

## ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.365

### ИНДУКТОР ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ С МАГНИТОПРОВОДОМ ДЛЯ НАГРЕВА МАССИВНЫХ КОЛЕЦ ПЕРЕД РАСКАТКОЙ

**БАЗАРОВ Александр Александрович**  
доктор технических наук, доцент, профессор  
**КОЛПАКОВ Дмитрий Викторович**  
аспирант

**ШТУКАТУРОВ Николай Романович**  
аспирант

**БУДКО Степан Игоревич**  
аспирант

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
г. Самара, Россия

*В данной статье рассматривается система индукционного нагрева массивных колец перед раскаткой, в конструкции которых используется магнитопровод. В процессе производства колец подшипников, колес железнодорожных вагонов используется раскатка. Индукционный нагрев заготовок позволяет обеспечить равномерный и быстрый нагрев, что улучшает качество продукции и повышает эффективность процесса. Использование процесса многоэтапного формообразования приводит к увеличению длительности не только процедур деформации, но и транспортировки между устройствами. В результате, перед финишной операцией раскатки температура недостаточна для обеспечения требуемого качества и предотвращения появления трещин в заготовке. Индукционная система выполняет функцию подогревателя, который встраивается в технологическую линию. Особенностью конструкции является использование индуктора прямоугольной формы, внутри которого размещается цилиндрическая заготовка, приводимая во вращение электроприводом. Рассматриваются вопросы разработки конструкции индуктора и алгоритма работы системы нагрева, обсуждаются преимущества использования магнитопроводов, такие как уменьшение потерь энергии, увеличение эффективности нагрева и возможность регулирования температуры в процессе нагрева. В статье представлены результаты численных экспериментов, подтверждающие эффективность предложенной системы индукционного нагрева.*

**Ключевые слова:** геометрическая модель, прямоугольный индуктор, объемная мощность, стержни магнитопроводов.

**Введение.** В современном мире технологии и инновации играют ключевую роль в развитии многих отраслей промышленности, в том числе и в металлургической. Одним из перспективных направлений является использование систем индукционного нагрева для обработки металлических изделий. Особенно актуальным является применение таких систем для нагрева массивных металлических колец перед процессом раскатки. Использо-

вание магнитопроводов в индукционном нагреве позволяет существенно повысить эффективность процесса нагрева, уменьшить потери энергии и обеспечить равномерный прогрев обрабатываемого объекта.

Данная статья посвящена разработке и исследованию системы индукционного нагрева металлических колец перед раскаткой с применением магнитопроводов. В статье рассматриваются особенности применения ин-

дукционного нагрева с использованием магнитопроводов для повышения эффективности нагрева.

Система нагрева должна обеспечить подогрев заготовки с начальной температуры 950 градусов до конечного значения 1260 градусов, чтобы процесс пластической деформации был выполнен без осложнений. В указанном диапазоне температур магнитные и тепловые свойства стали практически не изменяются [7].

Проектирование индукционного нагревателя для массивных колец требует учета различных особенностей технологического процесса [1; 2]. 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. Поэтому в качестве конструкции предлагается прямоугольная катушка индуктора, в которую заготовка помещается путем заталкивания по направляющим (рисунок 1). Для формирования равномерного распределения температурного поля предусматривается вращение кольцевой заготовки. Для расчета параметров индукто-

ра необходимо использование численного метода. Кроме того, важно учитывать различные краевые эффекты, возникающие в отдельных областях загрузки [6].

В качестве инструмента выбран программный комплекс Comsol, который построен на основе метода конечных элементов.

Геометрическая модель для решения электромагнитной задачи с прямоугольным индуктором с использованием магнитопровода представлена на рисунке 1. Центр цилиндра имеет координаты  $x=0$ ;  $y=0$ ;  $z=0$ .

Для расчета индуктора требуется использование трехмерной модели электромагнитной задачи, содержащей цилиндрическую заготовку, индуктор с прямоугольными витками и с пластинами магнитопровода, расположенными со всех сторон относительно катушки индуктора за исключением стороны, обращенной к загрузке.

Для расчета принята заготовка с геометрическими размерами:

внутренний диаметр  $D_1=0,125$  м;

внешний диаметр  $D_2=0,422$  м;

высота  $h=0,145$  м.

Электропроводность стали принята равной  $\sigma = 10000000$  См/м; магнитная проницаемость магнитопровода  $\mu = 1000$ . В расчетах использовано напряжение частотой 50 Гц.

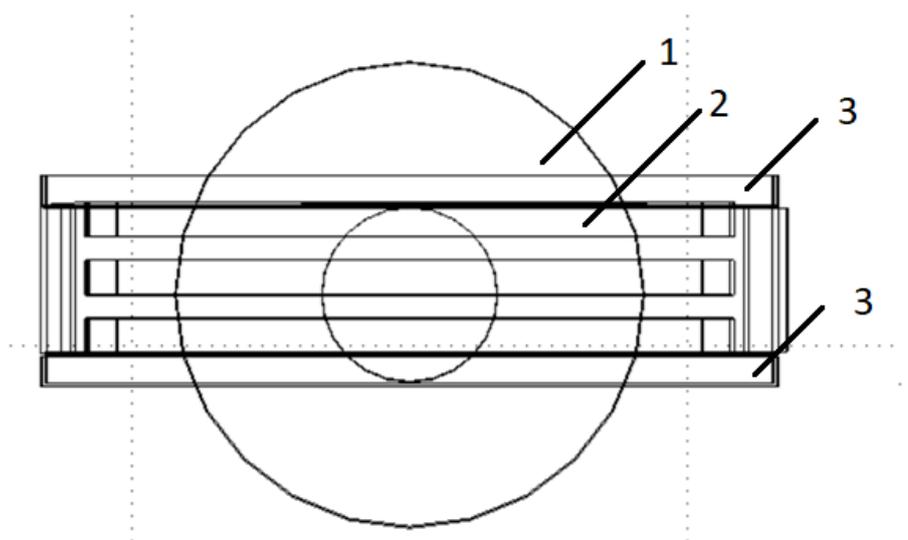


Рисунок 1. Геометрическая модель для расчета электромагнитной задачи с прямоугольным индуктором со стержнями магнитопровода: 1 – нагреваемое кольцо; 2 – витки индуктора; 3 – магнитопровод

Трехмерная компьютерная модель в программе Comsol для расчета электромагнитных источников с прямоугольным индуктором и магнитопроводом представлена на рисунок 2.

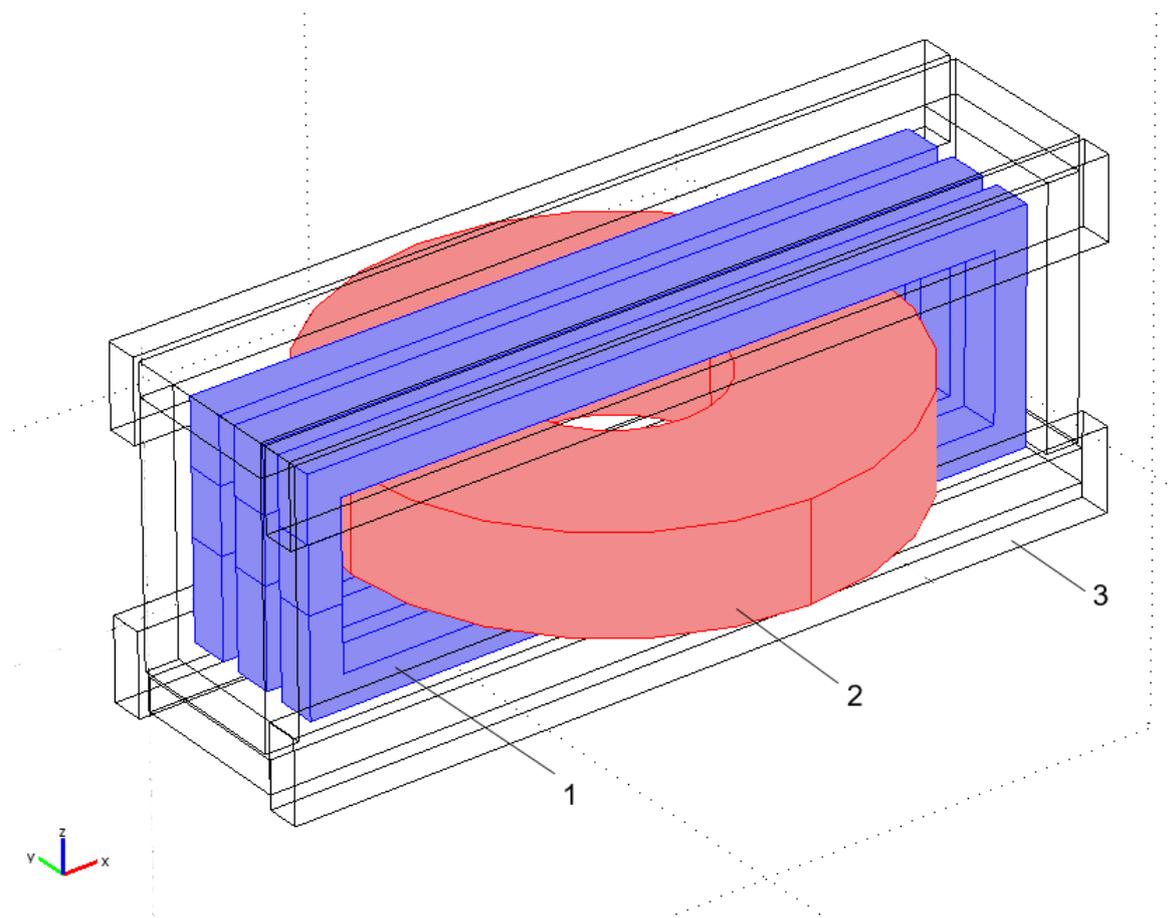


Рисунок 2. 3D модель для расчета электромагнитных источников с прямоугольным индуктором: 1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – магнитопровод

Задача индукционного нагрева для трехмерной модели, содержащей магнитные материалы формулируется следующим образом

$$-\nabla \cdot (j\omega\sigma\mathbf{A} - \sigma\mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma\nabla V - \mathbf{J}^e) = 0 \quad (1)$$

$$j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\nabla \times \mathbf{A}) - \sigma\mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \sigma\nabla V = \mathbf{J}^e. \quad (2)$$

Граничные условия содержат два соотношения, задающие равенство постоянной величине (в данном случае ноль) векторного магнитного потенциала и равенство нулю скалярного электрического потенциала.

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{n} \times \mathbf{A}_0, \quad V=0 \quad (3)$$

Здесь:  $\sigma$  – электропроводность;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости;  $\mathbf{A}$  – векторный магнитный потенциал;  $V$  – скалярный электрический потенциал;  $\mathbf{J}$  – вектор плотности тока;  $\mu_0, \mu_r$  – магнитная

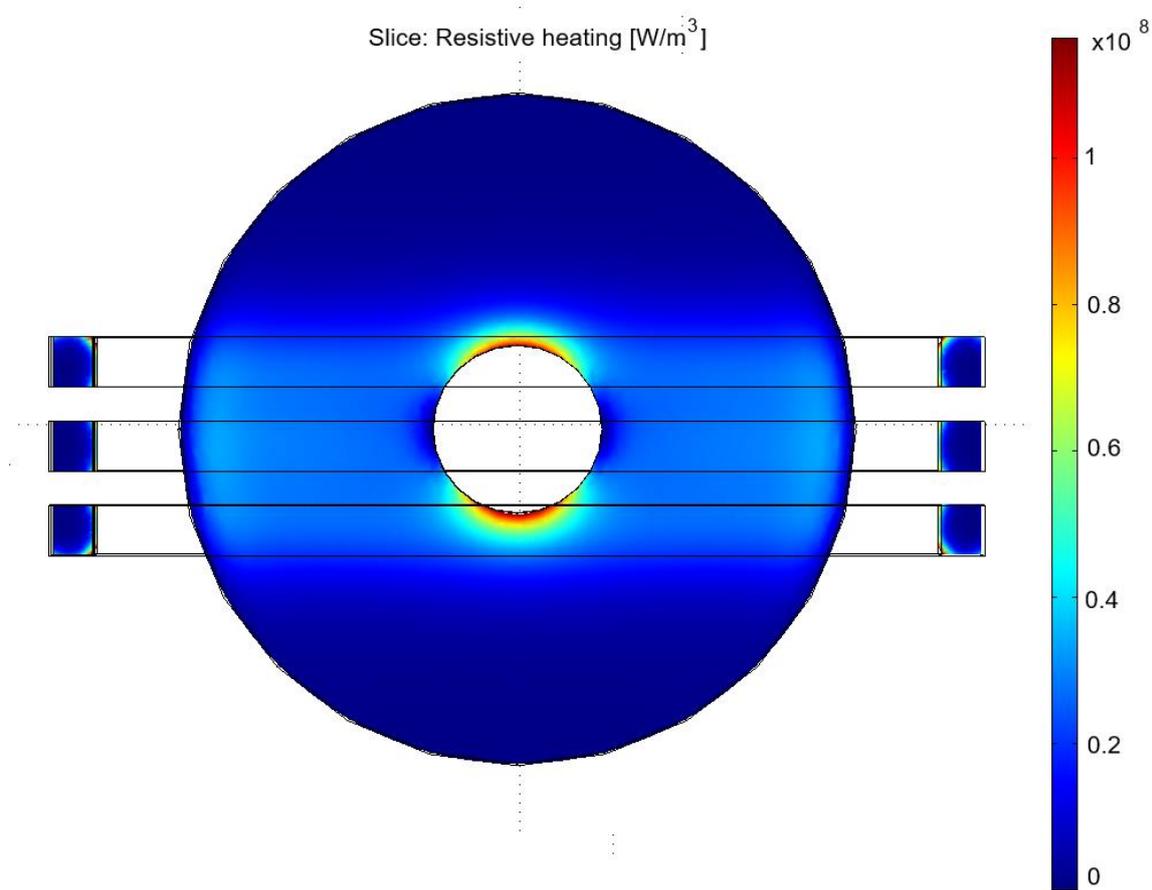
проницаемость вакуума и относительная магнитная проницаемость материала.

В данной задаче выражение (2) содержит магнитный материал. Однако, для упрощения вычислительного процесса величина магнитной проницаемости принята постоянной, что не отражается на распределении плотности тока в загрузке, которая имеет температуру выше точки Кюри.

Результаты моделирования электромагнит-

ных процессов в установке, содержащей индуктор с магнитопроводом, приведены ниже. На рисунке 3 приведена картина распределения объемной мощности в плоскости среза загрузки и индуктора. В области, прилегающей к от-

верстии в заготовке, наблюдается увеличение удельной мощности. Одной из причин этого является то, что ширина индуктора имеет близкое значение к диаметру отверстия и край витка расположен над отверстием.



**Рисунок 3. Распределение удельной мощности в плоскости среза, параллельной торцевой поверхности загрузки ( $z=0$ )**

На рисунке 4 показано распределение плотности мощности тепловыделения в поверхностном слое загрузки. Для этого использован срез в плоскости  $z=0$  проходящей

через точку  $x=0$ . На распределении удельной мощности наблюдается яркая полоса в поверхностном слое вдоль радиальной координаты.

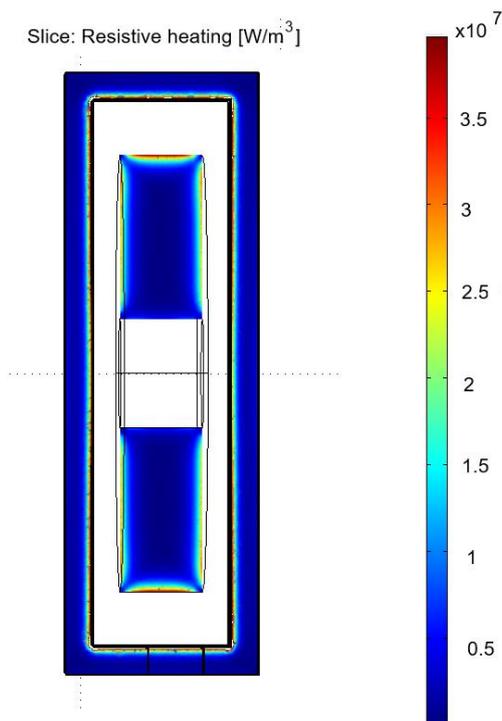


Рисунок 4. Распределение удельной мощности в плоскости среза загрузки и индуктора ( $x=0$ )

Более подробная информация о распределении удельной мощности в разных участках представлена в виде диаграмм на рисунках 5,6.

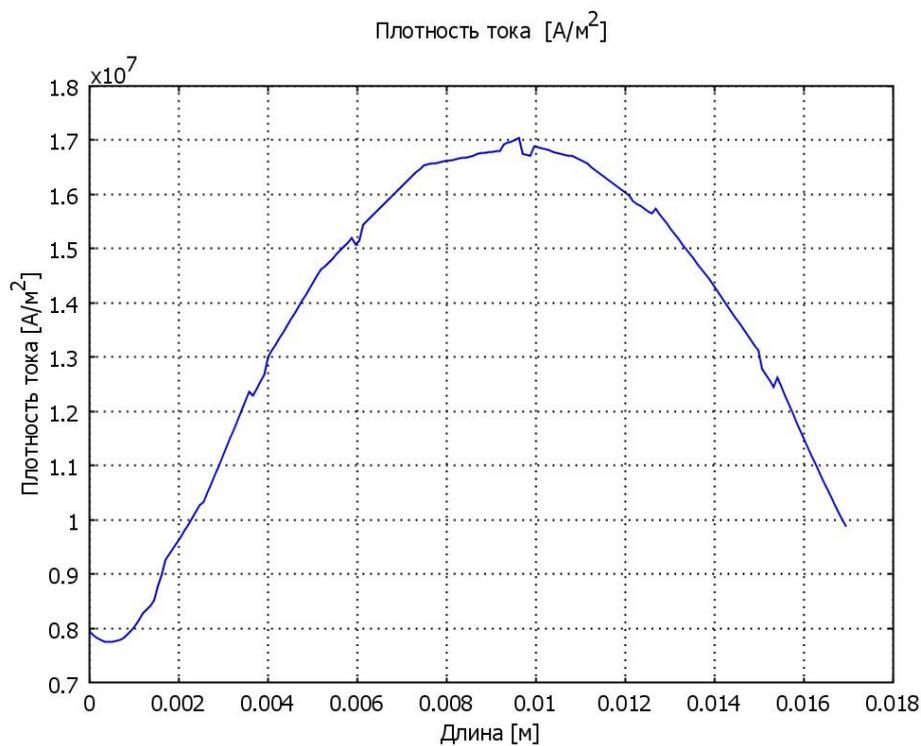


Рисунок 5. Зависимость плотности тока на внутренней поверхности кольца вдоль осевой координаты  $z$  при  $x=0,0625$  м,  $y=0$

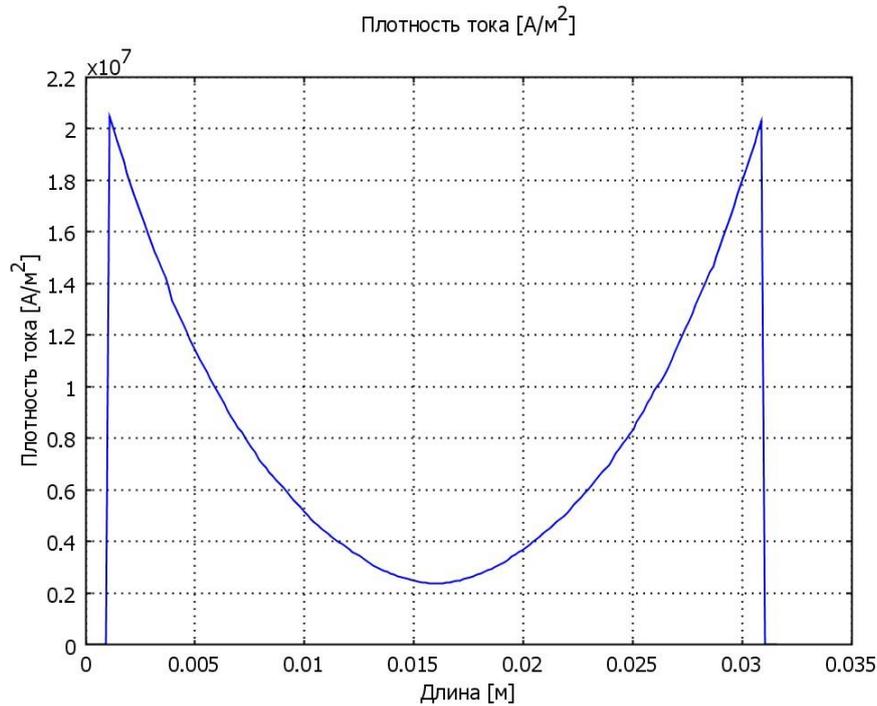


Рисунок 5. Зависимость плотности тока на внутренней поверхности кольца вдоль осевой координаты z при x=0,221 м, y=0

Из рисунка 4 видно, что увеличение удельной мощности тепловыделения сосредоточено только на торцевой поверхности и не распространяется на внутреннюю цилиндрическую поверхность.

Из диаграмм на рисунках 5, 6 видно, что мощность тепловыделения на внутренней

цилиндрической поверхности кольца немного меньше.

Для оценки влияния магнитопровода на параметры индуктора были выполнены дополнительные расчеты для конструкции, не содержащей магнитопровод. Для сравнения результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

**ПАРАМЕТРЫ ИНДУКТОРА БЕЗ МАГНИТОПРОВОДА И С МАГНИТОПРОВОДОМ**

$I_{инд}$ , кА	U, В	$P_{заг}$ , кВт	$\Delta P_{инд}$ , кВт	$P_{инд}$ , кВт	$S_{инд}$ , кВА	КПД, %	$\cos \varphi$
45	38	78	133	211	1710	0,369	0,123
45	60	145	217	362	2700	0,4	0,134

Несмотря на то, что конструкция индуктора не позволяет добиться высоких энергетических характеристик, получено некоторое улучшение параметров, среди которых и повышение напряжения, что важно при согласовании с источником питания. Увеличение числа витков позволит использовать стандартное напряжение без согласующего устройства.

Заключение. В данной статье была предложена и исследована система индукционного нагрева массивных колец перед раскаткой с использованием магнитопроводов. Показано, что данный вид конструкции обеспечивает заданное распределение удельной мощности и достижение единичной мощности индуктора. При задании предельной плотности

тока, равной  $150 \text{ A/mm}^2$ , для обоих вариантов индуктора, применение магнитопровода позволило увеличить мощность тепловыделения в загрузке почти в два раза. Для даль-

нейшего улучшения согласования индуктора с источником питания целесообразно увеличить число витков при одновременном снижении зазора между витками.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безручко И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 127 с.
2. Демидович В.Б., Растворова И.И. Моделирование индукционного нагрева легких сплавов перед обработкой давлением. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 158 с.
3. Крючков О.Б., Маленко П.И., Саранин Л.Г., Болдырев А.Е. Выбор рационального режима нагрева крупных холодных слитков под обработку металлов давлением с использованием компьютерного моделирования // Черные металлы. – 2023. – № 6. – С. 17-24.
4. Крючков О.Б., Маленко П.И., Саранин Л.Г., Болдырев А.Е. Экспериментально-расчетное исследование температурного поля в нагреваемом под пластическую деформацию блюме с использованием физического моделирования // Черные металлы. – 2023. – № 10. – С. 78-84.
5. Перевалов Ю.Ю., Демидович О.В. Цифровизация технологий индукционного нагрева титановых заготовок перед пластической обработкой // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 4(33). – С. 5-12.
6. Прахт В.А., Саранулов Ф.Н., Дмитриевский В.А., Гоман В.В. Компьютерное моделирование установки индукционного нагрева цилиндрических заготовок // Дистанционное и виртуальное обучение. – № 9. – 2009. – С. 17-21.
7. Фрыгин И.В. Оптимальное управление процессом индукционного подогрева стальных колес перед раскаткой: автореферат дис. ... к.т.н. – Самара, 2001. – 22 с.

## RECTANGULAR SHAPE INDUCTOR WITH MAGNETIC CORE FOR HEATING MASSIVE RINGS BEFORE ROLLING

**BAZAROV Alexander Alexandrovich**

Doctor of Sciences in Technology, Associate Professor, Professor

**KOLPAKOV Dmitry Viktorovich**

Postgraduate Student

**SHTUKATUROV Nikolay Romanovich**

Postgraduate Student

**BUDKO Stepan Igorevich**

Postgraduate Student

Samara State Technical University

Samara, Russia

*This article discusses a system for induction heating of massive rings before rolling, the design of which uses a magnetic core. In the production process of bearing rings and wheels of railway cars, rolling is used. Induction heating of workpieces allows for uniform and rapid heating, which improves product quality and increases process efficiency. The use of a multi-stage forming process leads to an increase in the duration of not only deformation procedures, but also transportation between devices. As a result, before the final rolling operation the temperature is insufficient to ensure the required quality and prevent cracks in the workpiece. The induction system performs the function of a heater, which is built into the production line. A special feature of the design is the use of a rectangular inductor, inside of which a cylindrical workpiece is placed, driven into rotation by an electric drive. The issues of developing the design of the inductor and the operating algorithm of the heating system are considered, the advantages of using magnetic cores are discussed, such as reducing energy losses, increasing heating efficiency and the ability to regulate temperature during the heating process. The article presents the results of numerical experiments confirming the effectiveness of the proposed induction heating system.*

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