки выходят из индуктора с темпом единица за 1000 с и допустимыми отклонениями температуры. При входе новой заготовки одновременно возрастает время интервала нагрева до 1200 с, и изменяется ток в первой секции индуктора (плотность тока уменьшается с начального значения 15 А/мм² на 15%). Через 1200 с происходит перемещение всех слитков на одну позицию и изменение тока во второй секции. Плотность тока

$$j_n = j_{on} \cdot (1 - k_n).$$
 (4.29)

Значения начальных значений плотности тока секций индуктора j_{0n} , коэффициентов изменения тока k_n и времени переключения токов t_n представлены в таблице 4.13.

n		Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4	
	<i>t_n</i> , c	j_{0n} ,	k						
		A/M^2		A/M^2		A/M^2		A/M^2	
1	7000	15	0,15	15	0,15	17	0,1	17	0,1
2	8200	17	0,15	17	0,15	17	0,1	17	0,1
3	9400	17	0,1	17	0,1	17	0,05	17	0,1
4	10600	13	0,05	13	0,1	13	0,05	15	0,05
5	11800	9	0,05	9	0,05	9	0,05	10	0,01
6	13000	9	0,05	9	0,05	9	0,05	10,5	0,05

Параметры индукторов при смене интервала нагрева пустотелых заготовок с 1000 с до 1200 с.

При поиске удовлетворительного варианта настроек секций индукторов был произведен ряд расчетов, в ходе которых сначала было осуществлено

Таблица 4.13

моделирование первой стадии – выход на установившийся режим с темпом выдачи заготовок единица за 1000 с, а потом произведен переход на нагрев с темпом выдачи единица за 1200 с. Настройка токов секций индуктора является трудоемкой процедурой, так как не все комбинации дают положительный результат. В итоге, в таблице 4.6 показаны несколько вариантов расчета, в которых получены распределения температуры, близкие к заданным. В строках приведены порядковый номер интервала с момента перехода на новый темп нагрева и значения плотности тока секций индуктора. Например, для первого варианта расчета в первой секции ток после перехода снижается на 15%, а в четвертой – на 10%. Во всех вариантах не предусмотрен этап транспортировки заготовки от индуктора к прессу.

Расчеты температуры в загрузке для разных вариантов проиллюстрированы с помощью диаграмм температуры на внешней и внутренней поверхностях пустотелой загрузки в моменты времени 7000 с, что соответствует окончанию нагрева с темпом выдачи единица за 1000 с, и времени 14200 (15400) с, что соответствует окончанию перехода на темп выдачи единица за 1200 с. Увеличенный отрезок времени выхода на новый режим для вариантов 3 и 4 принят для того, чтобы убедиться в отсутствии отклонений из-за возникающих колебаний температуры.

Таким образом, сравниваются результаты работы системы регулирования температуры с заданными параметрами индукторов для пустотелых заготовок при разных темпах выдачи. Настройка системы, работающей только с одним темпом, проще. Не для любых настроек, эффективных при нагреве заготовок с одним темпом выдачи, можно найти одну ступень изменения мощности, приводящую к столь же эффективной работе при нагреве в другом темпе. Поиск комбинации мощностей секций для режимов нагрева пустотелых заготовок проиллюстрирован диаграммами, представленными на рис.4.40-4.47.

На рис.4.40, 4.41 видно, что система регулирования температуры при нагреве пустотелых заготовок дает хорошие результаты: на выходе из индуктора температура внешней поверхности равна 455 градусов, а на внутренней поверхности - 445 градусов. Окончание перехода на темп выдачи 1200 с характеризуется температурой внешней поверхности 550 градусов, в внутренней поверхности 520 градусов. Результат неудовлетворительный.

На рис.4.42 4.43 видно, что система регулирования температуры при нагреве пустотелых заготовок дает хорошие результаты: на выходе из индуктора температура внешней поверхности равна 440-455 градусов, а на внешней поверхности 425 градусов. Окончание перехода на темп выдачи 1200 с характеризуется температурой внешней поверхности 435-450 градусов, в внутренней поверхности 400-410 градусов. Перепад температур довольно велик в пределах пустотелой заготовки в конце перехода на новый режим.



Вариант 2.



На рис.4.44, 4.45 видно, что система нагрева обеспечивает распределение температур с малыми перепадами. На выходе из индуктора при окончании нагрева с интервалом выдачи 1000 с температура внешней поверхности равна 375-395 градусов, а на внутренней поверхности 370 - 380 градусов.

Вариант 3.



Окончание перехода на темп выдачи 1200 с характеризуется температурой внешней поверхности 370-380 градусов, в внутренней поверхности 360-370 градусов. Перепад температур очень мал. Такой результат получен при сниженном значении заданной температуры, что при нагреве некоторых типов заготовок возможно, но в данном случае неприемлемо, и необходим поиск более подходящего варианта мощности.

Вариант 4.

На рис.4.46, 4.47 видно, что система нагрева обеспечивает распределение температур с малыми отклонениями для обоих режимов. В седьмой заготовке при окончании нагрева с темпом выдачи 1000 с температура внешней поверхности равна 475 градусов, а на внутренней поверхности 470 градусов. Окончание перехода на темп выдачи единица за 1200 с характеризуется температурой внешней поверхности 425-440 градусов, в внутренней поверхности 420-440 градусов.



Перепад температур в обоих режимах удовлетворяет заданным требованиям, хотя общий уровень температур отличается.

Из анализа приведенных диаграммы температур на рис.4.24-4.31 определены отклонения температур от заданного значения на выходе из индуктора. Они приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14

время	Ba	p 1	Bap 2		Bap 3		Bap 4	
	$\Delta T_{\scriptscriptstyle B}$,	ΔT_{μ} ,	$\Delta T_{\scriptscriptstyle B}$,	$\Delta T_{\scriptscriptstyle H}$,	$\Delta T_{\scriptscriptstyle B}$,	ΔT_{μ} ,	$\Delta T_{\scriptscriptstyle B}$,	ΔT_{μ} ,
	°C	$^{\circ}C$	°C	°C	°C	$^{\circ}C$	°C	°C
t _{ycm1}	10	-10	-30	-40	-70	-80	-40	25
t _{ycm2}	90	70	-10	-25	-80	-85	-25	20

Отклонения температуры в заготовках на выходе из индуктора

Отклонения температуры на внешней поверхности (верхняя) ΔT_{e} и внутренней поверхности (нижняя) ΔT_{μ} для момента времени t_{ycm1} , соответствующего установившемуся режиму нагрева пустотелых заготовок с темпом выдачи единица за 1000 секунд и для момента времени t_{ycm2} , соответствующего установившемуся режиму нагрева пустотелых заготовок с темпом выдачи единица за 1200 секунд приведены для четырех вариантов расчета.

Четвертый вариант параметров индуктора обеспечивает заданное распределение температуры в заготовке, находящейся на выходе из индуктора, как для исходного темпа единица за 1000 с, так и для

последующего единица за 1200 с. Таким образом, выбор параметров секций индуктора, ориентируясь на разные скорости перемещения заготовок, является более трудоемким, но такой подход позволяет осуществить переход на нагрев другого типа заготовок без задержек и лишних затрат энергии на нагрев ложных слитков.

4.3.2 Определение параметров секций индуктора при переходе смене сплошных заготовок на пустотелые

В соответствии с проведенными исследованиями за базовый режим принят темп выдачи заготовок, равный единица за 1200 секунд. Процедура перехода с одного типа заготовок на другой рассмотрена на моделировании всех этапов: пуск и выход на установившийся режим при нагреве сплошных заготовок; последовательная замена заготовок на пустотелые с одновременной корректировкой мощности секций.

Смена сплошных заготовок на пустотелые начинается в момент времени 9600 секунд. Параметры индуктора определяются в соответствии и выражениями, задающими закон изменения плотности тока в каждой секции

Вариант 1

Плотность тока в секциях индуктора изменяется ступенчато при достижении момента времени, когда в соответствии с программой смены сплошных заготовок на пустотелые на данную позицию поступает первая заготовка второго типа.

1 секция

$$j = 1,8 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0,12 \cdot flc 1hs(t - 8400,2)); \qquad (4.30)$$

2 секция

$$j = 1,8 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0,15 \cdot flc1hs(t - 9600,2)); \qquad (4.31)$$

3 секция

$$j = 1, 7 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0, 1 \cdot flc lhs(t - 10800, 2));$$
(4.32)

4 секция

$$j = 1, 1 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0, 1 \cdot flc lhs(t - 12000, 2)); \qquad (4.33)$$

5 секция

$$j = 8,0 \cdot 10^{6} \cdot (1 - 0,05 \cdot flc hs(t - 13200,2)); \qquad (4.34)$$

6 секция

134

$$j = 9.5 \cdot 10^6 \cdot (1 - 0.05 \cdot flc lhs(t - 14400, 2)).$$
(4.35)

Теплофизические свойства заготовок задаются различным образом для слоев. Внешний слой имеет свойства, зависящие только от температуры. На первом этапе моделирования производится разогрев сплошных заготовок, свойства внешних и внутренних областей зависят только от температуры и описываются одними и теми же выражениями. На втором этапе начинается последовательная замена сплошных заготовок пустотелыми, внутренние области изменяют свои свойства и превращаются в воздух. Это позволяет без изменения геометрической модели и сопутствующих проблем моделировать нагрев пустотелых заготовок. Самым важным параметром является в определенный момент времени, обусловленный заменой сплошной заготовки на пустотелую:

1 заготовка

$$k = k_T \cdot (1 - 0,999 \cdot flc1hs(t - 8400,10)); \qquad (4.36)$$

2 заготовка

$$k = k_T \cdot (1 - 0,999 \cdot flc1hs(t - 9600,10)); \qquad (4.37)$$

3 заготовка

$$k = k_T \cdot (1 - 0.999 \cdot flc hs(t - 10800, 10)); \qquad (4.38)$$

4 заготовка

$$k = k_T \cdot (1 - 0,999 \cdot flc hs(t - 12000,10)); \qquad (4.39)$$

5 заготовка

$$k = k_T \cdot (1 - 0,999 \cdot flc hs(t - 13200,10)); \qquad (4.40)$$

6 заготовка

$$k = k_T \cdot (1 - 0,999 \cdot flc hs(t - 14400,10)); \qquad (4.41)$$

7 заготовка

$$k = k_T \cdot (1 - 0,999 \cdot flc hs(t - 15600, 10)).$$
(4.42)

Здесь коэффициент k_T определяется согласно выражению (4.27).

В результате расчета получены значения удельной мощности тепловыделения в заготовках, зависящие от температуры. В таблице 4.15 приведены значения мощности для отдельных моментов времени.

Таблица 4.15

Мощность тепловыделения в заготовках в установившемся режиме нагрева сплошных и пустотелых заготовок

	ngeroresinik sur orobok										
N⁰	1	2	3	4	5	6	7				
Время 9600 с											
Р, кВт	166	172	157	113	58	43	57				
Время 19200 с											
Р, кВт	157	123	120	87	46	38	51				

С учетом переменных значений мощности определено распределение температуры в передвигающемся столбе заготовок. На рис. 4.48 показаны временные диаграммы для крайних точек на внешней поверхности седьмой заготовки.

Выбранные значения мощности привели к небольшому перегреву сплошных заготовок. Перепад температуры по длине на поверхности составляет около20 градусов, что удовлетворяет требованиям.



Рис.4.48 Временные диаграммы температуры на внешней поверхности 7-й заготовки: 1 – правый край (выход); 2 – левый край.

Более подробно о достигнутом распределении можно судить по диаграммам по длине внешней и внутренней поверхностей или на осевой линии (рис.4.49, 4.50). В целом, картина удовлетворительная, отклонения находятся в допустимых пределах.



Вариант 2

Плотность тока в секциях скорректирована с учетом полученных результатов 1 секция

$$j = 1,8 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0,1 \cdot flc_{1}hs(t - 8400,2)); \qquad (4.43)$$

2 секция

$$j = 1,8 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0,1 \cdot flc hs(t - 9600,2)); \qquad (4.44)$$

3 секция

$$j = 1, 7 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0, 1 \cdot flc 1hs(t - 10800, 2)); \qquad (4.45)$$

4 секция

$$j = 1, 1 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0, 1 \cdot flc lhs(t - 12000, 2)); \qquad (4.46)$$

5 секция

$$j = 8,0 \cdot 10^{6} \cdot (1 - 0,05 \cdot flc hs(t - 13200,2)); \qquad (4.47)$$

6 секция

$$j = 9,5 \cdot 10^{6} \cdot (1 - 0,05 \cdot flc hs(t - 14400,2)).$$
(4.48)

Параметры модели тепловых процессов оставлены без изменений.

В результате решения связанной задачи при моделировании процесса смены заготовок в многосекционном индукционном нагревателе получены значения мощности тепловыделения в заготовках, которые представлены в таблице 4.16, и диаграммы температуры, показанные на рис.4.51-4.53.

Таблица 4.16

Мощность тепловыделения в заготовках в установившемся режиме нагрева сплошных и пустотелых заготовок

N⁰	1	2	3	4	5	6	7				
Время 9600 с											
Р, кВт	173	172	157	112	57	43	57				
Время 19200 с											
Р, кВт	168	140	126	90	47	39	52				



Рис.4.51 Временные диаграммы температуры на внешней поверхности 7-й заготовки: 1 – правый край (выход); 2 – левый край.

Температура на правом краю в момент выхода из индуктора за счет краевых эффектов больше, чем в других точках.



В целом, картина удовлетворительная, отклонения на внешней поверхности незначительно превышают допустимые значения. Необходима небольшая корректировка мощности секций индуктора.

Вариант 3

Плотность тока в секциях индуктора изменена незначительно.

1 секция

$$j = 1,8 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0,1 \cdot flc 1hs(t - 8400,2)); \qquad (4.49)$$

2 секция

$$j = 1,8 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0,1 \cdot flc 1hs(t - 9600,2));$$
(4.50)

3 секция

$$j = 1, 7 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0, 1 \cdot flc 1hs(t - 10800, 2)); \qquad (4.51)$$

4 секция

$$j = 1, 1 \cdot 10^7 \cdot (1 - 0, 1 \cdot flc hs(t - 12000, 2)); \qquad (4.52)$$

5 секция

$$j = 8,0 \cdot 10^{6} \cdot (1 - 0,05 \cdot flc lhs(t - 13200,2)); \qquad (4.53)$$

6 секция

$$j = 9,0 \cdot 10^{6} \cdot (1 - 0,05 \cdot flc hs(t - 14400,2)).$$
(4.54)

Исходные данные для расчета тепловых процессов оставлены без изменений. После решения связанной задачи определены значения мощности тепловыделения в заготовках, которые представлены в таблице 4.17, и диаграммы температуры, показанные на рис.4.54-4.56.

Таблица 4.17

Мощность тепловыделения в заготовках в установившемся режиме нагрева сплошных и пустотелых заготовок

N⁰	1	2	3	4	5	6	7				
Время 9600 с											
Р, кВт	168	168	153	110	57	42	51				
Время 19200 с											
Р, кВт	168	140	126	90	47	38	46				

Отклонения температуры на внешней поверхности снизились до допустимых значений. Отклонения температуры на рис.4.54 на внешнем краю поверхности в режиме нагрева сплошных заготовок немного выходят за допустимые 139 пределы, но с учетом транспортировки отклонения во всем объеме заготовки приходят в полное соответствие с требованиями. Полученные результаты можно считать хорошими.



Рис.4.54 Временные диаграммы температуры на внешней поверхности 7-й заготовки: 1 – правый край (выход); 2 – левый край.



Рис.4.55 Диаграммы температуры по длине индуктора на внешней поверхности загрузки при переходе со сплошных на пустотелые: 1 – в момент времени 9600 с; 2 – в момент времени 18000 с



Рис.4.56 Диаграммы температуры по длине индуктора на внутренней поверхности загрузки при переходе со сплошных на пустотелые: 1 – в момент времени 19200 с; 2 – в момент времени 96000 (на оси).

4.4 Определение параметров индукционной системы с системой автоматического регулирования при смене типов заготовок

4.4.1 Моделирование тепловых процессов при смене пустотелых заготовок сплошными с интервалом выдачи 900 с

Моделирование процесса индукционного нагрева с системой автоматического регулирования температуры проведено с целью выяснения показателей системы при смене типа заготовок [53]. Исследовано поведение системы при переходе от сплошных заготовок к пустотелым, а также наоборот, от пустотелых к сплошным. Заготовки имеют длину 900 мм, внешний диаметр 1075 мм. Пустотелые заготовки имеют такие же габариты и внутренний диаметр 600 мм. Исследования проведены для нескольких темпов выдачи заготовок: единица за 900, 1000 и 1100 с.

Контроль температуры осуществляется в шести точках: в конце каждой секции на расстоянии 100 мм от выхода. Вывод информации о температуре загрузки произведен для осевой линии, для линии с радиальной координатой r=0,3 м и линией поверхности r=0,54 м. Линия с радиальной координатой r=0,3 м для пустотелых заготовок соответствует внутренней поверхности.

Координаты точек по длине загрузки выбраны для середин первой, третьей, пятой заготовок и краев седьмой заготовки.

Таблица 4.18

	Координаты точек измерения температуры											
\mathcal{N}_{2}	1	2	3	4	5							
х, м	0,45	2,25	4,5	5,4	6,3							

Мощности в заготовках секций суммируются от воздействия секций индуктора. В свою очередь, для каждой секции определена суммарная мощность, обусловленная воздействием этой секции на близ расположенные заготовки. В таблице 4.19 указаны значения мощности тепловыделения в заготовках, обусловленные влиянием секций.

Таблица 4.19

Мощности тепловыделения в секциях											
<u>№</u> 1 2 3 4 5 6											
Р, кВт	260	313	303	291	304	278					

Для исследования систем регулирования во всех экспериментах были использованы неизменные уставки задатчиков в каналах регулирования, которые приведены в таблице 4.20.

Температуры задания в контрольных точках заготовок

N⁰	1	2	3	4	5	6
Т, К	373	473	573	653	703	723

Построенные диаграммы температуры в нескольких точках на поверхности загрузки показывают стабилизацию температуру на заданном уровне на выходе из индуктора (рис.4.57). В начале седьмой заготовки отклонение температуры составляет примерно 25 градусов. В других точках выход на установившееся значение температуры в пределах каждого цикла (900 сек) достигается быстро, без особых проявлений плохого качества управления. На диаграмме 3 хорошо проявляется большее значение температуры до момента времени 7000 с, то есть до момента перехода на сплошные заготовки. Это объясняется большим запасом мощности по отношению к массе заготовок.



Рис.4.57 Диаграммы температуры на линии при r=0,54 м: 1 – x=6,3 м; 2 – x=5,4 м; 3 – x=4,5 м; 4 – x=2,25 м; 5 – x=0,45 м.

На линии с координатами r=0,3 м и x=0-6,3 м высокочастотные колебания не ощущаются, но видна четкая разница в уровне максимального значения при переходе с одного типа заготовок на другой (рис.4.58).

На рис.4.59 видно, как постепенно включаются в работу новые сплошные заготовки, которые приходят на смену пустотелым. Появляется информация о температуре, которой до определенного момента не было.



Рис.4.58 Диаграммы температуры на линии при r=0,3 м: 1 – x=6,3 м; 2 – x=5,4 м; 3 – x=4,5 м; 4 – x=2,25 м; 5 – x=0,45 м.



Рис.4.59 Диаграммы температуры на линии при r=0: 1 – x=6,3 м; 2 – x=5,4 м; 3 – x=4,5 м; 4 – x=2,25 м; 5 – x=0,45 м.

Диаграмма 1 свидетельствует о том, что ко времени окончания каждого интервала температура на осевой линии в конце и начале седьмой заготовки достигает значения 420 и 390 градусов. Если первое значение укладывается в допустимые отклонения, то второе слишком большое.

Более подробная картина о температурах по длине загрузки приведена на рис. 4.60 – 4.62. Подтверждается ранее сделанный вывод о недогреве сплошной заготовки – отклонение на осевой линии составляет 50 градусов (диаграмма 3 на рис.4.60). Но для последующих заготовок в моменты времени 13500 секунд и 14400 секунд температура возрастает до требуемого значения (диаграммы 1, 2 на рис.4.60). Для выяснения поведения температурного распределения на осевой линии после выхода заготовки из индуктора произведен расчет в восьмой заготовке. Так как, предшествующая заготовка была пустотелой, то на диаграмме 3 температура на восьмом участке равна 20 градусам. Для последующих заготовок на этой позиции температура возрастает. В то же время из рис. 4.61 видно, что для пустотелой седьмой заготовки отклонение температуры не превышает 30 градусов.

На внешней поверхности для пустотелой и сплошной заготовок на выходе из индуктора все отклонения находятся в допустимых пределах.



Рис.4.60 Диаграмма температуры по длине загрузки на осевой линии в моменты времени: 1 – 13500 с; 2 – 14400 с; 3 - 12600 с.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что даже для осевой линии обеспечивается требуемое распределение температуры, хотя со сдвигом во времени.


Рис.4.61 Диаграммы температуры по длине загрузки при r=0,3 м: 1 – в момент времени 12600 с (сплошные заготовки); 2 – в момент времени 6300 с (пустотелые заготовки).



Рис.4.62 Диаграммы температуры по длине загрузки при r=0,54 м: 1 – в момент времени 12600 с (пустотелые заготовки); 2 – в момент времени 6300 с (сплошные заготовки).

4.4.2 Моделирование тепловых процессов при смене сплошных заготовок пустотелыми с интервалом выдачи 900 с

Изменение направления перехода между режимами – с нагрева массивных заготовок на пустотелые – вносит мало отличий. Различий не видно при сравнении диаграмм для осевой линии (рис.4.63 и рис.4.59), для линии с радиальной координатой г=0,3 м (рис.4.8 и рис.4.2) и линии на внешней поверхности (рис.4.65 и рис.4.57).



Рис.4.63 Диаграммы температуры на осевой линии: 1 - x=0,45 м; 2 - x=2,25 м; 3 - x=4,5 м; 4 - x=5,4 м; 5 - x=6,3 м.



Рис.4.64 Диаграммы температуры на линии при r=0.3 м: 1 – x=0,45 м; 2 – x=2,25 м; 3 – x=4,5 м; 4 – x=5,4 м; 5 – x=6,3 м.

Небольшое отличие диаграмм температуры на поверхности загрузки в моменты времени 6300 с и 12600 секунд (рис.4.66) наблюдается при сравнении с рис.4.62. Несмотря на то, что диаграммы соответствуют установившимся режимам, когда через индуктор прошли уже шесть заготовок, проявляются последствия низкочастотных колебаний в системе, которые сохраняются в течение всего процесса нагрева.



Рис.4.65 Диаграммы температуры на линии при г=0,54 м: 1 – x=0,45 м; 2 – x=2,25 м; 3 –

Диаграмма температуры на осевой линии в режиме нагрева сплошных заготовок (рис.4.68), как и в предыдущем случае (рис.4.60), свидетельствует о слишком большом отклонении от заданного значения на левом краю седьмой заготовки.



Рис.4.66 Диаграммы температуры на внешней поверхности загрузки: 1 - в момент времени 12600 с; 2 - в момент времени 6300 с.



Рис.4.67 Диаграммы температуры по длине загрузки на линии при r=0,3 м: 1 - в момент времени 12600 с; 2 - в момент времени 6300 с.



Рис.4.68 Диаграммы температуры по длине загрузки на линии при r=0 в момент времени 6300 с.

4.4.3 Моделирование тепловых процессов при смене пустотелых заготовок сплошными с интервалом выдачи 1000 с

Исследование процессов смены типа заготовок с пустотелых на сплошные и со сплошных на пустотелые для удобства сопоставления результатов расчета представлено в виде однотипных диаграмм: в каждой паре рисунков слева

представлена иллюстрация перехода с пустотелых на сплошные заготовки, а справа – со сплошных на пустотелые.

На рис.4.69 и 4.70 показаны временные диаграммы температуры в точках измерения на поверхности. Температура в точке измерения №6 (только для отображения) очень близка к температуре в контрольной точке (датчик в системе регулирования), так как расстояния между ними составляет 10 сантиметров. Поэтому диаграмма температуры в регулярной зоне близка к прямой линии с колебаниями относительно заданного значения. Заметные отклонения температуры наблюдаются в точках измерения, которые не совпадают с контрольными.



Рис. 4.69 Временные диаграммы температуры на поверхности заготовок: 1 – x=0,45м; 2 – x=2,25 м; 3 – x=4,5 м; 4 – x=5,4 м; 5 – x=6,3 м.



Рис. 4.70 Временные диаграммы температуры на поверхности заготовок: 1 -x=0,45 м; 2 -x=2,25 м; 3 -x=4,5 м; 4 -x=5,4 м; 5 -x=6,3 м.

При рассмотрении диаграмм распределения температуры по длине загрузки в отдельные моменты времени можно отметить, что на осевой линии (рис.4.15, 4.16) наблюдается лишь небольшой перепад по длине при переходе со сплошных заготовок. В остальном диаграммы очень близки. Отклонения от заданного значения немного меньше, чем при темпе выдачи, равном 900 с. Уменьшение составляет от 5 до 10 градусов по длине и радиальной координате седьмой заготовки.



Рис.4.71 Диаграммы температуры по длине загрузки при r=0 м в момент времени 14000 с (сплошные заготовки)



Рис.4.72 Диаграмма температуры по длине загрузки при r=0 в момент времени 7000 с. (сплошные заготовки)

На продольной линии загрузки с радиусом 0,3 м (рис.4.73, 4.74) температура пустотелых заготовок больше подвержена проявлению колебательных процессов в системе регулирования. Особенно ярко это проявляется на диаграмме 1 рис.4.74. В очередной раз нужно отметить влияние ограниченной управляемости и наблюдаемости из-за малого числа контрольных точек и несовпадения их с участками максимальной температуры. В целом, отклонения находятся в допустимых пределах.



Рис.4.73 Диаграммы температуры по длине загрузки при г=0,3 м: 1 – в момент времени 7000 с (пустотелые заготовки); 2 – в момент времени 14000 с (сплошные заготовки).



Рис.4.74 Диаграммы температуры по длине загрузки при г=0,3 м: 1 – в момент времени 14000 с (пустотелые заготовки); 2 – в момент времени 7000 с (сплошные заготовки).

Аналогичная картина с колебаниями температуры наблюдается на поверхности заготовок (рис.4.75, 4.76).





Рис.4.75 Диаграммы температуры по длине загрузки при г=0,53 м: 1 – в момент времени 14000 с (сплошные заготовки); 2 – в момент времени 7000 с (пустотелые заготовки).

Рис.4.76 Диаграммы температуры по длине загрузки при г=0,54 м: 1 – в момент времени 14000 с (пустотелые заготовки); 2 – в момент времени 7000 с (сплошные заготовки).

Колебания температуры при переходе на пустотелые заготовки становятся гораздо значительнее, что объясняется меньшей тепловой инерционностью и большим запасом по мощности тепловыделения.

4.4.4 Сравнение направления перехода при смене заготовок с интервалом выдачи 1100 с

Для оценки влияния направления перехода с одного типа заготовок произведено сравнение процессов смены пустотелых заготовок сплошными и сплошных заготовок пустотелыми.

Увеличение интервалов времени на нагрев заготовок в каждой позиции в индукторе вносит еще большие различия в диаграммы температуры. На рис.4.77 и рис.4.78 отличия не видны только для первой и пятой контрольных точек. В остальных точках наблюдается разный характер колебательного процесса на участках нагрева пустотелых заготовок. Если на рис.4.77, иллюстрирующем переход OT пустотелых К сплошным заготовкам, наблюдается снижение амплитуды колебаний (диаграммы 3 и 4), то обратный переход от сплошных к пустотелым заготовкам (рис.4.78) сопровождается размаха колебаний. Возможно, при увеличении числа интервалов наступит равновесное состояние.





500

450

400

350

300

150

5

ed Legender 250 200

Рис. 4.77 Временные диаграммы температуры на поверхности заготовок при переходе от пустотелых заготовок: 1 – x=0,45 м; 2 – x=2,25 м; 3 – x=4,5 м; 4 – x=5,4 м; 5 – x=6,3 м.

Рис.4./8 Временные диаграммы температуры на поверхности заготовок при переходе от сплошных заготовок: 1 - x=0,45м; 2 - x=2,25 м; 3 - x=4,5 м; 4 - x=5,4 м; 5 - x=6,3 м.

1.6 1.8

x10⁴

5

На расстоянии 0,14 м от поверхности (r=0,3 м) различия диаграмм 3 и 4 (рис.4.79, 4.80) на участках нагрева пустотелых заготовок сохраняются, хотя и не такие яркие, как для поверхности.



Рис. 4.79 Временные диаграммы температуры на линии r=0,3 м при переходе от пустотелых заготовок: 1 - x=0,45 м; 2 - x=2,25 м; 3 - x=4,5 м; 4 - x=5,4 м; 5 - x=6,3 м.



Рис.4.80 Временные диаграммы температуры при r=0,3 м при переходе от сплошных заготовок: 1 – x=0,45м; 2 – x=2,25 м; 3 – x=4,5 м; 4 – x=5,4 м; 5 – x=6,3 м.

На осевой линии (r=0) участков нагрева пустотелых заготовок нет, поэтому наблюдается полное совпадение диаграмм (рис.4.81, 4.82).





Рис. 4.81 Временные диаграммы температуры на линии r=0 м при переходе от пустотелых заготовок: 1 - x=0,45 м; 2 - x=2,25 м; 3 - x=4,5 м; 4 - x=5,4 м; 5 - x=6,3 м.

Рис.4.82 Временные диаграммы температуры при r=0 при переходе от сплошных заготовок: 1 – x=0,45м; 2 – x=2,25 м; 3 – x=4,5 м; 4 – x=5,4 м; 5 – x=6,3 м.

Диаграммы распределения температуры по длине на поверхности (рис.4.83, 4.84), на расстоянии 0,14 м от поверхности (r=0,3 м) (рис.4.85, 4.86) и на осевой линии (рис.4.87, 4.88) иллюстрируют полное соответствие требованиям по допустимым отклонениям температуры в заготовках перед выходом из индуктора.



Рис.4.83 Диаграммы температуры по длине загрузки при г=0,54 м при переходе от пустотелых заготовок: 1 – в момент времени 15400 с (сплошные заготовки); 2 – в момент времени 7700 с (пустотелые заготовки).



Рис.4.84 Диаграммы температуры по длине загрузки при г=0,54 м при переходе от сплошных заготовок: 1 – в момент времени 15400 с (пустотелые заготовки); 2 – в момент времени 7700 с (сплошные заготовки).





Рис.4.85 Диаграммы температуры по длине загрузки при г=0,3 м при переходе от пустотелых заготовок: 1 – в момент времени 7700 с; 2 – в момент времени 15400 с.

Рис.4.86 Диаграммы температуры по длине загрузки при переходе от сплошных заготовок при г=0,3 м: 1 – в момент времени 15400 с; 2 – в момент времени 7700 с.

Несмотря на отмеченные факты локального превышения температуры относительно уставки в пятой секции, температура на поверхности и на расстоянии 0,14 м от поверхности (рис.4.84, 4.86) не превышает допустимого значения 450 градусов.

Температура на осевой линии в седьмой заготовке отличается от заданного значения не более, чем на 30 градусов.



450 400 350 300 250 150 150 0 0 1 2 3 4 5 6 7 длина, м

Рис.4.87 Диаграмма температуры по длине загрузки при переходе от пустотелых заготовок при r=0 в момент времени 15400 с.

Рис.4.88 Диаграммы температуры по длине загрузки при переходе от сплошных заготовок при r=0 в момент времени 7700 с.

Переход с одного типа заготовок на другой (смена сплошных пустотелыми) осуществляется в два этапа.

На первом этапе поочередно загружается новая заготовка и производится коррекция мощности первой секции индуктора. Затем при загрузке последующих заготовок корректируются мощности очередных индукторов. На втором этапе производится ступенчатое изменение мощности и интервала времени нагрева (темпа выдачи) для обеспечения более производительной работы нагревателя.

Переход с пустотелых заготовок на сплошные производится в обратной последовательности: сначала увеличивается время нагрева и лишь затем происходит пошаговая замена заготовок с коррекцией мощности индукторов.

4.5 Сравнение затрат энергии на потери при разных интервалах нагрева

Энергозатраты на нагрев одной заготовки определяются с учетом теплосодержания и суммарных потерь

$$W = mC_P(T_{\rm cp} - T_{\rm Hay}) + Q_{\rm not} \cdot t_{\rm H}.$$

Среднее значение температуры в заготовке на выходе из индуктора определяется как среднеинтегральная величина в ходе расчетов тепловых процессов. Перед выходом из индуктора эта величина составляет 430 градусов.

Для упрощения расчетов значение удельной теплоемкости принято средним за все время нагрева $C_P = 1050 \text{ Дж}/(\kappa \cdot \text{град}).$

Тепловые потери через футеровку по длине индуктора определяются в ходе тепловых расчетов с учетом передачи тепла в виде потока излучением

$$Q_{\rm пот} = 25 \ {\rm \kappa Bt}.$$

Дополнительно, потери с торца последней заготовки в окружающую среду составляют 4 кВт.

В работе были рассмотрены режимы нагрева с величиной интервала нагрева от 800 до 2000 секунд. Время нагрева каждой заготовки определяется произведением числа заготовок в индукторе на длительность интервала нагрева и составляет от 5600 секунд до 14000 секунд.

Диаграммы удельной мощности отражают изменение удельного сопротивления с ростом температуры, что усложняет проведение расчетов. Для упрощения средняя величина активной мощности в загрузке индуктора определена через теплосодержание в конце нагрева $P_{\rm cp} = W/t_{\rm H}.$

Среднее значение электрического КПД для рассматриваемого индукционного нагревателя равно 0,6. Учитывая приведенные параметры среднее значение активной мощности в каждой заготовке имеет значение 177 кВт при интервале нагрева 800 секунд и 71 кВт при интервале нагрева 2000 секунд.

Полезные затраты энергии на нагрев заготовки составляют $W_{\text{пол}} = 993 \text{ МДж}$, а суммарные тепловые и электрические потери энергии для указанного диапазона мощностей и интервалов нагрева при нагреве одной заготовки составляют от 686 МДж до 720 МДж.

Расчетные значения мощности тепловыделения в заготовках P_{3ar} , суммарной мощности, с учетом потерь, приходящейся на одну заготовку P_{cym} , суммарных затрат энергии, приходящихся на одну заготовку W_{3arp} , коэффициента эффективности энергозатрат представлены в таблице 4.21.

Таблица 4.21

<i>t</i> _{инт} , с	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
<i>Р</i> _{заг} , кВт	177	142	118	101	89	79	71
<i>Р</i> _{сум} , кВт	300	240	201	173	152	136	122
<i>W</i> _{затр} , МДж	1679	1685	1690	1696	1702	1708	1713
k, OE	0,372	0,371	0,37	0,369	0,369	0,368	0,367

Расчетные значения энергозатрат при нагреве заготовок

Коэффициент к определяется по формуле

$$k = W_{\text{пол}}/W_{\text{затр}}.$$

Разница значений коэффициента для минимального и максимального интервала нагрева (800 и 2000 с) составляет 0,004, что является сравнительно небольшой величиной. Причина такого положения заключается в небольшой доле тепловых потерь относительно электрических потерь. Между тем, в числовом выражении экономия энергии при нагреве 30 заготовок составляет 180 МДж при изменении интервала нагрева на 200 секунд.

4.6 Реализация системы индукционного нагрева

Промышленная установка индукционного нагрева методического действия слитков из алюминиевых сплавов представляет собой ряд двухсекционных индукторов, расположенных вплотную друг к другу (рис.4.89). Катушки индукторов заключены в металлическую раму, охватывающую индуктор

сверху и снизу. Для предотвращения нагрева металлических деталей применены кожухи из шихтованного железа. Каждая катушка выполнена из медной трубки, по которой прокачивается вода для отвода тепла, выделяющегося при протекании тока и дополнительно поступающего через теплоизоляцию от поверхности разогретых заготовок. Катушки имеют выводы для подключения к источникам питания, а также присоединяются к шлангам с подаваемой и отводимой водой. Система водяного охлаждения оснащена датчиками, контролирующими расход и температуру жидкости.

Электрическая схема установки (рис.4.90) содержит катушки индуктора, к которым подключены преобразователи частоты и конденсаторы для компенсации реактивной мощности. Преобразователь частоты имеет возможность изменения частоты напряжения для подстройки колебательного контура «индуктор – конденсатор», чтобы коэффициент мощности всегда был близким к единице без переключения банок конденсаторной батареи.



Рис.4.89 Многосекционная установка индукционного нагрева слитков диаметром 1075 мм



Рис.4.90 Электрическая схема многосекционного индукционного нагревателя

Устойчивая работа преобразователя частоты в режиме автоматической настройки контура достигается без затруднений, так как даже при перемещении заготовок снижение коэффициента мощности не приводит к резкому ухудшению процессов коммутации [61, 62]. Преобразователь функционирует в этой ситуации без сбоев.

Для регулирования температуры заготовок предусмотрены регуляторы мощности индукторов. Каждому типу заготовок соответствуют значения мощности секций. Датчики температуры используются для настройки режимов и регистрации параметров.

Система индукционного нагрева обеспечивает заданное качество В стационарном режиме. При пуске индуктора и при смене заготовок (не всех сочетаний) все заготовки, находящиеся в индукторе, не успевают прогреться Для ДО заданного значения температуры. решения этой проблемы используются «ложные слитки», которые после прохождения индуктора не отправляются под пресс, а складируются в специально отведенном месте для остывания и повторного использования для этих же целей. Одной из причин возникновения «ложных слитков» явилось отсутствие в то время средств для регулирования мощности на промышленной частоте для индукционного нагрева. Кроме того, секции индуктора на промышленной частоте, имея большую единичную мощность, желательно подключать одновременно, чтобы избежать перекоса фазных нагрузки и, следовательно, перекоса напряжений, что создает серьезные проблемы для всех потребителей в цехе. Известны решения этой проблемы в виде схемы Штейнметца и более современных устройств, однако, применение симметрирующего устройства не лишено недостатков [63].

В настоящее время в системе используется преобразователь частоты, который позволяет решить проблемы симметрирования нагрузки при включении отдельных секций, так как подключен к трехфазной сети и потребляемый ток одинаков для всех фаз.

В нагревателях методического действия заготовки перемещаются дискретно. При нагреве массивных заготовок темп выдачи невысок, время между перемещениями измеряется десятками минут. Это приводит к значительному перераспределению температуры за счет тепловых потоков между соседними заготовками. использовании При замкнутой системы регулирования необходимо выбрать обеспечения точки контроля температуры ДЛЯ качественного функционирования. Известно, что от места расположения датчиков температуры зависит управляемость процесса нагрева [44]. Поэтому желательно для каждого типа заготовок, имеющих разную длину, датчики размещать в специально подобранных точках. Однако в этом вопросе имеется сложность, связанная с тем, что число заготовок и число секций индуктора не совпадает. При контроле температуры возле края каждой заготовки возникает задача расчета управляющего воздействия для источника питания секций на основании суммирования нескольких сигналов с определенными весовыми коэффициентами. В научном плане задача очень сложная с учетом смены позиции датчиков.

Необходимость модернизации процесса индукционного нагрева методического действия для сплавов из алюминия, с одной стороны, обусловлена требованиями повышения экономической эффективности, а с другой стороны, имеющимися научными разработками и решениями в виде новых материалов, применяемых в электиротермии, и более функционального и надежного силового электрооборудования, и средств управления [64-70].

Очень интересным выглядит применение прессования алюминиевых заготовок в полутвердом состоянии [71, 72]. Хотя для используемого в исследовании сплава Д16 имеются ограничения, связанные с изменением структуры металла и ухудшением свойств, для других материалов возможно, что такой подход окажется приемлемым.

Все больше исследований посвящено применению постоянных магнитов, возбуждающих поле, внутри которого вращается нагреваемая заготовка [73-75]. Эффективность такого способа нагрева неочевидна, однако при нагреве массивных тел глубина проникновения определяется частотой наводимого тока, которая является функцией скорости вращения.

Управление процессом индукционного нагрева может быть реализовано различными способами с применением разных аппаратных средств [76–79].

Существующая система построена на основе нескольких преобразователей частоты, работающих при постоянной мощности (рис.4.91). Для каждого типа заготовок определены значения мощности секций. Управление пуском осуществляется с использованием «ложных заготовок», а смена типа заготовок происходит при непосредственном участии оператора, осуществляющего контроль температуры с помощью датчиков и изменение уровней мощности. Таким образом, в системе управления процессом нагрева присутствует оператор, а система имеет ограниченные возможности.

Рассмотренный в раздел 3 программный способ регулирования температуры в многосекционном нагревателе построен похожим образом. Однако алгоритм включения отличается, и запуск системы осуществляется при поочередном включении секций: первая заготовка загружается в первую секцию с обеспечением расположения переднего торца заготовки на расстоянии 0,1 метра от выхода из первой секции.

После включения секции индуктора и нагрева в течение заданного времени, происходит загрузка второй заготовки и с одновременным проталкиванием первой на одну позицию. Таким образом, осуществляется поочередное включение всех секций индуктора. Во время пуска перемещение заготовок после шестого интервала нагрева производится на меньшее расстояние, чтобы обеспечить необходимо заглубление последней заготовки.

Система управления, реализующей описанный алгоритм, может быть реализована на базе простых средств. Многоканальный регулятор мощности, построенный на логическом контроллере Овен, обеспечит выполнение поставленных задач.

Для управления процессом перемещения в установившемся режиме, требуется формирование задающего воздействия на привод по циклическому закону. Для операций пуска и смены типа заготовок необходимо участие оператора.



Процедуры с одновременным изменением уставок для мощности в нескольких секциях занимают немного больше времени, но, учитывая большую длительность интервалов нагрева между перемещениями, это не приводит к большим отклонениям температуры от заданных значений.

Более сложный алгоритм для системы управления нужен при реализации системы автоматического регулирования температуры. В пунктах 4.1 - 4.4 определены параметры задающих воздействий для каналов управления температуры и скорости. При моделировании тепловых процессов рассмотрены режимы с высоким темпом выдачи, где задержка на десятки секунд из-за переключения уставок, приведет к отклонениям температуры, превышающим допустимые. Поэтому необходимо использование более мощных контроллеров.

Построение системы регулирования производится на основе формально простого подхода, когда системы нагрева управления процессами нагрева и перемещения заготовок не зависят друг от друга [69]. Возможно применение локальных систем, функционирующих самостоятельно и объединенных только по каналам защиты при аварийных или нештатных ситуациях.

В качестве регуляторов для многомерной системы управления кроме стандартного набора из пропорциональных, дифференцирующих и интегрирующих звеньев используются более современные, например, регуляторы на основе нечеткой логики [80]. Наличие таких регуляторов определяется уровнем аппаратной части и возможностью эффективного использования в используемом программном обеспечении.

В качестве платформы для системы регулирования возможно использование контроллера типа Siemens.

Основные результаты исследований автора опубликованы в работах [81-89].

Выводы по главе

 Разработана модель многоканальной системы автоматического регулирования индукционным нагревом дискретно перемещаемых заготовок с использованием встроенных в программное обеспечение аппроксимирующих выражений ступенчатых функций.

2. Проведенные исследования систем регулирования индукционным нагревом показали возможность достижения заданного распределения температуры при интервале нагрева сплошных заготовок длиной 900 мм диаметром 1075 мм, равном 800 с.

3. Применение программного управления температурой сплошных заготовок с интервалом нагрева 1000 секунд позволяет добиться заданного распределения на выходе при условии ограничения мощности в последних секциях индуктора.

4. Проведенное исследование качества работы системы регулирования показало возможность работы системы с тремя каналами управления (в последних трех секциях), но с ограничением мощности первых секций (182 кВт, 298 кВт, 288 кВт), которые переходят в режим программного управления. Темп выдачи при этом необходимо ограничить величиной единице за 1100 с.

5. Для каждого типа заготовок необходим расчет и настройка секций индуктора (переключение отпаек на катушке или программное изменение мощности преобразователя с помощью изменения уставок).

 Использование шестиканального регулятора температура является предпочтительным, так как требует меньше переключений при смене типа заготовок.

7. Исследования процессов смены заготовок одинаковой длины со сплошных на пустотелые и с пустотелых на сплошные в индукционном нагревателе показали возможность переходов без потерь времени с обеспечением требуемых показателей температурного распределения.

8. Снижение темпа выдачи и увеличение интервалов нагрева приводит к росту запаса мощности и отмечается в виде колебаний на участках стабилизации температуры, поэтому целесообразно соответствующее снижение уровня мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана численная математическая модель связанных между собой электромагнитных и тепловых полей в системе «многосекционный нагреватель – дискретная загрузка», ориентированная на решение задач управления нагревом в переходных и установившихся режимах.

2. Применение численных моделей расчета тепловых процессов, учитывающих взаимный лучистый теплообмен в системе заготовок и футеровок секций индуктора, позволило снизить погрешность расчета на 10 градусов.

3. Проведено исследование влияния термического сопротивления торцевых контактов между заготовками на распределение температуры по длине загрузки, что позволило определить диапазон изменения значений перепада температуры от 13 до 50 градусов в зависимости от эквивалентной толщины контактного слоя. Принятые параметры контактного слоя между заготовками многосекционного нагревателя обеспечили повышение точности расчетов температурного распределения с учетом максимальных тепловых потоков между заготовками.

4. Разработана система автоматического управления многосекционным индукционным нагревателем, отличающаяся учетом вариации параметров тепловыделения в заготовках, обусловленной их перемещением, и изменением, в связи с этим, числа независимых источников тепла в одной заготовке. Применение САР обеспечивает сокращение времени переходного режима на 50% по сравнению с системой программного управления

5. На основании проведенных исследований электромагнитных и тепловых процессов в индукционном нагревателе методического действия определен алгоритм поиска параметров управления в переходных режимах работы в условиях строгих ограничений на отклонения температуры от

заданных значений, позволяющий получить требуемый по технологии перепад температуры по объему заготовки.

6. Разработан алгоритм перехода на другой тип заготовок с изменением функции распределения заданной температуры по длине загрузки и темпа выдачи. Алгоритмы управления мощностью секций нагревателя, полученные при анализе вариантов, позволяют для рассматриваемой номенклатуры заготовок исключить применение «ложных» слитков и минимизировать общее время нагрева.

7. Разработаны алгоритмы эффективного управления многосекционным индукционным нагревателем методического действия в условиях нелинейной зависимости электрических параметров нагревателя, теплофизических характеристик заготовок и теплового потока излучением между поверхностями заготовок и футеровки от распределения температуры по длине, позволяющие за счет исключения ложных заготовок снизить затраты электроэнергии на 3300 кВт⁻ч (11900 МДж), что дает экономию более 7 тысяч рублей на каждой переходной операции.

Библиографический список

Вайнберг, А.М. Индукционные плавильные печи [Текст] / А.М.
 Вайнберг. — М.: Энергия, 1967. – 416 с.

2. Слухоцкий, А.Е. Установки индукционного нагрева [Текст] /А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов. — Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

3. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1988. 280 с.

Лыков А.В. Тепломассообмен (Справочник) М.: Энергия, 1978. –
 480 с.

5. Гуцалюк В.Я., Зубков И.С. Системы фазовой автоподстройки частоты резонансных инверторов установок индукционного нагрева при низкой добротности колебательного контура / Праці інституту електродинаміки національноі академіі наук Украіні. Киев. № 54, 2019, с. 88-94.

6. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева. СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 160 с.

7. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численные методы в теории индукционного нагрева. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 220 с.

8. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Программное обеспечение для моделирования и расчета индукционных нагревателей / Индукционный нагрев. 2009. № 3. С. 5-10.

9. Демидович В.Б., Растворова И.И. Моделирование индукционного нагрева легких сплавов перед обработкой давлением. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 158 с.

Кувалдин, А.Б Математические модели для исследования электромагнитного поля в ферромагнитных средах [Текст] /А.Б. Кувалдин // Электричество. – 2005.– №11. – с. 56 – 61.

 Жорник А.И., Прокопенко Ю.А., Чистяков А.Е. Численное решение задачи индукционного нагрева полого цилиндра // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 8 (121). С. 175-182.

12. Данилушкин А.И., Князев С.В., Семенов С.И. Математическая модель индукционного нагрева цилиндрических заготовок перед раскаткой // Вестник Воронежского государственного технического университета, Т. 8, № 10-1, 2012. С. 101-103.

 Прахт В.А., Сарапулов Ф.Н., Дмитриевский В.А., Гоман В.В.
 Компьютерное моделирование установки индукционного нагрева цилиндрических заготовок // Дистанционное и виртуальное обучение, № 9, 2009. С. 17-21.

14. Головенко Е.А., Кинев Е.С., Первухин М.В., Хохлов Д.В., Комаров А.В., Михайлов К.А. Результаты математического моделирования процесса нагрева цилиндрической загрузки в однофазном индукционном нагревателе / Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. Новосибирск. № 3 (40), 2010, с. 19-25.

Кинев Е.С., Головенко Е.А., Ковальский В.В., Фролов В.Ф., Шадрин
 Г.В Параметрическая оптимизация многофазных индукционных систем /
 Вестник Воронежского государственного технического университета.
 Воронеж. Том: 5, № 12, 2009, с. 35-40.

Немков В.С., Демидович В.Б., Растворова И.И., Ситько П.А.
 Индукционный нагрев алюминиевых заготовок: состояние и перспективы /
 Электрометаллургия. Москва. № 2, 2013, с. 12-19.

 Зимин, Л.С. Оптимальное проектирование систем индукционного нагрева в технологических комплексах обработки металла давлением.
 Автореф. дисс. ... доктора техн. наук. – Ленинград, 1987. – 30 с.

18. Данилушкин А.И., Майоров А..В., Дубов В.А. Моделирование электромагнитных и тепловых полей при индукционном двухчастотном нагреве ферромагнитного цилиндра / Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сборник научных статей 5-й

Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Юго-Западный государственный университет. Курск. 2020, с. 77-81.

19. Заикина Н.В. Моделирование и оптимальное управление процессом индукционного нагрева алюминиевых заготовок, вращающихся в магнитном поле постоянного тока / автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.13.06: Самарский государственный технический университет, 2010, с.23.

20. Шарапова О.Ю. Численное моделирование и оптимальное управление процессами индукционного нагрева цилиндрических заготовок под обработку давлением: автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.13.06: Самарский государственный технический университет. 2011, с.22.

21. Синяев С.В., Володченков С.И., Толтаева И.С. Математическое моделирование индукционного нагрева полых цилиндрических проводников в магнитном поле соленоида / Известия высших учебных заведений. Физика. Национальный исследовательский Томский государственный университет. Томск. Том 56, № 9-3, 2013, с. 200-203.

Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] /
О.Зенкевич. — М.: Мир, 1975. – 541 с.

23. Кинев Е.С., Головенко Е.А., Ковальский В.В., Фролов В.Ф., Шадрин Г.В. Параметрическая оптимизация многофазных индукционных систем / Воронежский государственный технический университет. Воронеж. Том 5, № 12, 2009, с. 35-40.

24. Данилушкин А.И., Кожемякин А.В., Мостовой А.П. Структурное моделирование процесса методического индукционного нагрева / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. Самарский государственный технический университет. Самара. № 1 (29), 2011, с. 158-165.

25. Плешивцева Ю.Э., Шарапова О.Ю. Энергосберегающие алгоритмы оптимального управления процессами индукционного нагрева / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия:

Технические науки. Самарский государственный технический университет. Самара. № 4 (32), 2011, с. 172-180.

26. Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я., Наке Б., Никаноров А.Н., Попов А.В. Проектирование индукционных установок на основе решения задач многокритериальной оптимизации / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. Самарский государственный технический университет. Самара. № 2 (50), 2016, с. 47-57.

27. Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И. Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного индукционного нагрева / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. Самарский государственный технический университет. Самара. № 2 (42), 2014, с. 148-163.

28. Осипова, Ю.А. Оптимизация переходных режимов работы индукционных нагревательных установок методического действия. Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Самара, 2007.–21 с.

29. Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А. <u>Оптимизация процесса</u> изотермического прессования слитков из алюминиевых сплавов с предварительным градиентным нагревом. / <u>Известия высших учебных</u> заведений. Цветная металлургия. 2016. <u>№ 2</u>. С. 49-57.

30. А. А. Афиногентов, М. Ю. Деревянов, «Эффективные стратегии функционирования производственного комплекса «нагрев – обработка металла давлением», Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2015, № 3, с. 162–167.

31. Левин И.С., Рапопорт Э.Я. Синтез оптимальной по быстродействию системы управления процессами индукционного нагрева в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта / Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. Самарский государственный технический университет. Самара. № 4 (36), 2012, с. 46-57.

32. Артур М.Х., Плешивцева Ю.Э. Синтез замкнутой системы оптимального управления численной моделью процесса индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок / Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону. № 1 (197), 2018, с. 29-36.

33. Демидович В.Б., Растворова И.И. Методика оптимизации индукционных установок для градиентного нагрева заготовок перед прессованием / Индукционный нагрев. 2013. № 3. С. 4-7.

Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст] / О.
Зенкевич, К. Морган. — Л.: Мир, 1986. – 318 с.

35.Elcut Руководство пользователя: https://elcut.ru/free_doc_r.htm.36.ВведениевCOMSOL Multiphysics:https://www.comsol.ru/documentation

37. Кувалдин А.Б., Дроздов О.В. Моделирование системы управления индукционной нагревательной установкой в среде MATLAB SIMULINK / Вести высших учебных заведений Черноземья. Липецкий государственный технический университет. Липецк. № 2 (16), 2009, с. 49-51.

38. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2005. – 292с. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация [Текст] / О. Зенкевич, К. Морган. — Л.: Мир, 1986. – 318 с.

Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677с.

40. Design concepts of induction mass heating technology based on multiple criteria optimization Pleshivtseva Y., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A., Barba P.D., Forzan M., Sieni E., Lupi S. / <u>The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering</u>. 2017. T. 36. <u>№ 2</u>. C. 386-400.

41. Rapoport E.Y. Analytical Construction of Aggregated Controllers in Systems with Distributed Parameters // Journal of Computer and Systems Sciences

International, 2012, Vol.51, No3, pp.375-390. Импакт фактор журнала в Web of Science 0,191.

42. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева металла. М.: Наука, 2012.
[Текст]: моногр. / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева - М.: Наука,, 2012. - 219 с.
43. Rudnev V. Handbook of Induction Heating. Second Edition. CRC Press.
Taylor Francis Group. Boca Raton. London New York, 2017. - 657p.

44. Рей, Уиллис Хармон. Методы управления технологическими процессами / У. Рей; Пер. с англ. А. М. Шафира. - М. : Мир, 1983. 368 с.

45. Кувалдин А.Б., Некрасова Н.С. Разработка методики расчета характеристик индукционного градиентного нагрева заготовок / Вестник Московского энергетического института. Национальный исследовательский университет "МЭИ". Москва. № 4, 2015, с. 48-53.

46. Галунин С.А., Никаноров А.Н., Муратов А.А., Блинов Ю.И., Орлов В.К. Исследование методов управления температурным полем в системах нагрева алюминия перед прессованием / Известия СПБГЭТУ ЛЭТИ. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург. № 9, 2012, с. 87-93.

47. Григорьев Е.А., Демидович В.Б., Прокофьев Г.И., Растворова И.И. Автоматизированный комплекс электротехнического оборудования нагрева и транспортирования заготовок в пресс / Электричество. 2013. № 12. С. 30-36.

48. Данилушкин, И.А. Моделирование и пространственно-временное управление процессами нагрева дисков турбоагрегатов на специализированных испытательных стендах: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Сам. гос. техн. ун-т Самара, 2002.

49. Галунин С.А., Никаноров А.Н., Муратов А.А., Блинов Ю.И., Орлов В.К. Исследование методов управления температурным полем в системах нагрева алюминия перед прессованием / Известия СПБГЭТУ ЛЭТИ. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург. № 9, 2012, с. 87-93.

50. Григорьев Е.А., Демидович В.Б., Прокофьев Г.И., Растворова И.И. Автоматизированный комплекс электротехнического оборудования нагрева и транспортирования заготовок в пресс / Электричество. 2013. № 12. С. 30-36.

51. Головенко Е.А., Горемыкин В.А., Кинев Е.С., Михайлов К.А. Индукционный нагреватель цилиндрических алюминиевых заготовок / Индукционный нагрев. Изд.: ООО "Комлиз-Полиграфия" (Санкт-Петербург). № 4 (26), 2013, с. 26-29.

52. Лившиц, М.Ю. Теория и алгоритмы оптимального управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики по системным критериям качества: Автореф. дис. докт. техн. наук. – Самара, 2001. – 46 с.

53. Плешивцева, Ю.Э. Последовательная параметризация управляющих воздействий и полубесконечная оптимизация алгоритмов управления технологическими объектами с распределенными параметрами. Автореф. дисс. .. доктора техн. наук. – Самара, 2009. – 50с.

54. Smolyanov I.A., Tarasov F. Search optimal control of induction heating modes for moving workpiece / The international journal for computation and mathimatics in electrical and electronic engineering. Emerald Group Publishing Limited ISSN: 0332-1649 Vol. 39, № 1, 2020, pp. 81-89.

55. Demidovich V.B., Perevalov Y.Y., Tchmilenko F.V., Mikhluk A.I. Single point temperature control system in continuous heaters / Proceedings of 2017 IEEE 2ND International conference on control in technical systems, CTS 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. St. Petersburg, 25-27 october, 2017, Pp. 75-79.

56. Г. Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров / М.: «Наука», 1973, с.833.

57. http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/metally-i-

splavy/teplofizicheskie-svojstva-sostav-i-teploprovodnost-alyuminievyh-splavov.

58. Базаров А.А. Исследование и разработка многосвязных систем управления термоциклическими испытаниями дисков турбоагрегатов: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 Самара, 1991.

59. Попов В.М., Лушникова Е.Н., Черноухов П.А. Тепловое контактирование металлических поверхностей с оксидными пленками / Лесотехнический журнал. Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. Воронеж. № 1 (5), 2012, с. 7-12.

60. Дорняк О.Р., Попов В.М., Анашкина Н.А. Математическое моделирование контактного термического сопротивления для упругодеформируемых твердых тел методами механики многофазных систем / Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. № 5. С. 2155-2167.

61. Кинев Е.С., Головенко Е.А., Комаров А.В., Первухин М.В., Неверов В.Ю. Модернизация индукционной системы с применением схемы смешанного резонанса / Вестник Воронежского государственного технического университета. Воронеж. Том: 5, № 6, 2009, с. 187-190.

62. Д.Н. Бондаренко, Ф.В. Чмиленко, В.Е. Парменов. Алгоритм частотного регулирования транзисторного инвертора для индукционного нагрева / Извести СПбГЭТУ «ЛЭТИ». №4, 2019, с.85-93.

63. Тяпин А. А., Головенко Е. А., Кинев Е. С., Ефимов С. Н. Симметрирование однофазной индукционной установки в трехфазной сети / Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт. Изд. "Панорама" Москва. № 6, 2020, с. 36-49.

64. Головенко Е. А., Горемыкин В.А., Кинев Е. С., Михайлов К. А. Индукционный нагреватель цилиндрических алюминиевых заготовок / Индукционный нагрев. Изд.: ООО "Комлиз-Полиграфия" (Санкт-Петербург). № 4 (26), 2013, с. 26-29.

65. Растворова И.И. Исследование и разработка энергосберегающих технологий индукционного нагрева легких сплавов: автореф. дисс... докт. техн. наук: 05.09.10 / Растворова И.И. С.-Петерб. гос. электротехн. ун-т (ЛЭТИ) 2015, с.22.

66. Андрушкевич В.В. Энергоэффективные технологии с применением индукционного нагрева в трубной промышленности: автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.09.10. / С.-Петерб. гос. электротехн. ун-т (ЛЭТИ). 2016, с.22.

67. Григорьев Е.А. Исследование и разработка энергосберегающих индукционных систем прецизионного нагрева титановых заготовок: автореф. дисс... канд. техн. Наук: 05.09.10 / С.-Петерб. гос. электротехн. ун-т (ЛЭТИ)/ 2011, с.16.

68. Немков В.С., Демидович В.Б., Растворова И.И., Ситько П.А. Индукционный нагрев алюминиевых заготовок: состояние и перспективы / Электрометаллургия. Издат.: Наука и технологии ООО. Москва. № 2, 2013, с. 12-19.

69. Бежитский С.С., Головенко Е.А., Горемыкин В.А., Кинев Е.С., Хохлов Д.В. Повышение технико-экономических показателей индукционных установок сквозного нагрева цветных металлов с использованием параметрической оптимизации / Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.В. Решетнева. Красноярск. № 6 (32), 2010, с. 19-24.

70. Bajda Y.I., Klymenko B.V., Pantelyat M.G., Trichet D., Wasselynck G. Electromagnetic and thermal transients during induction heating of cilindrical workpieces / Acta technica CSAV (Ceskoslovensk academie VED) Akademie Ved Ceske Republiky ISSN: 0001-7043 Vol: 63, № 5, 2018, pp. 657-682.

71. В.И. Руднев. Использование индукционного нагрева для прессования сплавов в полутвердом состоянии / Индукционный нагрев. Изд.: ООО "Комлиз-Полиграфия". Санкт-Петербург. № 2, 2011, с. 27-29.

72. Демидович В.Б., Растворова И.И., Чмиленко Ф.В., Григорьев Е.А. Индукционный нагрев алюминиевых заготовок перед прессованием и тиксоформовкой / Индукционный нагрев. Издат. ООО "Комлиз-Полиграфия". Санкт-Петербург. № 4, 2008, с. 5-9.

73. Михайлов К. А. Повышение энергетической эффективности преобразования электрической энергии в тепловую при вращении постоянных

магнитов вокруг цилиндрической загрузки: автореферат дисс... канд. техн. наук: 05.09.01/ Михайлов К. А. - Красноярск. 2011. 20 с.

74. Fabbri M., Morandi A., Ribani P.L. DC induction heating of aluminium billets using super conducting magnets / The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engeneering. Emerald Group Publishing Limited ISSN: 0332-1649 vol: 27, №: 2, 2008, pp. 480-490.

75. Fabbri M., Morandi A., Ribani P.L., Forzan M., Lupi S. Experimental and numerical analysis of DC induction heating of aluminum billets / IEEE transactions on magnetics. Institute of Electrical and Electronics Engineers ISSN: 0018-9464 Vol: 45, № 1, 2009, pp. 192-200.

76. Густав Олссон, Джангуидо Пиани. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб: Невский Диалект, 2001. -557 с.

77. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А., Андрушкевич В.В., Перевалов Ю.Ю. Модульные индукционные установки для непрерывного нагрева заготовок перед обработкой давлением / Известия СПБГЭТУ ЛЭТИ. Санкт-Петербург. № 9, 2016, с. 34-37.

78. Демидович В.Б., Оленин В.А., Растворова И.И. Индукционные системы прецизионного нагрева длинномерных цилиндрических заготовок из титановых сплавов / Цветные металлы. Изд. "Руда и металлы". Москва. № 4 (880), 2016, с. 41-45.

79. Андрушкевич В.В., Киреева Г.П., Севергин М.В., Меркушев А.А. Автоматизация технологических процессов индукционного нагрева длинномерных изделий перед прокаткой или с целью термической обработки / Индукционный нагрев. Издат.ООО "Комлиз-Полиграфия". Санкт-Петербург. № 1, 2009, с. 42-45.

80. Rafael O., Roberto M., Saul O.J. Simulation of a temperature fuzzy control into induction furnace / International power electronics congress - CIEP 13.
"Proceedings of the 2016 13th International Conference on Power Electronics, CIEP 2016". Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2016 pp. 64-69.

81. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Животягин Д.А. Параметрический анализ и оптимальное проектирование индукционной системы по критерию максимального коэффициента полезного действия/ Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», 2018г., Вып. № 3 (59). С.143–154.

82. А.И. Данилушкин, Н.М. Давыдова, Д.А. Животягин. Исследование вентиляционного аппарата как объекта управления и постановка задачи управления. VIII МНПК «Актуальные проблемы энергетики АПК», ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2017, с.51–53.

83. Данилушкин А.И., Животягин Д.А. Энергоэффективные режимы работы индукционных нагревателей в технологической линии обработки металла. 4-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». (18-19 февраля 2019г.) Сборник научных статей. Юго-Зап. гос. ун-т, г. Курск. С.82-85.

84. Д.А. Животягин, М.Г. Дуспулов, А.И. Данилушкин. Эффективность применения инфракрасной термографической дефектоскопии на Сб. электротехнологических установках. статей по материалам IV международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике» 19 декабря 2017г, г. Барнаул. В 4 ч. Ч.1/–уУфа: Изд. Дендра, 2017. C. 121–127.

85. Д.А. Животягин, асп., В.В. Романов, асп., рук. А.И. Данилушкин, д.т.н., проф. Исследование пусковых режимов двухсекционного индукционного нагревателя. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА.// 24 Междунар. научн. техн. конф. студентов и аспирантов. Тез. докл. – М.: МЭИ, 15–16 марта 2018. Москва. С.480.

86. А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Д.А. Животягин. Система методического индукционного нагрева цилиндрических заготовок из сплавов алюминия. // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», вып.28, №2, 2020г. С. 97–110.

87. А.И. Данилушкин, Д.А. Животягин, С.С. Кибкало, Д.В. Сурков.

Оптимизация электротехнологического комплекса для высокопроизводительных линий индукционного нагрева. // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», №3, 2020г.

88. Danilushkin, A. I., Maksimova, M. A. & Zhivotyagin, D. A. Synthesis of the automatic control system the temperature of liquid flow with incomplete measurement the object state with distribution parameters. in Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020 (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020). doi:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112042

89. Danilushkin, A., Bazarov, A. & Zhivotyagin, D. Synthesis of algorithms and optimal control system of start-up modes of continuous induction installation. in Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020 (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020). doi:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112041

Приложение

Утверждаю: Главный энергетик АО Арконик СМЗ» С.В. Фурсиков 09 2020г ้งง

Справка

об использовании результатов диссертационной работы Животягина Д.А., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

«Электроснабжение кафедры аспиранта Результаты научных исследований промышленных предприятий» Животягина Дениса Александровича, выполненных в рамках диссертационной работы в виде «Методики расчета электрических и режимных параметров трехфазного индукционного нагревателя для нагрева сплавов из алюминия» использованы на предприятии «Самарский металлургический завод» для расчета системы управления многосекционной индукционной установкой методического действия для нагрева заготовок перед прессованием.

Ведущий инженер по наладке электронного оборудования прессового производства В.Г. Пахомов АО «Арконик СМЗ» Главный прессовщик АО «Арконик СМЗ» Р.А. Каранашев В.А. Попов Начальник цеха №63