

Энергетика и электротехника

УДК 621.365.511

СИСТЕМА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МАССИВНЫХ КОЛЕЦ ПЕРЕД РАСКАТКОЙ

А.А. Базаров, Д.В. Колпаков, Н.Р. Штукатуров¹

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, sward63rus@mail.ru, vip.ue98@mail.ru

Аннотация. Рассматривается система индукционного нагрева крупногабаритного кольца в катушке прямоугольной формы. Торцевая поверхность заготовки расположена горизонтально. Для формирования равномерного распределения температуры в заготовке, задвигаемой в индуктор, применяется механизм вращения. Проведенные исследования распределения мощности тепловыделения и температуры в заготовке показали необходимость снижения напряженности поля в области отверстия. Решение проблемы найдено с помощью применения магнитопроводов в конструкции индуктора, вытесняющих токи в заготовке за пределы подверженных перегреву участков. Полученные результаты моделирования электромагнитных и тепловых полей в заготовке подтверждают правильность конструктивного решения.

Ключевые слова: геометрическая модель, прямоугольный индуктор, объемная мощность.

Введение

При изготовлении колес для железнодорожных вагонов используются различные технологии [1–3]. Различия обусловлены условиями эксплуатации, в первую очередь – температурой, и свойствами применяемого металла. Использование многоступенчатого процесса формования колеса железнодорожного вагона приводит к тому, что после нескольких операций температура заготовки снижается и для завершения процесса требуется дополнительный подогрев [4]. Учитывая, что повторный нагрев в газовой печи нежелателен, предлагается использовать индукционную систему для подогрева. Система нагрева должна обеспечить подогрев заготовки с начальной температуры 950 градусов до конечного значе-



© Автор(ы), 2024

¹ Александр Александрович Базаров, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Дмитрий Викторович Колпаков, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Николай Романович Штукатуров, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ния 1100 градусов, чтобы процесс пластической деформации был выполнен без осложнений. В указанном диапазоне температур магнитные и тепловые свойства стали практически не изменяются.

Проектирование индукционного нагревателя для массивных колец требует учета различных особенностей технологического процесса [3–8]. При большом значении отношения радиуса заготовки к ее высоте возникает проблема нагрева торцевых поверхностей. Кроме того, при значительной массе процесс загрузки заготовки в индуктор является довольно сложным. При небольшой длине цилиндрической заготовки использование привычной конструкции индуктора невозможно, так как ее сложно удержать от падения при перемещении. В работе [6] индуктор для нагрева кольцевых заготовок имеет обычную цилиндрическую форму. Осевая линия индуктора ориентирована вертикально. Система загрузки содержит толкатели, обеспечивающие горизонтальное перемещение заготовки. После установки заготовки в нужное положение происходит опускание индуктора. Несмотря на простоту операций имеется существенный недостаток: требуются гибкие электрические токоподводы. Так как частота и величина тока довольно значительны, это приводит к увеличению потерь и снижению надежности. Для решения этих проблем в качестве конструкции предлагается прямоугольная катушка индуктора, в которую заготовка помещается путем заталкивания по направляющим (рис. 1) [9]. Для формирования равномерного распределения температурного поля предусматривается вращение кольцевой заготовки и введение пластин магнитопровода. Для вращения опорной теплоизолирующей плиты в индукторе предлагается использовать систему конических роликов, на которые опирается кольцо, расположенное по внешнему радиусу плиты. Соединение кольца и радиальных ребер жесткости предусматривается с помощью диэлектрических прокладок.

Процесс изготовления железнодорожных колес сопровождается не только изменением температуры, но и механическим воздействием со стороны прессового оборудования. Допустимая скорость деформации связана с возможностью устранения возникающих напряжений. Поэтому уровень температуры в загрузке очень важен. При анализе процессов нужно учитывать величину коэффициента упругости во всем объеме заготовки. Задача контроля напряжений в деформируемом объекте требует отдельного исследования [10, 11]. Более прагматичным является подход, связанный с соблюдением общих требований к распределению температуры в заготовке перед пластической деформацией [12, 13].

Проектирование систем индукционного нагрева вращающихся тел является специфической задачей, требующей учета динамических процессов. В зависимости от скорости вращения требуется рассмотрение влияния скорости вращения только на тепловые процессы или же и на электромагнитные [14–16]. В работах [15, 16] рассмотрено воздействие электромагнитного поля постоянных магнитов на вращающуюся заготовку. При взаимодействии магнитных полей индукционной системы и загрузки возникают усилия, которые необходимо учитывать при расчете узлов крепления индуктора и расчете электропривода, приводящего диск во вращение. Кроме рассмотренных вопросов при расчете основной задачей остается расчет параметров индуктора и получение распределения температуры в заготовке с допустимыми отклонениями [17].

Целью работы является поиск параметров системы индукционного нагрева массивного кольца в индукторе прямоугольной формы, обеспечивающей равномерное распределение температуры перед пластической деформацией.

Для расчета параметров индуктора необходимо использование численного метода. Кроме того, важно учитывать различные краевые эффекты, возникающие в отдельных областях загрузки. В качестве инструмента выбран программный комплекс Comsol, который построен на основе метода конечных элементов.

В связи с наличием в системе тел разной формы используется трехмерная модель электромагнитной задачи, содержащая цилиндрическую заготовку, индуктор с прямоугольными витками и пластины магнитопровода. Необходимость применения магнитопровода в рассматриваемом индукционном нагревателе обусловлена стремлением к снижению полей рассеяния и повышению коэффициента мощности. Это отражается на снижении потерь в катушке индуктора и повышении электрического коэффициента полезного действия. Кроме того, магнитопровод обеспечивает вытеснение тока в проводниках индуктора к поверхности. В условиях значительных зазоров между индуктором и загрузкой и отсутствием кольцевого эффекта, присущего индукторам цилиндрической формы, это обуславливает формирование более ярко выраженных границ области тепловыделения в загрузке. Обычно это свойство не очень важно, но в данном случае способствует повышению управляемости распределением плотности тока.

Геометрическая модель для решения электромагнитной задачи с прямоугольным индуктором представлена на рис. 1. Центр цилиндрической пустотелой заготовки имеет координаты $x = 0$; $y = 0$; $z = 0$. Для расчета принята заготовка с геометрическими размерами: внешний диаметр $D_2 = 0,422$ м; внутренний диаметр $D_1 = 0,125$ м; высота $h = 0,145$ м.

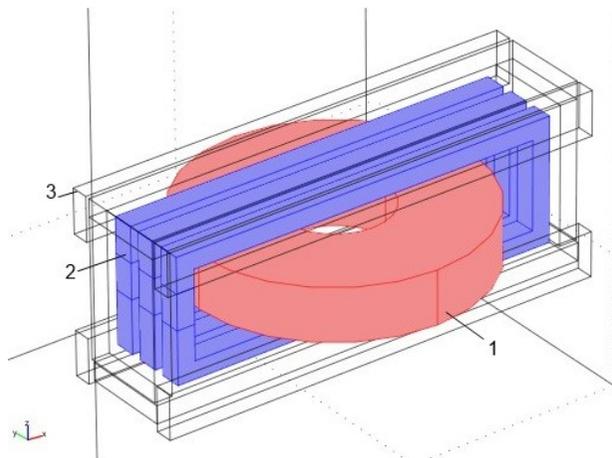


Рис. 1. Геометрическая модель индуктора с загрузкой: 1 – заготовка; 2 – проводники индуктора; 3 – пластины магнитопровода

Формулировка электромагнитной задачи

В терминах векторного магнитного потенциала задача индукционного нагрева формулируется следующим образом:

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma \{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0. \quad (1)$$

К основному уравнению Пуассона (1) добавляются граничные условия на различных участках границы:

$$\{\bar{A}\} = 0 \text{ на } S_1; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \{\bar{A}\}}{\partial n} = 0 \text{ на } S_2. \quad (3)$$

Выражение (2) задает значение магнитного потенциала на удаленной границе области. Выражение (3) описывает поведение функции на линии или поверхности, отражающей условия симметрии.

При моделировании в трехмерной области основное уравнение (1) принимает более сложный вид и записывается в виде системы уравнений:

$$\nabla \cdot (j\omega\sigma - \sigma\mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma\nabla V - \mathbf{J}^e) = 0; \quad (4)$$

$$(j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times \mathbf{A}) - \sigma\mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma\nabla V) = \mathbf{J}^e. \quad (5)$$

Здесь: σ – электропроводность; \mathbf{v} – вектор скорости движения; \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал; V – скалярный электрический потенциал; \mathbf{J}^e – вектор источников (плотность тока); μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_r – относительная магнитная проницаемость среды.

При моделировании электропроводность материала заготовки принята постоянной, так как в области высоких температур ее изменение незначительно. Магнитные свойства магнитопровода приняты также постоянными. Относительная магнитная проницаемость задана во всех элементах магнитопровода равной 1000.

Формулировка тепловой задачи

Определение температурных полей нагреваемого кольца сводится к решению уравнения теплопроводности с функцией распределения внутренних источников тепла, найденной в результате решения электромагнитной задачи.

Для решения тепловой задачи с учетом реальных режимов теплообмена с окружающей средой в качестве общей исходной модели температурного поля принято трехмерное нестационарное уравнение теплопроводности для полого цилиндра, формулируемое в декартовой системе координат:

$$\gamma C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \gamma C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + Q \quad (6)$$

с начальными $T(x, y, z, 0) = \text{const}$ и граничными условиями

$$\mathbf{v} \cdot (\lambda \nabla T) = \alpha [T - T_c] + \varepsilon \sigma [T^4 - T_c^4]. \quad (7)$$

Здесь: $T(r, x, z, \tau)$, T_0 – температурное распределение в металле заготовки и температура окружающей среды; $C_p(x, y, z, t)$, $\gamma(x, y, z, \tau)$, $\lambda(x, y, z, \tau)$ – соответственно удельные теплоемкость, теплопроводность и плотность металла; α , ε , σ – коэффициенты конвективного теплообмена, степень черноты и коэффициент излучения поверхности материала; Q – удельная мощность источников внутреннего тепловыделения; \mathbf{v} – вектор скорости движения кольцевой заготовки.

Теплообмен в системе, состоящей из заготовки, индуктора и футеровки, включает несколько видов: свободная конвекция между твердыми поверхностями и окружающей средой (внутреннее пространство открыто); теплообмен излучением между поверхностями элементов системы; теплообмен излучением между поверхностями и внешней средой.

Вращательное движение заготовки при численном моделировании в трехмерной области задается с помощью выражений для составляющих скорости по осям в плоскости $xу$:

$$v_x = \frac{vy}{\sqrt{x^2 + y^2}}; v_y = \frac{vx}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Здесь v – линейная скорость кругового движения боковой поверхности заготовки.

Совместное решение электромагнитной и тепловой задач в данных условиях является сложным, поэтому используется подход с отдельным решением. На стадии решения электромагнитной задачи определяются области внутри заготовки, где происходит выделение тепла. Для тепловой задачи на основании полученной информации выполняется построение подобластей с внутренними источниками тепла.

В качестве материала в расчетах принят сплав ШХ15. Теплотехнические свойства в модели задаются с помощью аппроксимирующих выражений линейного вида:

$$\lambda = \lambda_0(1 + \alpha_\lambda T); C = C_0(1 + \alpha_C T).$$

Температурные коэффициенты определены с учетом перехода к шкале температуры в Кельвинах.

Моделирование электромагнитных и тепловых процессов

Для принятых размеров трубки индуктора (ширина 15 мм, толщина 10 мм) задан ток 7500 А, что соответствует плотности тока 50 А/мм². Расчеты выполнены для частоты 50 Гц.

Конструкция индуктора содержит магнитопровод из пластин для уменьшения полей рассеяния, повышения коэффициента мощности и снижения электрических потерь в индукторе. Из результатов расчета варианта конструкции индуктора с прямоугольными витками и пластинами магнитопровода следует, что распределение мощности удовлетворяет требованиям задачи нагрева: обеспечивается эффективный нагрев плоской части поверхности заготовки и тем самым компенсируются тепловые потери.

При решении электромагнитной задачи для системы, состоящей из индуктора, загрузки и магнитопроводов, необходим учет металлических элементов опорной конструкции, на которой размещается нагреваемое изделие. Для снижения мощности тепловыделения в каркасе предусматривается его изготовление из немагнитной стали. Наличие кольцевых и радиальных элементов способствует замыканию токов и дополнительному подогреву. Вместе с тем потери мощности нельзя считать полностью бесполезными, так как происходит компенсация отвода тепла с нижней поверхности заготовки через теплоизоляцию. В расчетной модели данными компонентами пришлось пренебречь из-за стремления упростить задачу и ускорить вычислительный процесс.

Приведение во вращение опорной плиты предусмотрено с помощью роликов конической формы, которые расположены в четырех точках за пределами габаритов индуктора. Прямое воздействие сильного электромагнитного поля на вращающиеся ролики ослаблено. Однако нагрев роликов неизбежен. Более мощным источником тепла является контакт с металлическим кольцом плиты. Простым решением проблемы является водяное струйное охлаждение роликов. Такой способ предотвращает перегрев подшипников. Более сложное в реализации охла-

ждение с помощью спрейеров нежелательно из-за воздействия паров воды на керамическую теплоизоляцию индуктора.

На рис. 2, 3 приведены распределения объемной мощности в разных плоскостях заготовки и индуктора. На рис. 2 видно, что максимальное значение мощности на плоской торцевой поверхности наблюдается на небольшом удалении от внешней и внутренней боковых (цилиндрических) поверхностей. Плотность тока уменьшается при переходе с торцевой плоской поверхности на боковые цилиндрические. Мощность тепловыделения на угловых участках снижается. Происходит более плавное изменение направления тока, что приводит к уменьшению плотности мощности тепловыделения в области пересечения торцевой и боковой поверхностей. Одновременно с этим проявляется эффект замыкания тока на плоскости путем обтекания центрального отверстия. Ток протекает одновременно вдоль боковой поверхности отверстия и на торцевой поверхности.

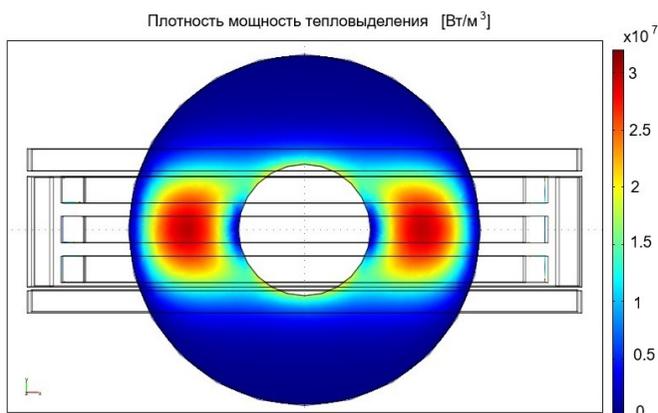


Рис. 2. Распределение плотности мощности тепловыделения на торцевой поверхности кольца

В плоскостях среза, параллельных торцевой поверхности заготовки, распределение плотности тока и мощности тепловыделения занимает более протяженный участок, вплоть до боковых поверхностей. Из-за того, что ток в области центрального отверстия разделяется на горизонтальную и вертикальную составляющие, плотность мощности меньше, чем на внешней поверхности.

На рис. 3 приведено распределение плотности мощности на продольном срезе кольца. Наблюдаются значительные участки с равномерным распределением плотности мощности. Это приводит к формированию неравномерного распределения температуры вдоль радиальной координаты. При моделировании тепловых процессов получен значительный перегрев области возле отверстия. Объясняется это тем, что одинаковое значение мощности в единичных прямоугольных областях кольца соответствует областям с разным радиусом и, соответственно, с разным объемом.

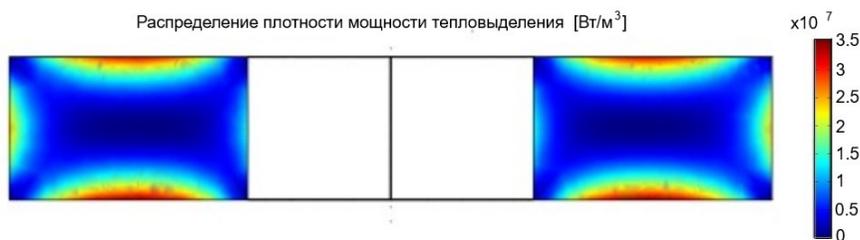


Рис. 3. Распределение плотности мощности тепловыделения в разрезе кольца ($y = 0$)

Проведенные исследования по использованию системы автоматического регулирования и программного управления с целью выравнивания распределения температуры в условиях частичной теплоизоляции показали невозможность получения допустимого отклонения температуры от заданного значения в объеме заготовки.

Для решения проблемы рассмотрена система управления пространственным распределением плотности тока и мощности в заготовке с помощью применения экранирующего магнитопровода между катушкой индуктора и заготовкой (рис. 4). Это позволит добиться более плавного распределения мощности по поверхности заготовки и предотвратит перегрев области возле отверстия в заготовке. В качестве материала для изготовления магнитопровода возможно применение электротехнической стали или феррита. Более удобным является вариант с ферритовыми пластинами, так как обеспечить поперечное расположение пластин в шихтованном магнитопроводе сложно в условиях изменения направления тока на угловых участках или из-за влияния геометрической формы загрузки; например, в области отверстия токи изменяют направление на 45 градусов, что приводит к наведению вихревых токов в пластинах магнитопровода.

Конструкция экранирующего магнитопровода имеет недостатки, связанные с увеличением толщины индуктора, что приводит к увеличению зазора между индуктором и загрузкой, а также с условиями работы магнитопровода в области высоких температур. В данной работе не рассмотрен комплекс вопросов, связанных с охлаждением магнитопровода. Проблемы одинаковы сложны как для феррита, так и для магнитопровода из шихтованного железа. Известны способы решения проблемы, заключающиеся в размещении слоя теплоизоляции между магнитопроводом и горячей поверхностью заготовки, а также усложнении конструкции магнитопровода за счет пропускания через него трубок с охлаждающей жидкостью. Такие технические решения, конечно, приводят к ухудшению энергетических характеристик индуктора. В данной работе остановились на принятой конструкции, так как требуются дополнительные исследования не только электромагнитных процессов, но и тепловых. В итоге предполагается размещение магнитопровода в одной плоскости с обмоткой, которая будет иметь более сложную форму. Проблему охлаждения магнитопровода перспективный вариант не устраняет.

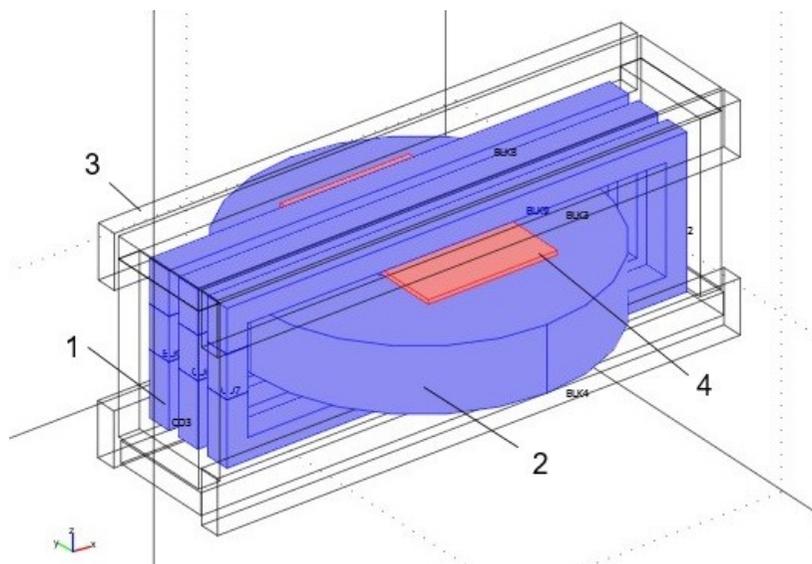


Рис. 4. Геометрическая модель индуктора с загрузкой: 1 – проводники индуктора; 2 – заготовка; 3 – пластины магнитопровода; 4 – пластина экранирующего магнитопровода

В результате проведенных расчетов получено приведенное на рис. 5 распределение плотности мощности на торцевой поверхности заготовки. Как видно из рисунка, область с мощностью тепловыделения смещена от отверстия в кольце. Аналогичные по виду распределения мощности наблюдаются по всей толщине кольца, подтверждая отсутствие тепловыделения во внутренних областях кольца, что свидетельствует о замыкании тока только по поверхности. Таким образом, выполнено одно из условий выравнивания распределения температуры во всем объеме заготовки – устранение зон с повышенным значением мощности тепловыделения.

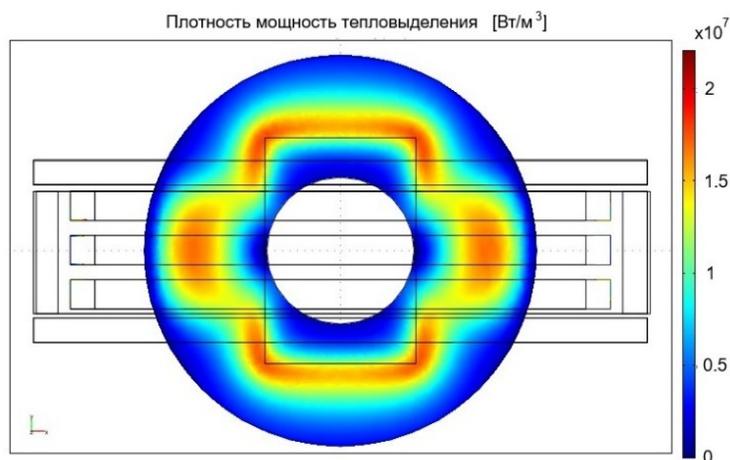


Рис. 5. Распределение плотности мощности тепловыделения на поверхности кольца

При заданном значении тока индуктора интегральное значение мощности тепловыделения в заготовке составляет 30 кВт. Распределение мощности тепловыделения, полученное в результате моделирования электромагнитных процессов, перенесено в модель тепловых процессов. Как отмечалось, при наличии сложных законов теплообмена (между поверхностями) и значительные нелинейности делают затруднительным применение связанных моделей. В рассматриваемой задаче одним из подобных факторов является движение нагреваемой заготовки. Поэтому использование сепаратной тепловой модели является более продуктивным и позволяет существенно снизить требования к вычислительным ресурсам. Для этого в геометрической модели сформированы дополнительные элементы, позволяющие на траектории протекания тока задать распределение плотности мощности тепловыделения в полном соответствии электромагнитной задаче.

В результате расчетов получены распределения температуры, показанные на рис. 6, 7.

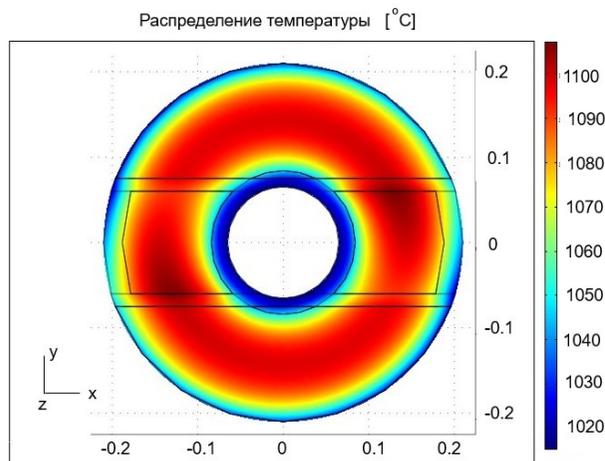


Рис. 6. Распределение температуры на поверхности заготовки, время нагрева 1300 с

Распределения температуры на торцевой поверхности и на плоскости, находящейся на расстоянии 65 мм от торцевой поверхности, имеют перепады температуры менее 100 градусов.

На рис. 8 показаны распределения температуры для продольных сечений кольцевой заготовки в плоскостях yz и xz , проходящих через ось вращения кольца. Распределения температуры для разных плоскостей отличаются незначительно. Это связано с тем, что на боковой поверхности заготовки область тепловыделения имеет форму вертикальной полосы, расположенной вблизи индуктора. Участки заготовки при ее вращении попадают в зону воздействия магнитного поля индуктора через отрезок времени, достаточный для поворота на определенный угол (около 90 градусов).

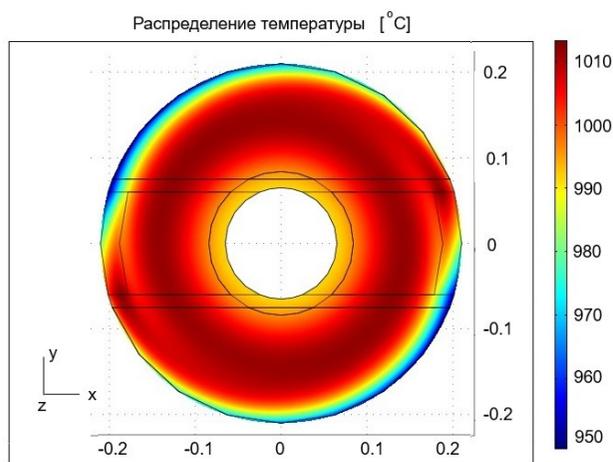


Рис. 7. Распределение температуры на расстоянии 0,065 м от торцевой поверхности кольца, время нагрева 1300 с

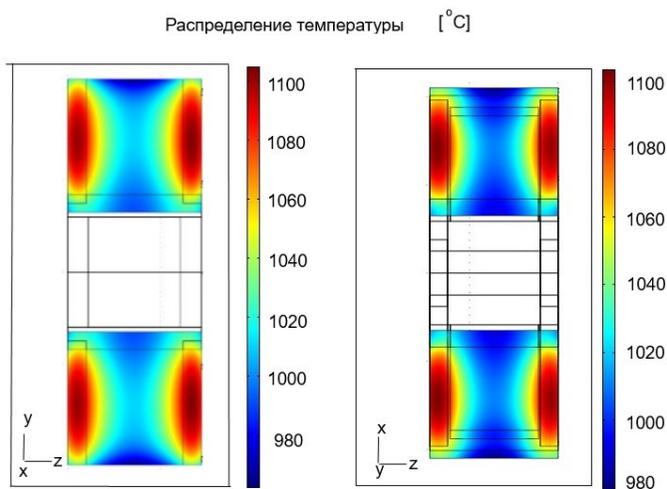


Рис. 8. Распределение температуры на плоскостях среза $(y,z,0)$ и $(x,z,0)$ при времени нагрева 1300 с

Приведенные на рис. 8 распределения температуры получены при неизменной во времени мощности тепловыделения. Использование системы регулирования температуры при контроле точки на боковой поверхности позволяет выровнять распределение до соответствия заданным требованиям. Полученное отклонение температуры в пределах всего объема кольца не превышает 5 %. Нужно учитывать, что достигнутый диапазон температур, равный 100 °С, в системе управления преобразуется в отклонение от среднего значения. При заданном значении температуры, равном 1050 °С, отклонение для распределения, представленного на рис. 8, составляет ± 50 °С.

Моделирование тепловых процессов показало возможность подогрева кольцевой заготовки до конечного значения температуры в течение 1500–1800 с при задании начального значения температуры от 0 до 900 градусов. При этом мощ-

ность в заготовке может быть увеличена до 60 кВт. Такой диапазон начальных значений температуры позволяет учесть снижение температуры заготовки на промежуточных операциях деформации и транспортировки, а также при сбоях в технологическом процессе.

Вместе с тем исходная задача при проектировании индуктора является более простой и предполагает подогрев заготовки от температуры 900 °С до 1100–1150 °С для завершения процесса прессования в более подходящих условиях. В результате коррекции времени, необходимого для подогрева кольца, остывшего до 900 °С, общее время сокращается более чем в три раза при мощности тепловыделения в заготовке 30 кВт и составляет 500 секунд.

Выполненные исследования показали возможность качественного нагрева холодной или остывшей кольцевой заготовки до заданного состояния. Такая ситуация может возникнуть при длительном перерыве в технологическом процессе. Повторный нагрев в газовой печи недопустим, так как потери металла из-за образования окалины и ее последующего удаления уменьшают вес заготовки ниже допустимого значения. Решение электромагнитной задачи при индукционном нагреве ферромагнитной заготовки становится более сложным из-за необходимости учета перехода через точку Кюри, но в целом алгоритм не изменяется.

Применение прямоугольного индуктора для нагрева кольцевой заготовки показало возможность управления распределением температуры в индукторе, не имеющем хорошей теплоизоляции. При нагреве стальных заготовок большого диаметра с соосным расположением заготовки и цилиндрического индуктора проблема выравнивания распределения температуры часто требует специальных мер, как, например, опускающихся теплоизоляционных затворов. В работе данная проблема решена более простым способом, не требующим дополнительных механизмов для перемещения массивных теплоизолирующих элементов.

Заключение

Разработана конструкция индукционной установки для подогрева вращающейся кольцевой заготовки. Использование прямоугольной катушки индуктора с внешним и внутренним магнитопроводами позволяет управлять пространственным распределением тока и мощности тепловыделения в заготовке. Показано, что предложенный вариант конструкции обеспечивает равномерное распределение температуры в кольцевой заготовке. Для уменьшения отклонения от заданного значения температуры целесообразно использование замкнутой системы регулирования температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Яковченко А.В., Пугач А.А., Снитко С.А., Ивлева Н.И.* Совершенствование технологии штамповки колесных заготовок // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 24. С. 69–75.
2. *Кушнарев А.В., Богатов А.А., Киричков А.А., Пузырев С.С.* Развитие технологии производства железнодорожных колес // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14, № 1. С. 59–68.
3. *Будников А.С., Деметрашвили И.С., Руденко Д.О.* Разработка рациональной схемы нагрева заготовки перед операцией прошивки // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2019. № 1 (28). С. 42–47.
4. *Безручко И.И.* Индукционный нагрев для объемной штамповки. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 127 с.

5. Данилушкин А.И., Князев С.В., Семенов С.И. Математическая модель индукционного нагрева цилиндрических заготовок перед раскаткой // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 10–1. С. 101–103.
6. Фрыгин И.В. Оптимальное управление процессом индукционного подогрева стальных колес перед раскаткой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Самара: СамГТУ, 2001. 22 с.
7. Антонюк В.Е., Никифорович С.О., Рудый В.В. Обоснование целесообразности повторного нагрева в автоматизированной линии для изготовления кольцевых заготовок // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 3 (56). С. 61–69.
8. Антонюк В.Е., Никифорович С.О., Рудый В.В. Особенности нагрева в условиях автоматизированной линии для изготовления кольцевых заготовок // Актуальные вопросы машиноведения. 2021. Т. 10. С. 321–325.
9. Базаров А.А., Колпаков Д.В., Штукатуров Н.Р., Будко С.И. Индуктор прямоугольной формы с магнитопроводом для нагрева массивных колец перед раскаткой // Общество. 2023. № 4–2 (31). С. 44–50.
10. Процев Ю.В. Расчет суммарных степеней деформации при многопереходной раскатке кольцевых заготовок // Производство проката. 2012. № 3. С. 25–27.
11. Сёмин П.В., Сёмин В.А., Лисунец Н.Л. Влияние частоты вращения заготовки и инструмента на процесс раскатки дисков в изотермических условиях // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 9. С. 42–44.
12. Пешкин К.С. Параметрическая оптимизация конструкции индукционной установки для зонного нагрева деталей перед операцией пластической деформации // Взаимодействие науки и практики в условиях инновационного развития общества: Сборник научных трудов. Смоленск: МНИЦ «Наукосфера», 2022. С. 46–53.
13. Валитов В.А., Мулюков Р.Р., Назаров А.А., Сухоруков Р.Ю., Утяшев Ф.З. Использование эффекта сверхпластичности для раскатки газотурбинных дисков из жаропрочных никелевых сплавов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 3. С. 51–56.
14. Маннанов Э.Р., Галунин С.А., Никаноров А.Н., Наке Б., Козулина Т.П. Разработка индукционных систем для нагрева дисков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 2. С. 23–31.
15. Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. Исследование нагрева вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном с использованием специальных индукторов и сильных постоянных магнитов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 2. С. 112–122.
16. Алиферов А.И., Жуловян В.В., Морев А.Э., Промзелев В.А. Нагрев немагнитных изделий цилиндрического и прямоугольного поперечного сечения в магнитном поле вращающихся постоянных магнитов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2018. № 4 (41). С. 30–43.
17. Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Саратулов Ф.Н. Компьютерное моделирование индукционного нагрева движущихся цилиндрических ферромагнитных заготовок // Индукционный нагрев. 2011. № 4 (18). С. 5–8.

Статья поступила в редакцию 25 мая 2024 г.

INDUCTION HEATING SYSTEM OF MASSIVE RINGS BEFORE ROLLING

*A.A. Bazarov, D.V. Kolpakov, N.R. Shtukaturov*¹

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, sward63rus@mail.ru, vip.ue98@mail.ru

Abstract. *The work examines an induction heating system for a large ring in a rectangular coil. The end surface of the workpiece is located horizontally. To form a uniform temperature distribution in the workpiece pushed into the inductor, a rotation mechanism is used. Conducted studies of the distribution of heat generation power and temperature in the workpiece showed the need to reduce the field strength in the hole area. A solution to the problem was found through the use of magnetic cores in the inductor design, displacing currents in the workpiece beyond areas prone to overheating. The obtained results of modeling electromagnetic and thermal fields in the workpiece confirm the correctness of the design solution.*

Keywords: *geometric model, rectangular inductor, volumetric power.*

REFERENCES

1. *Yakovchenko A.V., Pugach A.A., Snitko S.A., Ivleva N.I.* Sovershenstvovanie tekhnologii shtampovki kolesnyh zagotovok [Improving the technology of stamping wheel blanks] // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2012. № 24. Pp. 69–75. (In Russian).
2. *Kushnarev A.V., Bogatov A.A., Kirichkov A.A., Puzyrev S.S.* Razvitie tekhnologii proizvodstva zheleznodorozhnyh koles [Development of technology for the production of railway wheels] // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2016. V. 14, № 1. Pp. 59–68. (In Russian).
3. *Budnikov A.S., Demetrashvili I.S., Rudenko D.O.* Razrabotka racional'noj skhemy nagreva zagotovki pered operaciej proshivki [Development of a rational scheme for heating the workpiece before the firmware operation] // Modelirovanie i razvitie processov OMD. 2019. № 1 (28). Pp. 42–47. (In Russian).
4. *Bezruchko I.I.* Indukcionnyj nagrev dlya obemnoj shtampovki [Induction heating for volumetric stamping]. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1987. 127 p. (In Russian).
5. *Danilushkin A.I., Knyazev S.V., Semenov S.I.* Matematicheskaya model indukcionnogo nagreva cilindricheskikh zagotovok pered raskatkoj [Mathematical model of induction heating of cylindrical billets before rolling] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. Vol. 8. № 10–1. Pp. 101–103. (In Russian).
6. *Frygin I.V.* Optimalnoe upravlenie processom indukcionnogo podogreva stalnyh koles pered raskatkoj [Optimal control of the process of induction heating of steel wheels before rolling]: avtoreferat dis. kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.13.06. Samara: SamGTU, 2001. 22 p. (In Russian).
7. *Antonyuk V.E., Nikiforovich S.O., Rudyj V.V.* Obosnovanie celesoobraznosti povtornogo nagreva v avtomatizirovannoj linii dlya izgotovleniya kolcevnyh zagotovok [Justification of the feasibility of reheating in an automated line for the production of ring blanks] // Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov. 2021. № 3 (56). Pp. 61–69. (In Russian).
8. *Antonyuk V.E., Nikiforovich S.O., Rudyj V.V.* Osobennosti nagreva v usloviyah avtomatizirovannoj linii dlya izgotovleniya kolcevnyh zagotovok [Features of heating in an automated line



© The Author(s), 2024

¹ *Aleksandr A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Dmitry V. Kolpakov, Postgraduate Student.
Nikolay R. Shtukaturov, Postgraduate Student.*

- for the production of ring blanks] // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. 2021. Vol. 10. Pp. 321–325. (In Russian).
9. *Bazarov A.A., Kolpakov D.V., Shtukurov N.R., Budko S.I.* Induktor pryamougol'noj formy s magnitprovodom dlya nagreva massivnyh kolec pered raskatkoj [Rectangular inductor with a magnetic core for heating massive rings before rolling] // *Obshchestvo*. 2023. № 4–2 (31). Pp. 44–50. (In Russian).
 10. *Procviv Yu.V.* Raschet summarnykh stepeney deformacii pri mnogoperekhodnoj raskatke kol'cevyyh zagotovok [Calculation of the total degrees of deformation during multi-transition rolling of ring blanks] // *Proizvodstvo prokata*. 2012. № 3. Pp. 25–27. (In Russian).
 11. *Syomin P.V., Syomin V.A., Lisunec N.L.* Vliyanie chastoty vrashcheniya zagotovki i instrumenta na process raskatki diskov v izotermicheskikh usloviyah [The influence of the rotation speed of the workpiece and the tool on the process of rolling disks under isothermal conditions] // *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2007. № 9. Pp. 42–44. (In Russian).
 12. *Peshkin K.S.* Parametricheskaya optimizaciya konstrukcii indukcionnoj ustanovki dlya zonnogo nagreva detalej pered operacij plasticheskoj deformacii [Parametric optimization of the design of an induction installation for zone heating of parts before plastic deformation] // *Vzaimodejstvie nauki i praktiki v usloviyah innovacionnogo razvitiya obshchestva. Sbornik nauchnykh trudov*. Smolensk: MNIC «Naukosfera», 2022. Pp. 46–53. (In Russian).
 13. *Valitov V.A., Mulyukov R.R., Nazarov A.A., Suhorukov R.Yu., Utyashev F.Z.* Ispolzovanie efekta sverhplastichnosti dlya raskatki gazoturbinykh diskov iz zharoprochnykh nikelevykh splavov [Using the superplasticity effect for rolling out gas turbine disks from heat-resistant nickel alloys] // *Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii*. 2013. № 3. Pp. 51–56. (In Russian).
 14. *Mannanov E.R., Galunin S.A., Nikanorov A.N., Nake B., Kozulina T.P.* Razrabotka indukcionnykh sistem dlya nagreva diskov [Development of induction systems for heating disks] // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2019. V Vol. 12. № 2. Pp. 23–31. (In Russian).
 15. *Lepeshkin A.R., Il'inskaya O.I., Kuvaldin A.B., Lepeshkin S.A.* Issledovanie nagreva vrashchayushchih diskov turbin v elektromagnitnom pole, sozdannom s ispolzovaniem specialnykh induktorov i silnykh postoyannykh magnitov [Study of heating of rotating turbine disks in an electromagnetic field created using special inductors and strong permanent magnets] // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2020. № 2. Pp. 112–122. (In Russian).
 16. *Aliferov A.I., Zhulovyan V.V., Morev A.E., Promzelev V.A.* Nagrev nemagnitnykh izdelij cilindricheskogo i pryamougol'nogo poperechnogo secheniya v magnitnom pole vrashchayushchih postoyannykh magnitov [Heating of non-magnetic products of cylindrical and rectangular cross-section in the magnetic field of rotating permanent magnets] // *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii*. 2018. № 4 (41). Pp. 30–43. (In Russian).
 17. *Praht V.A., Dmitrievskij V.A., Sarapulov F.N.* Kompyuternoe modelirovanie indukcionnogo nagreva dvizhushchih cilindricheskikh ferromagnitnykh zagotovok [Computer modeling of induction heating of moving cylindrical ferromagnetic workpieces] // *Indukcionnyj nagrev*. 2011. № 4 (18). Pp. 5–8. (In Russian).

Original article submitted 25.05.2024