

Электротехника

УДК 621.365.511

СИСТЕМА МЕТОДИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ*

А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Д.А. Животягин

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена задача разработки индукционной системы нагрева заготовок из алюминиевого сплава с заданным ограничением на допустимое отклонение температуры. Целью работы является определение параметров секций индуктора и настроек системы регулирования, обеспечивающих достижение заданного распределения заготовки перед подачей под пресс. Сложность задачи связана с наличием нескольких секций нагревателя, отличающихся по длине от заготовок, что приводит к дополнительному фактору, обуславливающему повышение неравномерности в распределении температуры в загрузке. Модель электромагнитного процесса построена с учетом изменения удельного сопротивления в заготовках. При поиске более эффективного алгоритма расчета рассмотрен вариант совместного решения тепловой и электромагнитной задач, позволяющий упростить процедуру обмена данными между приложениями. Такой подход очень удобен при решении задач, не связанных жесткими условиями с достижением конечного состояния. При моделировании тепловых процессов формулировка задачи учитывает все особенности, связанные с лучистым теплообменом между протяженными поверхностями, имеющими разную температуру, температурные зависимости параметров заготовок, изменяющуюся область тепловыделения, обусловленную перемещением. В качестве вариантов системы нагрева рассмотрено программное управление и многоканальная система с коррекцией управления по контролю температуры в одной точке. При моделировании многоканальной системы управления нагревом использованы встроенные функции программного обеспечения, позволившие сформировать управляющие воздействия для каждого канала, рекомендовать места расположения датчиков температуры, обеспечивающие качественное управление нагревом.

Ключевые слова: индукционный нагрев, сплав алюминия, управление, связанные модели, метод конечных элементов, температурное распределение.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А.

Базаров Александр Александрович (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

Данилушкин Александр Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электро-снабжение промышленных предприятий».

Животягин Денис Александрович, аспирант.

Введение

В современной металлургической промышленности производство изделий из сплавов алюминия осуществляется путем обработки давлением после нагрева до температуры пластической деформации. Индукционные нагреватели, используемые для этих целей, выгодно отличаются от других нагревательных установок прежде всего высокой скоростью нагрева и небольшими потерями металла на окисление. В отличие от чистого алюминия сплавы имеют особенности физических характеристик, приводящие к необходимости сужения диапазона рабочих температур, при которых металл сохраняет свои свойства и процесс деформации проходит с меньшими энергозатратами [1–3]. В условиях выпуска широкой номенклатуры продукции из разных сплавов с использованием заготовок, отличающихся по габаритам, представляет интерес задача определения конструктивных и режимных параметров индукционных нагревателей, обеспечивающих минимум энергозатрат или минимальное время нагрева [4]. При нагреве сплавов с высокими значениями электропроводности имеет место ярко выраженный краевой эффект, способный привести к значительному перегреву углов цилиндрических или прямоугольных заготовок [5]. Строгое обоснование заглупления заготовок на выходе индуктора позволяет обеспечить требуемое распределение температуры.

Расчет параметров нагревателя и режима работы системы в настоящее время возможно осуществлять с малыми погрешностями, так как математические модели позволяют учитывать нелинейности характеристик, использовать совместную постановку электромагнитных и тепловых задач. Кроме того, возросли функциональные возможности программ расчета.

Электромагнитные процессы

Для моделирования электромагнитных процессов в системе «многосекционный нагреватель – заготовки» используется линейная постановка задачи в связи с отсутствием ферромагнитных сред. Уравнения Максвелла [5], описывающие связь между основными электромагнитными величинами, такими как напряженность магнитного поля и индукция, преобразуются, чтобы выполнить переход к численному решению.

Исходная система переписывается в терминах векторного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial r \mathbf{A}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial r \mathbf{A}}{\partial r} \right] - j \omega \mathbf{A} - \mathbf{J}_0 = 0, \quad (1)$$

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

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

\mathbf{A} – векторный магнитный потенциал;

\mathbf{J}_0 – плотность тока внешних источников.

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

$$A|_{S_1 \in S} = 0, \quad (2)$$

где S_1 – удаленная граница расчетной области.

Исходное дифференциальное уравнение в частных производных (1) с граничными условиями вида (2) для реализации численного метода расчета преобразуется в функционал, на базе которого определяются параметры для системы алгебраических уравнений. Линейный вид полученной системы может быть усложнен в случае решения задач, содержащих ферромагнитные среды. Результатом решения системы уравнений является вектор значений магнитного потенциала для каждого элемента. Дополнительные расчеты позволяют определить токи и другие переменные, такие как мощность тепловыделения, силы.

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

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

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

Тепловые процессы

Математическая модель процессов переноса тепла в системе дискретно перемещаемых заготовок при наличии комбинированного теплообмена с футеровкой и окружающей средой в общем случае представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. В рассматриваемой задаче необходимо учитывать целый ряд процессов при переносе тепла между контактирующими заготовками и тепловые потоки излучения в системе «заготовки – футеровка».

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве исходной модели принято нелинейное уравнение теплопроводности вида [6]

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + Q \quad (4)$$

с начальными условиями

$$T(r, x, 0) = T_0 \quad (5)$$

и граничными условиями

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (6)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 [T(R, x, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(R, x, t) - T_{wall}^4]; \quad (7)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\alpha_2 [T(r, 0, t) - T_{ext}]; \quad (8)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X} = \alpha_3 [T(r, X, t) - T_{ext}] + \varepsilon \sigma [T^4(r, X, t) - T_{ext}^4]. \quad (9)$$

Здесь $T(r, x, t)$ – температура загрузки;
 C – удельная теплоемкость;

ρ – плотность;
 λ – теплопроводность;
 Q – плотность внутренних источников тепла;
 α_i – коэффициенты конвективного теплообмена на поверхностях заготовок и футеровки секций индукторов;
 ε – степень черноты загрузки и футеровки;
 T_{wall} – температура внутренней стенки футеровки, зависящая от продольной координаты x и от времени t ;
 T_{ext} – температура окружающей среды;
 R – радиус загрузки;
 X – длина загрузки.

Для решения тепловой задачи используется приложение программы Comsol, построенное на базе метода конечных элементов. Это приложение позволяет использовать аналитические аппроксимирующие выражения для нелинейных характеристик параметров задачи, что упрощает и ускоряет процедуру создания модели. Дополнительно имеется возможность изменять свойства и переменные на каждом шаге по времени, а также задавать сложные геометрические формы нагреваемого изделия. Определение распределения температуры в нагреваемом изделии сводится к решению уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, которая находится в результате решения электромагнитной задачи.

Переход к конечно-элементной формулировке сопровождается линеаризацией исходных уравнений для того, чтобы упростить процедуры решения. Вместо уравнений в частных производных (1) и (3) формируются системы алгебраических уравнений вида

$$[K_T]\{T\} = \{Q_T\}; \quad (10)$$

$$[K_A]\{A\} = \{Q_A\}. \quad (11)$$

Здесь $[K_T]$, $[K_A]$ – приведенные матрицы жесткости;
 $\{Q_T\}$, $\{Q_A\}$ – векторы источников для тепловой и электромагнитной задач.

Тепловая и электромагнитная задачи могут решаться одновременно, тогда имеет место связанная или мультифизическая задача. Системы уравнений (10) и (11) объединяются в одну, что дает возможность осуществлять обмен результатами расчета и формировать полноценную нелинейную задачу. Погрешность расчетов уменьшается, и отпадает необходимость обработки при обмене между приложениями, как это бывает при использовании односвязных задач.

Моделирование электромагнитных процессов в многосекционном индукционном нагревателе

Исследуемый многосекционный индукционный нагреватель содержит шесть катушек, внутри которых размещены заготовки (рис. 1). В рассматриваемом технологическом процессе при пуске нагреватель должен быть загружен заготовками. Пуск индуктора осуществляется сразу с заданным темпом выдачи заготовок. При первоначальном включении нагревателя находящиеся в нем заготовки, кроме расположенной на входе, не успевают достичь заданной температуры, поэто-

му после прохождения первого цикла нагрева они непригодны для прессования и выгружаются для охлаждения. Обычно эти заготовки (так называемые «ложные» заготовки) используются только при запуске.

В установившемся режиме через определенные интервалы времени происходит перемещение заготовок на одну позицию. Последняя заготовка выгружается из индуктора, а место первой занимает холодная с рольганга. Ввиду использования исследуемого нагревателя для нагрева различных по длине заготовок их расположение не всегда совпадает с границами секций.

Нагреваемые заготовки являются немагнитными, но тем не менее зависимость удельного сопротивления от температуры вносит искажение в распределение напряженности магнитного поля по длине индуктора. Между секциями индукционного нагревателя имеются небольшие зазоры, которые обуславливают провалы в диаграмме распределения мощности. Самые значительные искажения связаны с краевыми эффектами [5], которые способны привести к значительному перегреву части заготовки. Учитывая низкое удельное сопротивление сплава, необходим тщательный анализ распределения внутренних источников и корректировка заглубления последней заготовки. Схема расположения заготовок в нагревателе приведена на рис. 1. В нагревателе находится шесть заготовок. Здесь представлен наиболее общий вариант расположения заготовок, при котором длина заготовки не совпадает с длиной секции. Это приводит к смещению границ заготовок относительно границ секций. В этом случае заготовка находится под действием двух независимых источников энергии, что существенно усложняет расчет температурного распределения.



Рис. 1. Многосекционный индуктор с заготовками

Выполнен ряд расчетов мощности, выделяемой в заготовках, и тока в секциях для разных длин секций начиная от 1,1 м и закачивая 0,9 м. Общая длина индуктора изменяется от 6,6 м до 5,65 м. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения тока индуктора и мощности в заготовках

$l_{ин}, м$	№ заг.	1	2	3	4	5	6
	$\sigma, См/м$	$20 \cdot 10^6$	$17 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^6$	$14 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
6,6	$P_2, кВт$	222	172	189	194	204	313
	$I'_u, кА$	210	210	210	210	210	210
6,35	$P_2, кВт$	200	171	189	193	200	206
	$I'_u, кА$	194	210	210	210	210	147
6,1	$P_2, кВт$	195	171	188	192	200	192

$l_{из}, м$	№ заг.	1	2	3	4	5	6
	$I'_u, кА$	192	200	200	200	200	145
5,85	$P_2, кВт$	196	171	185	191	200	198
	$I'_u, кА$	195	190	190	190	190	155
5,6	$P_2, кВт$	200	172	182	188	199	197
	$I'_u, кА$	202	180	180	180	180	161

Для варианта № 5 представлена диаграмма распределения мощности тепло-выделения на поверхности загрузки (рис. 2). На краях отношение мощности к среднему значению составляет 2,5. Для других вариантов индуктора, имеющих большую длину, краевой эффект выражен ярче: отношение возрастает до 5,5. Дальнейшее уменьшение длины секций приводит снижению удельной мощности на краях и последующему недогреву, что сложнее устранить, чем перегрев.

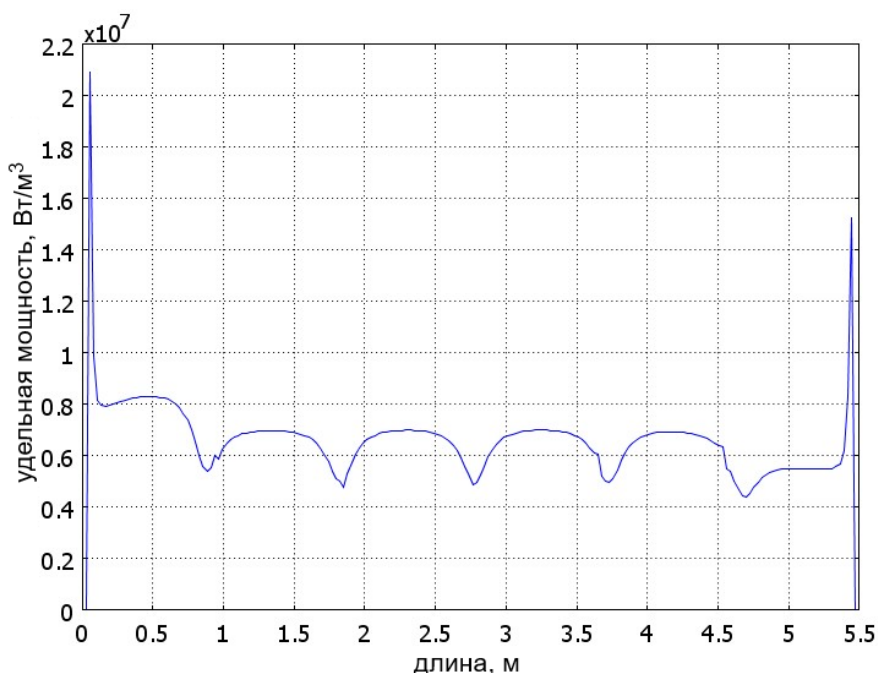


Рис. 2. Диаграмма удельной мощности тепловыделения на поверхности загрузки

Максимальные значения мощности в загрузке приняты на уровне 200 кВт, так как электрический КПД индуктора для загрузки из сплава Д16 не превышает 0,5, а преобразователь частоты имеет выходную мощность 400 кВт.

Параметры секций индукционного нагревателя длиной 5,6 м представлены в табл. 2. Число витков секции $w=16$; ширина трубки индуктора $a=64,5$ мм.

Параметры секций индуктора

N	T, °C	ρ , Ом·м	Δ , мм	P_u , кВт	P_2 , кВт	ΔP_u , кВт	U, В	$\cos \varphi$	I, кА
1	70	$5 \cdot 10^{-8}$	15,9	398	204	194	404	0,066	14,9
2	150	$6 \cdot 10^{-8}$	17,4	399	212	187	400	0,068	14,6
3	250	$7 \cdot 10^{-8}$	18,8	402	222	180	396	0,071	14,3
4	350	$8 \cdot 10^{-8}$	20,1	400	227	173	391	0,073	14
5	450	$9 \cdot 10^{-8}$	21,3	398	232	166	383	0,075	13,8
6	500	$10 \cdot 10^{-8}$	22,5	399	236	163	382	0,077	13,6

Полученные значения использованы при проведении тепловых расчетов.

Моделирование процесса индукционного нагрева заготовок с применением программного управления

Настройка системы управления температурным распределением в нагреваемых заготовках является сложной задачей. Применение различных способов управления определяется требованиями к температурному режиму и энергетическими ограничениями. При этом необходимо учитывать зависимость физических характеристик материала нагреваемой заготовки от температуры [7, 8]. Характерная для индукционного нагрева массивных заготовок неуправляемость процесса предполагает использование комплекса мер или нетрадиционных способов и систем, позволяющих обеспечить требуемое распределение температуры с допустимым отклонением. Среди таких способов можно отметить применение устройства для нагрева цилиндрических слитков, вращающихся в поле постоянных магнитов [9]. Возможность управлять глубиной проникновения тока изменением частоты вращения слитка не всегда дает преимущество перед методическим нагревом с использованием статических преобразователей частоты, позволяющим обеспечить высокую производительность с заданными показателями качества.

Использование мультифизических моделей эффективно при моделировании задач, описываемых уравнениями с плавным изменением параметров. Заготовки из алюминиевого сплава Д16 имеют гладкие зависимости удельного сопротивления, теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры, поэтому при решении связанных электротепловых задач проблем не возникает. Ориентация на характеристики реальной индукционной системы, состоящей из шести индукторов длиной 1,1 м и мощностью 400 кВт, обеспечивающих нагрев заготовок диаметром 1,08 м и длиной 0,9 м, позволила сузить поле поиска параметров.

В работе рассмотрено программное управление нагревом заготовок. Регулирование мощности тепловыделения в заготовках на основе контроля температуры не предусмотрено. Для имитации перемещения заготовок через индукторы использована ступенчатая функция $H(t - t_k)$, позволяющая «включать» или «выключать» источники тепла в тепловой задаче, изменять коэффициент теплопроводности областей, моделирующих контактное сопротивление соседних загото-

вок. Например, при подобранном темпе выдачи заготовок одна за 20 минут в момент $t=1200$ с, соответствующий перемещению первой заготовки к выходу индуктора на расстояние 0,9 м и появлению на ее месте второй заготовки, происходит включение источника тепла во второй заготовке $Q=Q_{av_emqa}*(flc1hs(t-1200,1)-flc1hs(t-7200,1))$. Плотность мощности Q_{av_emqa} экспортируется из электромагнитной задачи в тепловую. Ступенчатая функция в программе Comsol представлена несколькими встроенными функциями, среди которых $flc1hs(t-t_k, \Delta t)$. Аргументом ступенчатой функции может выступать не только время t , но и температура T . Интервал времени Δt определяет переход от значения функции, равного нулю, к единице.

При моделировании предусмотрена имитация выталкивания заготовок из индуктора. При этом происходит отключение нагрева. Кроме того, тепловой контакт, возникающий при соприкосновении заготовок и характеризующийся увеличением коэффициента теплопроводности $k=flc1hs(t-1200,10)*5+0.001$, для «выталкиваемой» заготовки может быть устранен с помощью добавления слагаемой с отрицательным знаком для времени выталкивания ($t=7200$ с).

В результате при периоде выдачи заготовок, равном 20 минут, получены диаграммы температуры по длине всей загрузки (6 заготовок), которые представлены на рис. 3. Токи в одновитковых индукторах: в первом 200 кА, во втором – пятом 180 кА, в шестом 161 кА. Токи подобраны для обеспечения одинаковой мощности во всех заготовках. Мощность тепловыделения в заготовках имеет значения от 172 до 200 кВт.

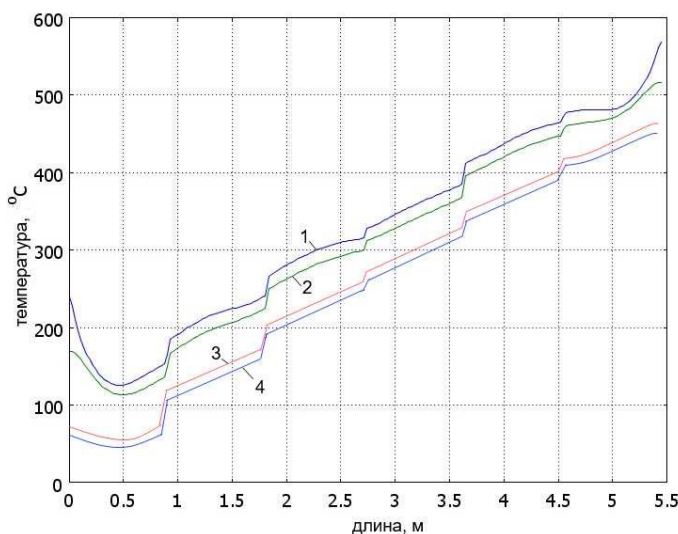


Рис. 3. Диаграммы температур в загрузке при программном управлении нагревом:

- 1 – на поверхности при $t=7200$ с; 2 – на поверхности при $t=7300$ с;
- 3 – на осевой линии при $t=7300$ с; 4 – на осевой линии при $t=7200$ с

Как следует из результатов расчета, при программном управлении распределением мощности между секциями нагревателя температурное распределение по радиусу слитка на выходе из нагревателя не удовлетворяет требуемому по технологии распределению.

Различие между распределениями в момент окончания нагрева ($t=7200$ с) и в момент подачи к прессу (с учетом транспортировки общее время $t=7300$ с) незначительно, перепады температур по длине и радиусу слитка и температура поверхности превышают допустимые значения. Таким образом, использование программного управления в процессе выхода на установившийся режим нагрева с учетом энергетических и технологических ограничений на процесс нагрева не обеспечивает необходимые для технологии прессования температурные распределения в слитке.

Моделирование процесса индукционного нагрева заготовок с коррекцией управления по результатам контроля температуры

При расчете алгоритма управления с коррекцией управления на основе анализа температурного распределения возможны варианты управления по контролю температуры в одной точке с синхронным регулированием мощности во всех секциях [10]. Этот способ больше характерен для систем непрерывного нагрева. Для многосекционных нагревателей синтез управления с коррекцией по температурному распределению требует более серьезного математического аппарата [11–13]. Для математических моделей процесса нагрева, построенных с помощью численных методов, поисковая процедура определения вектора параметров сложна. Одной из искоемых переменных является вектор сигналов задания (уставок) для многоканальной системы управления [15].

В рассматриваемом случае не допускается перегревать сплав выше 510 градусов. В то же время температура нагретой заготовки перед прессованием, равная пятистам градусам, не должна отклоняться более чем на 10 градусов как по радиусу, так и по длине заготовки.

В отличие от алгоритмов программного управления использование мультифизических моделей при поиске управления с коррекцией по температуре в точке контроля затруднено. В расчетной модели приходится разбивать поверхностный слой заготовок на подобласти, расположенные под секциями нагревателя.

Моделирование процесса перемещения заготовок внутри нагревателя осуществляется аналогично тому, как это выполнено при поиске программного управления. Для регулирования температуры путем изменения мощности каждого индуктора и, соответственно, мощности тепловыделения в областях заготовок, находящихся в зоне действия индуктора, выбираются точки, в которых температура контролируется непрерывно. На каждом шаге по времени производится расчет мощности согласно выражению

$$Q = Q_{max} * (f_{cl}hs(t-1200, 1) - f_{cl}hs(t-7200, 1)) * (1 - f_{cl}hs(u1 - Tz1, \Delta T)).$$

Здесь Q_{max} – максимальное значение удельной мощности в рассматриваемой подобласти;

$u1$ – имя переменной, присвоенное для выбранной точки;

$Tz1$ – величина уставки для рассматриваемого канала управления (диапазон температур задания в задаче составляет 373–773 K);

ΔT – перепад температур, при котором происходит переход с одного уровня функции на другой.

Моделирование процесса нагрева в нагревателе одновременно с системой регулирования выполнено для режима пуска нагревателя. С учетом возможностей преобразователей частоты, используемых в качестве источников питания, загрузка заготовок осуществляется поочередно начиная с первой секции. Для

предотвращения перегрева на торце со стороны выхода предусматривается при каждом перемещении точное позиционирование. С целью обеспечения нужного краевого эффекта заготовка останавливается на расстоянии 0,1 м от выхода из каждой секции. На время пуска нагревателя должна быть задействована система контроля позиционирования с изменяющимися параметрами при добавлении каждой новой заготовки. По окончании режима пуска заглубление заготовок остается неизменным.

Расчет значений уставок для каждой секции произведен на основании многократного повторения вычислительной процедуры. Исходное соотношение уставок температур для каналов регулирования принято равномерно возрастающим от 100 до 500 градусов. Исследование диаграмм температуры во всей загрузке и в заготовке на выходе из индуктора показывает, каково отклонение от заданного распределения. Последовательное увеличение уровня уставок до предельного значения 500 градусов во всех каналах не дало преимуществ в достижении заданного распределения. Сравнение временных диаграмм изменения удельной мощности всех каналов регулирования для варианта с максимальными уставками (рис. 4) и варианта с плавно возрастающими уставками (рис. 5) показало, что в первом случае первые четыре индуктора работают на полную мощность часть времени, а потом переходят в режим стабилизации температуры поверхности, а оставшиеся два служат для выравнивания температуры и потребляют меньшую мощность. Такой режим не оставляет резерва системе регулирования в случае внешних возмущений, например кратковременных остановов процесса нагрева.

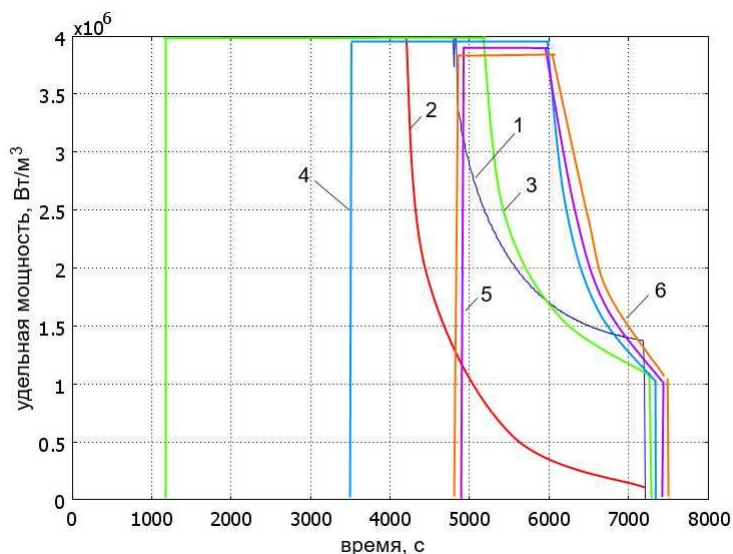


Рис. 4. Временные диаграммы мощности тепловыделения каналов регулирования

В итоговом варианте уставок системы регулирования участок плавного регулирования характерен только для двух индукторов на выходе. В первых четырех каналах управление ближе к релейному. На характер распределения температуры оказывает влияние взаимное расположение заготовок и секций индуктора, отличающихся по длине. Одна заготовка может находиться одновременно в двух секциях, что при периодических перемещениях вносит искажения в работу системы регулирования.

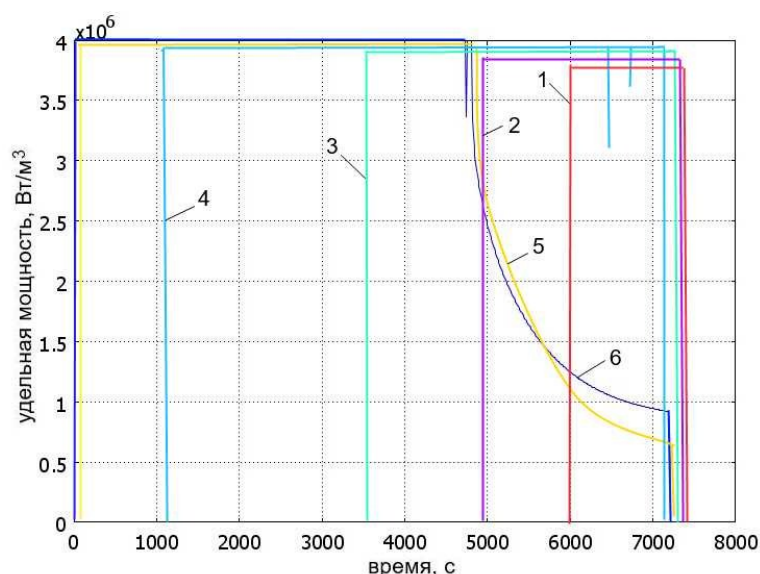


Рис. 5. Временные диаграммы мощности тепловыделения каналов регулирования для итогового варианта параметров

Плавное нарастание теплосодержания в заготовках достигнуто на основании анализа распределений температуры и коррекции графика мощности во всех каналах. Итоговое распределение температуры в заготовках получено при общем времени нагрева $t=7200$ с и уставках регуляторов температуры: $Tz1=373$ К, $Tz2=473$ К, $Tz3=573$ К, $Tz4=673$ К, $Tz5=763$ К, $Tz6=773$ К. График температурного распределения представлен на рис. 6.

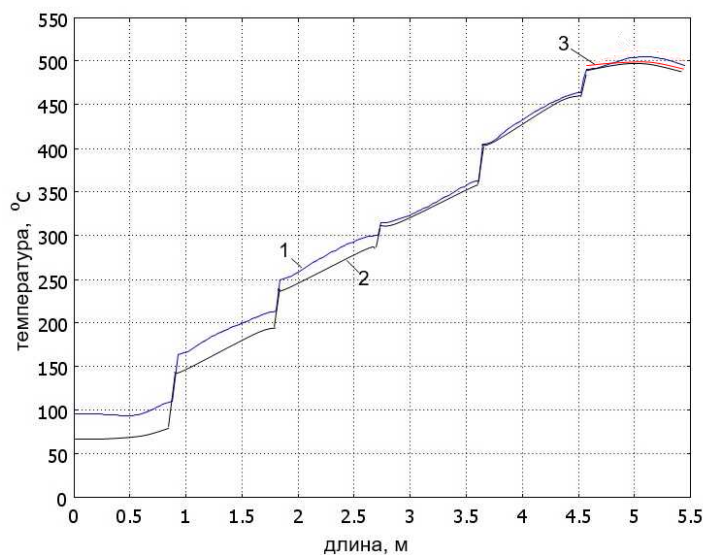


Рис. 6. Диаграммы температур в загрузке при автоматическом управлении нагревом:

1, 2 – на поверхности и на осевой линии в момент времени 7200 с;
3 – на поверхности в момент времени 7300 с

Как видно из диаграмм, рассмотренный в работе подход позволяет для выходной заготовки обеспечить требуемое распределение температуры с допустимым отклонением от заданного значения. Для рассмотренной конструкции многосекционного нагревателя и заготовок из алюминиевого сплава в условиях ограничения на предельное значение температуры заданное температурное распределение достигается только с учетом интервала охлаждения при транспортировке заготовок к прессу.

Заключение

На основании проведенных исследований электромагнитных и тепловых процессов в системе индукционного нагрева методического действия определен алгоритм поиска параметров нагревателей в условиях строгих ограничений на отклонения температуры от заданных значений. Применение численных моделей расчета тепловых процессов, учитывающих взаимный лучистый теплообмен в системе «загрузка – футеровка» каждой секции нагревателя, в сочетании с применением итерационной процедуры расчета управления с коррекцией по температуре в точке контроля позволило получить минимальную погрешность расчета и обеспечить достижение заданного температурного распределения с допустимыми отклонениями. Параметры нагревателя, найденные при анализе вариантов, позволяют минимизировать общее время нагрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немков В.С., Демидович В.Б., Растворова И.И., Ситько П.А. Индукционный нагрев алюминиевых заготовок: Состояние и перспективы // *Электрометаллургия*. 2013. № 2. С. 12–19.
2. Демидович В.Б., Растворова И.И., Чмиленко Ф.В., Григорьев Е.А., Немков В.С. Энергоэффективные индукционные нагреватели слитков из легких сплавов // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2013. № 5. С. 11–22.
3. Зимин Л.С., Егиазарян А.С. Особенности индукционного нагрева под деформацию // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2015. № 3 (47). С. 128–135.
4. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Животягин Д.А. Параметрический анализ и оптимальное проектирование индукционной системы по критерию максимального коэффициента полезного действия // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2018. № 3. С. 143–153.
5. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет установок индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 280 с.
6. Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1971. 560 с.
7. Турбин В.В. Численное моделирование процесса проходного индукционного нагрева металла перед пластической деформацией // *Новая наука: Проблемы и перспективы*. 2017. № 1–2. С. 178–180.
8. Уманский А.А., Протопопов Е.В., Темлянцева М.В., Базайкин В.И., Никитин А.Г. Численное моделирование теплового состояния крупнотоннажных слитков в процессе кристаллизации и нагрева // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. Т. 15. № 7. С. 325–330.
9. Власов Д.С., Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Морев А.Э., Промзелев В.А. Нагрев алюминиевых слитков полем вращающихся постоянных магнитов // *Цветные металлы и минералы – 2016: сборник тезисов докладов Восьмого международного конгресса*. 2016. С. 220–221.
10. Демидович В.Б., Перевалов Ю.Ю., Чмиленко Ф.В., Михлюк А.И. Одноточечная система управления температурой в непрерывных нагревателях // *Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах*. 2017. № 1. С. 78–81.
11. Pleshivtseva Y., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A., Barba P.D., Forzan M., Sieni E., Lupi S. Design concepts of induction mass heating technology based on multiple criteria optimization // *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2017. Т. 36. № 2. С. 386–400.

12. Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А. Оптимизация процесса изотермического прессования слитков из алюминиевых сплавов с предварительным градиентным нагревом // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2016. № 2. С. 49–57.
13. Попов А.В., Дьяконов А.И. Оптимальное по быстродействию управление процессом периодического индукционного нагрева с учетом ограничения на максимальную температуру // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2015. № 3 (47). С. 56–68.
14. Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И. Выбор температурного параметра для оперативного управления нагревом металла в методических печах // Автоматизированные технологии и производства. 2015. № 1 (7). С. 9–12.
15. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У., Ахметова А.У., Жадинский Д.Ю. Определение заданий зонным регуляторам температуры при реализации энергосберегающего управления нагревом металла // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2015. № 1 (6). С. 16–19.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2020 года

INDUCTION HEATING SYSTEM ALUMINUM ALLOY CYLINDRICAL BILLETS

A.A. Bazarov, A.I. Danilushkin, D.A. Zhivotyagin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *This publication discusses the task of developing an induction heating system for billets made of aluminum alloy with a given limit on the permissible temperature deviation. The purpose of the work is to determine the parameters of the inductor sections and the settings of the control system to achieve a given distribution of the billet before being fed under the press. The complexity of the problem is associated with the presence of several heater sections that differ in length from the workpieces, which leads to an additional factor leading to an increase in the unevenness in the distribution of temperature in the load. The model of the electromagnetic process is built taking into account the change in resistivity in the workpieces. When searching for a more efficient calculation algorithm, a joint solution to the thermal and electromagnetic problems is considered, which allows to simplify the procedure for exchanging data between applications. This approach is very convenient for solving problems that are not connected with harsh conditions with the achievement of the final state. When modeling thermal processes, the formulation of the problem takes into account all the features associated with radiant heat transfer between extended surfaces having different temperatures, temperature dependences of the workpiece parameters, a varying heat release region due to displacement. As options for a heating system, software control and a multichannel system with control correction for temperature control at one point are considered. When simulating a multi-channel heating control system, built-in software functions were used that made it possible to form control actions for each channel and recommend the location of temperature sensors providing high-quality control of heating.*

Keywords: *induction heating, aluminum alloy, control, coupled models, finite element method, temperature distribution.*

*Aleksander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Denis A. Zhivotyagin, Postgraduate Student.*

REFERENCES

1. *Nemkov V.S., Demidovich V.B., Rastvorova I.I., Sitko P.A.* Induktsionny nagrev aluminievykh zagotovok: Sostoyanie I perspektivy. Elektrometallurgiya. 2013. № 2. S. 12–19.
2. *Demidovich V.B., Rastvorova I.I., Chmilenko F.V., Grigoriev E.A., Nemkov V.S.* Energoeffektivnye induktsionnye nagrevateli slitkov iz legkikh splavov. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika. 2013. № 5. S. 11–22.
3. *Zimin L.S., Egiazaryan A.S.* Osobennosti induktsionnogo nagreva pod deformatsiyu. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2015. № 3 (47). S. 128–135.
4. *Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Zhivotyagin D.A.* Parametricheskii analiz I optimalnoe proektirovanie induktsionnoy sistemy po kriteriyu maksimalnogo koeffitsienta poleznogo deystviya. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2018. № 3. S. 143–153.
5. *Nemkov V.S., Demidovich V.B.* Teoriya i raschet ustanovok induktsionnogo nagreva. L.: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1988. 280 p.
6. *Lykov A.V.* Teplomassoobmen. M.: Energiya, 1971. 560 s.
7. *Turbin V.V.* Chislennoe modelirovanie protsessa prokhodnogo induktsionnogo nagreva metalla pered plasticheskoy deformatsiyey. Novyanauka: Problemy I perspektivy, 2017. № 1–2. S. 178–180.
8. *Umanskiy A.A., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Bazaykin V.I., Nikitin A.G.* Chislennoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya krupnogabaritnykh slitkov v protsesse kristallizatsii i nagreva. Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii. 2017. T. 15. № 7. S. 325–330.
9. *Vlasov D.S., Aliferov A.I., Bikeev R.A., Morev A.E., Promzelev V.A.* Nagrev aluminievykh slitkov polem vrashayushchikhsya magnitov. Tsvetmetally i mineral – 2016. Sbornik tezisov dokladov Vosmogo mezhdunarodnogo kongressa. 2016. S. 220–221.
10. *Demidovich V.B., Perevalov Yu.Yu., Chmilenko F.V., Mikhlik A.I.* Odnotochechnaya Sistema upravleniya temperaturoy v nepreryvnykh nagrevatelyakh. Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh. 2017. № 1. S. 78–81.
11. *Pleshivtseva Y., Rapoport E., Nacke B., Nikanorov A., Barba P.D., Forzan M., Sieni E., Lupi S.* Design concepts of induction mass heating technology based on multiple criteria optimization. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2017. T. 36. № 2. S. 386–400.
12. *Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A.* Optimizatsiya protsessa izotermicheskogo pressovaniya slitkov iz aluminievykh splavov s predvaritelnyim gradientnym nagrevom. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya. 2016. № 2. S. 49–57.
13. *Popov A.V., Diyakonov A.I.* Optimalnoe po bystrodeystviyu upravlenie protsessom periodicheskogo induktsionnogo nagreva s uchetom ogranicheniya na maksimalnuyu temperature. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2015. № 3 (47). S. 56–68.
14. *Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I.* Vybora temperaturnogo parametra dlya operativnogo upravleniya nagrevom metalla v metodicheskikh pechakh. Avtomatizirivannyye tekhnologii i proizvodstva. 2015. № 1 (7). S. 9–12.
15. *Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Akhmetova A.U., Zhadinskiy D.Yu.* Opredelenie zadaniy zonnym regulyatorom temperature pri realizatsii energosberegayushchego upravleniya nagrevom metalla. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie system v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh. 2015. № 1 (6). S. 16–19.