

УДК 621.365, 621.78

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Елена Евгеньевна Готовкина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Россия, Иваново, e-mail: elengotovkina@yandex.ru

Разработка конструкции индуктора для закалки детали сложной формы

Авторское резюме

Состояние вопроса. В связи с активным процессом импортозамещения, отечественная промышленность переходит на производство деталей, ранее закупаемых за рубежом, которые необходимы для стабильной и надежной работы различных технических объектов и систем. В связи с этим становится актуальным разработка технологической установки по закалке металлического профиля. Задача осложняется тем, что профиль имеет очень тонкие стенки неровной формы, которые должны закаляться только с внутренней стороны, в то время как наружная стенка профиля для сохранения прочности должна греться минимально.

Материалы и методы. Исследования выполнены на имитационных моделях электромагнитных и тепловых полей, позволяющих воспроизводить процесс индукционного нагрева объекта исследований. В связи с тем что деталь имеет одинаковую форму по всей длине, моделирование процесса ее индукционного нагрева выполнено в двухмерном пространстве.

Результаты. Предложена имитационная модель процесса индукционного нагрева детали нестандартной формы, которая включает расчеты тепловых и электромагнитных полей. Предложена конструкция индуктора, дополненная ферритовыми вставками, позволяющая достигать необходимого для процесса закалки температурного режима.

Выводы. Разработанная имитационная модель позволяет оценивать распределение теплового и электромагнитного полей детали, тем самым прогнозировать достижение нужных для её закалки температур при использовании различных конструкций индукторов. Результаты численных экспериментов согласуются с физическими представлениями об индукционном нагреве и доказывают возможность использования индукционной закалки для тонкостенных деталей сложной формы вместо применяемой для такого типа деталей лазерной закалки. Предложенная модель может быть использована в инженерной практике проектирования индукторов деталей нестандартной формы.

Ключевые слова: индукционная установка, индуктор, закалка стали, имитационная модель с распределенными параметрами, электромагнитные поля, тепловые поля

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Elena Evgenievna Gotovkina

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnology Department, Russia, Ivanovo, e-mail: elengotovkina@yandex.ru

Development of design of an inductor for hardening a part of a complex shape

Abstract

Background. Due to active process of import substitution, domestic industry starts producing the parts previously purchased abroad. These parts are necessary for stable and reliable operation of various technical objects and systems. Thus, the development of a technological installation for hardening a metal profile is topical. The task is complicated by the fact that the profile has very thin irregularly shaped walls, which should be hardened only from the inside, while the outer wall of the profile should be heated minimally to maintain strength.

Materials and methods. The studies have been carried out on simulation models of electromagnetic and thermal fields, which make it possible to reproduce the process of induction heating of the research object. Since the part has the same shape along the entire length, the simulation of the process of its induction heating is performed in two-dimensional space.

Results. The authors have developed a simulation model of the process of induction heating of a part of a non-standard shape, which includes calculations of thermal and electromagnetic fields. The design of the inductor is proposed, supplemented with ferrite inserts, which makes it possible to achieve the temperature regime necessary for the hardening process.

Conclusions. The developed simulation model makes it possible to evaluate the distribution of the thermal and electromagnetic fields of the part, thereby predicting getting the temperatures required for its hardening when using various designs of inductors. The results of numerical experiments are consistent with the physical concepts of induction heating and prove the possibility to use induction hardening for thin-walled parts of complex shape instead of laser hardening used for this type of parts. The proposed model can be used in engineering practice to design inductors of non-standard parts.

Key words: induction-heating installation, inductor, steel hardening, distributed parameter simulation model, electromagnetic fields, thermal fields

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.016-024

Введение. Упрочнение металлов и сплавов является важным мероприятием, обеспечивающим надежную работу машиностроительной отрасли. Термическая обработка металлов является одной из составных частей большого комплекса по производству всевозможных деталей машин, станков, различных инструментов. Существуют различные методы упрочнения стали:

- термомеханическая обработка, которая, в свою очередь, делится на высокотемпературную и низкотемпературную;

- поверхностное упрочнение стальных деталей, которое подразделяется на газоплазменную закалку и электротермическую закалку с нагревом изделий токами высокой частоты (ТВЧ), называемую также индукционным нагревом.

Наиболее прогрессивным является индукционный нагрев, который обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами закалики стали [1–5]:

- высокой производительностью в связи с отсутствием затрат на прогрев установки и ее охлаждение;

- высокой скоростью нагрева, позволяющей сэкономить большое количество времени, повышая продуктивность не только самой установки, но и предприятия в целом;

- возможностью организации прямонаправленного нагрева, благодаря чему происходит равномерное распределение тепла по изделию, что способствует формированию металла более высокого качества;

- отсутствием вредных выбросов (экологически чистая установка);

- возможностью проведения широкого спектра тепловой обработки практически любых материалов, деталей и поверхностей;

- возможностью полной автоматизации процесса;

- возможностью закалики отдельных участков детали;

- экономией производственных ресурсов и снижением себестоимости изделия, поскольку для нагрева потребляется сравнительно меньшее количество энергии.

Наиболее часто индукционной закалке подвергаются детали достаточно больших размеров, которые имеют одинаковое сечение по всей длине заготовки. При такой постановке задачи методика разработки конструкции индуктора известна и достаточно хорошо проработана [3].

Однако в связи с научно-техническим прогрессом метод высокочастотного индукционного нагрева с учетом описанных выше достоинств находит применение для решения сложных нестандартных задач.

В условиях растущего импортозамещения возникла задача производства деталей и элементов, которые ранее поставлялись из-за рубежа, но попали под санкции. Одним из таких элементов является стальной профиль (рис. 1).

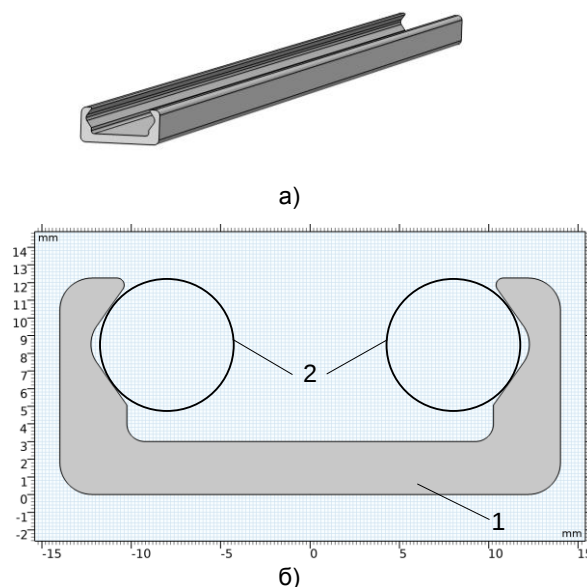


Рис. 1. Макет детали: а – изображение в трехмерном пространстве; б – разрез; 1 – металлический профиль; 2 – мнимые окружности

Важным эксплуатационным требованием к профилю является износостойкость его внутренних стенок, прилегающих к мнимым окружностям 2. Данное требование возможно обеспечить путем выполнения закалики. Закаленный металл подвергается мартенситному превращению.

щению, за счет чего повышается как его твердость, так и его хрупкость. Повышенная хрупкость недопустима, так как может приводить к поломке как при монтаже изделия, так и во время эксплуатации. В целях недопущения повышенной хрупкости металла закалке должны подвергаться только поверхностные слои металла в местах, где необходимо обеспечить его износостойкость, повышая твердость. Соответственно, в процессе закалки остальные зоны профиля не должны прогреваться до температуры закалки. Рассматриваемый нами закаливаемый профиль имеет малые размеры (<30 мм в ширину с толщиной стенок 3–5 мм), что значительно усложняет выполнение поставленных условий.

Таким образом, актуальной является задача разработки и подбора оптимальных параметров индукционной установки, позволяющей выполнить процедуры упрочнения представленной выше детали.

Индукционная установка. Индукционная закалочная установка является сложной технической системой, включающей в себя: заготовку (деталь), на которую направлено воздействие; технологию проведения данного воздействия (систему контроля и управления); оборудование, с помощью которого осуществляется воздействие: индуктор, источник питания, систему закалочного охлаждения, систему механизации (рис. 2).

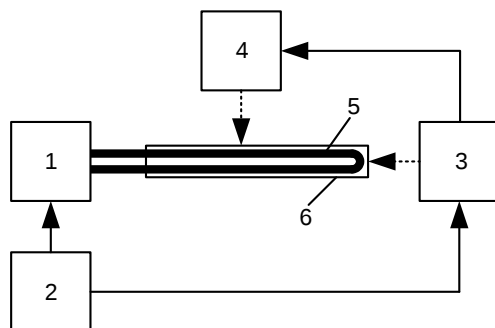


Рис. 2. Структурная схема индукционного оборудования для термической обработки: 1 – источник питания; 2 – система контроля и управления; 3 – система закалочного охлаждения; 4 – система механизации; 5 – индуктор; 6 – нагреваемый элемент

Обрабатываемый профиль изготовлен из нелегированной специальной конструкционной качественной углеродистой стали, закалка которой происходит при нагреве поверхности в диапазоне температур 805–850 °C² с последующим охлаждением водой. Как уже было отмечено выше, организация процесса закалки затрудняется сложной формой профиля детали, а

также условием нагрева только тех поверхностей изделия, которые подвергаются повышенному износу. Для достижения указанных условий необходимо правильно разработать конструкцию индуктора, а также подобрать остальные блоки системы.

Воздействие на деталь осуществляется наведенными токами, создаваемыми индуктором, подключенным к источнику питания. В настоящее время в качестве источников питания индукционных установок применяют три различных типа преобразователей частоты: ламповые, машинные, полупроводниковые. Основной их задачей является преобразование одно- и трехфазного тока промышленной частоты и напряжения в однофазный с заданными параметрами (частота, напряжение). Диапазоны генерируемых частот различных типов генераторов представлены в табл. 1. Для поверхностной закалки тонких поверхностей с глубиной закаленного слоя от 0,8 до 1,2 мм применяются высокочастотные и сверхвысокочастотные индукционные установки [1]. Величина генерируемых токов закалки ограничивается предельной мощностью установки и режимом работы. В связи с этим основными требованиями при выборе источника питания являются:

- подбор прибора по необходимой мощности и частоте;
- наличие системы контроля и управления выходных параметров, а также самодиагностики с возможностью подстройки и наладки;
- высокий КПД преобразования электроэнергии.

Таблица 1. Диапазоны частот различных генераторов

Тип генератора	Диапазон генерируемых частот, Гц
Машинный	500–10 000
Полупроводниковый	4 000–66 000
Ламповый	до 10 000 000

После нагрева поверхности, согласно технологии процесса закалки, ее следует охладить в воде. Основным требованием системы закалочного охлаждения является обеспечение бесперебойной подачи охлаждающей воды с постоянными параметрами в течение всего процесса индукционной закалки: температурой, расходом, скоростью подачи.

Закаливаемая деталь в данной индукционной установке перемещается вдоль индуктора со скоростью, необходимой и достаточной для качественного процесса закалки. Система механизации должна обеспечивать фиксацию профиля, а также поддерживать постоянную скорость перемещения.

Корректная работа описанных выше блоков, регулирование электромагнитного воздействия, обеспечивается системой кон-

² ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия.

троля и управления. Для высокочастотной индукционной закалки, при которой процессы протекают за считанные секунды, наиболее подходящей является система управления по отклонению [6]: задаются контролируемые величины (мощность нагрева, параметры охлаждения), эти параметры сравниваются с допустимыми интервалами, подается управляющий сигнал, после завершения процесса закалки при тестовых испытаниях деталь признается пригодной или браком (рис. 3).

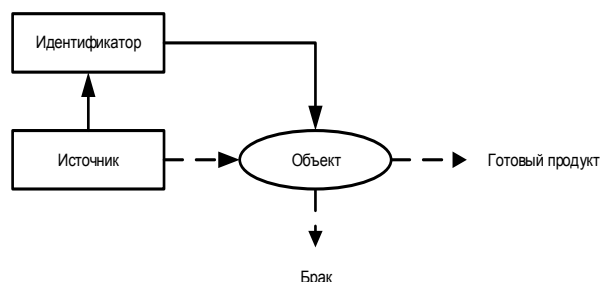


Рис. 3. Схема системы контроля и управления процессом индукционной закалки при длительности цикла одного действия менее 1 минуты

Таким образом, для решения задачи по закалке требуемых поверхностей рассматриваемого профиля (рис. 1) необходимо разработать конструкцию индуктора, позволяющую нагревать только требуемые радиусные участки, оставляя при этом незакаленными наружные поверхности детали; подобрать технологические параметры источника питания; разработать систему управления частоты и мощности для обеспечения его корректной работы. Системы механизации и охлаждения являются стандартными, хорошо изученными, но требующими не менее тщательной проработки в целях уменьшения или исключения низкой твердости или перегрева поверхностей. Проработка всего технологического процесса закалки позволит найти оптимальный экономичный режим работы, свести к минимуму появление брака при закалке: образование закалочных трещин; деформацию и коробление; обезуглероживание и окисление; изменение размеров; появление мягких пятен.

Имитационная модель процесса индукционного нагрева. Процесс индукционной закалки известен уже более 100 лет. За это время были выведены аналитические формулы для расчета индукторов [7], однако воспользоваться ими для нагрева описанной выше заготовки невозможно, поскольку они предназначены для деталей цилиндрической или иной формы с ровными краями.

Расчет параметров индуктора для обеспечения описанного выше технологического процесса возможно выполнить на основе имитационного моделирования процесса индукционного нагрева.

Имитационная модель процесса индукционного нагрева профиля основана на решении системы уравнений Максвелла (теорема о циркуляции магнитного поля и закон Фарадея), записанных относительно векторного магнитного потенциала и при предположении гармоничности поля во времени для связи расчетов электромагнитных и тепловых полей:

– система уравнений Максвелла:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (1)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad (2)$$

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A}; \quad (3)$$

– уравнение теплопередачи:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = Q; \quad (4)$$

– уравнения электромагнитных потерь:

$$Q = Q_{\text{резист}} + Q_{\text{магн}}, \quad (5)$$

$$Q_{\text{резист}} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J} \cdot \vec{E}), \quad (6)$$

$$Q_{\text{магн}} = \frac{1}{2} \text{Re}(i\omega \vec{B} \cdot \vec{H}), \quad (7)$$

где ∇ – дифференциальный оператор набла; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м; $\vec{J}$ – плотность электрического тока, А/м²; $\vec{E}$ – напряженность электрического поля, В/м; $\vec{B}$ – магнитная индукция, Тл; $\vec{A}$ – векторный магнитный потенциал, Тл/м; $\sigma_{\text{эл}}$ – электропроводность, См/м; ρ – плотность, кг/м³; C_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); T – температура, °С; $\vec{q} = -\lambda \nabla T$ – удельный тепловой поток, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); Q – электромагнитные потери, Вт; $Q_{\text{резист}}$ – резистивные потери, Вт; $Q_{\text{магн}}$ – магнитные потери, Вт.

Система уравнений дополнена следующими граничными условиями (рис. 4):

– магнитная изоляция

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0; \quad (8)$$

– тепловая изоляция

$$-\vec{n} \times \vec{q} = 0; \quad (9)$$

– конвективный теплообмен

$$-\vec{n} \times \vec{q} = \alpha(T_{\text{ос}} - T); \quad (10)$$

– теплообмен излучением

$$-\vec{n} \times \vec{q} = \varepsilon \sigma (T_{\text{ос}}^4 - T^4), \quad (11)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); ε – коэффициент излучения; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Коэффициент теплоотдачи для поверхностей различной геометрической ориентации задавался в формульном виде [8]:

– для вертикальной поверхности

$$\alpha = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right), & \text{если } Ra_L \leq 10^9, \\ \frac{k}{L} \left(0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2, & \text{если } Ra_L > 10^9; \end{cases} \quad (12)$$

– для горизонтальной поверхности

$$\alpha = \begin{cases} \frac{k}{L} 0,54 Ra_L^{1/4}, & \text{если } \begin{cases} T \leq T_{\text{внешн}}, \\ 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7, \end{cases} \\ \frac{k}{L} 0,15 Ra_L^{1/3}, & \text{если } \begin{cases} T \leq T_{\text{внешн}}, \\ 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}, \end{cases} \\ \frac{k}{L} 0,27 Ra_L^{1/4}, & \text{если } \begin{cases} T > T_{\text{внешн}}, \\ 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}; \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

– для наклонной поверхности

$$\alpha = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0,68 + \frac{0,67 ((\cos \varphi) Ra_L)^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right), & \text{если } Ra_L \leq 10^9, \\ \frac{k}{L} \left(0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2, & \text{если } Ra_L > 10^9, \end{cases} \quad (14)$$

где L – длина поверхности, м; Ra_L – коэффициент Релея.

В связи с тем что профиль имеет одинаковую форму по всей длине, имитационное моделирование процесса его индукционного нагрева выполнялось в двухмерном пространстве. Моделирование в двухмерном пространстве занимает меньше времени и облегчает требования к вычислительным ресурсам по сравнению с моделированием в трехмерном пространстве.

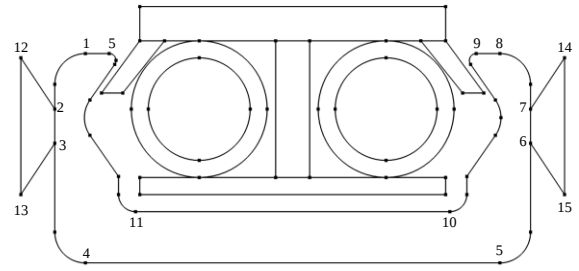


Рис. 4. Граничные условия по тепловому полю: 1-2, 3-4, 8-7, 6-5, 5-11, 9-10, 12-13, 14-15 – конвективный теплообмен от вертикальной поверхности профиля; 1-5, 9-8, 11-10, 4-5 – конвективный теплообмен от горизонтальной поверхности профиля; 2-12, 3-13, 7-14, 6-15 – конвективный теплообмен от наклонной поверхности медной трапеции; 2-12-13-3, 7-14-15-6 – теплообмен излучением от медной трапеции; 2-1-5-11-10-9-8-7, 6-5-4-3 – теплообмен излучением от профиля

Геометрические условия однозначности профиля и первоначальной конструкции индуктора в двумерном пространстве представлены на рис. 5. Индуктор изображен в виде медной трубки диаметром 8 мм. Внутри индуктора циркулирует вода для его охлаждения. Снаружи к индуктору добавлена ферритовая вставка для получения необходимого распределения магнитного поля и обеспечения нагрева требуемых участков профиля.

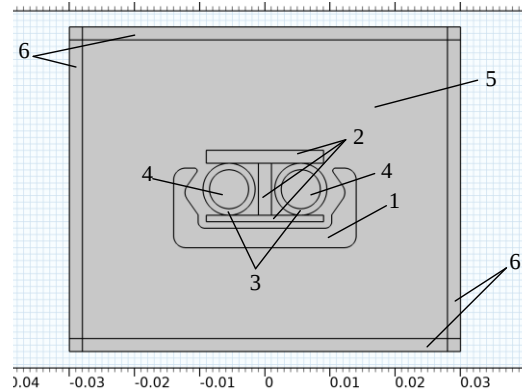


Рис. 5. Геометрия имитационной модели исследуемого профиля и первоначальная конструкция индуктора: 1 – профиль; 2 – ферритовые вставки; 3 – медные трубки $d = 8$ мм; 4 – вода; 5 – воздух; 6 – бесконечные элементы

Для уменьшения дополнительной погрешности расчетов электромагнитных полей имитационной модели, связанной с ограничением расчетной области, в модель добавлены бесконечные элементы. Они расширяют расчетную область до бесконечности за счет масштабирования их координат при сохранении размеров расчетной области.

Для расчета имитационной модели выбран метод конечных элементов. В результате анализа выполненных исследований выбрана

сетка с 20 граничными слоями у профиля и общим количеством конечных элементов 10634.

Разработка оптимальной конструкции индуктора. При первоначальной предложенной конструкции индуктора (рис. 5) разогреть внутренние боковые стенки профиля в заданных областях не представляется возможным. Изотермы боковой стенки профиля располагаются горизонтально (рис. 6), прогревая обе поверхности детали одновременно. Разница температуры в нижней и верхней вертикальной частях профиля составляет около 100 °С. Таким образом, происходит перегрев верхней половины заготовки, в то время как нижняя часть не успевает нагреваться до температуры закалки.

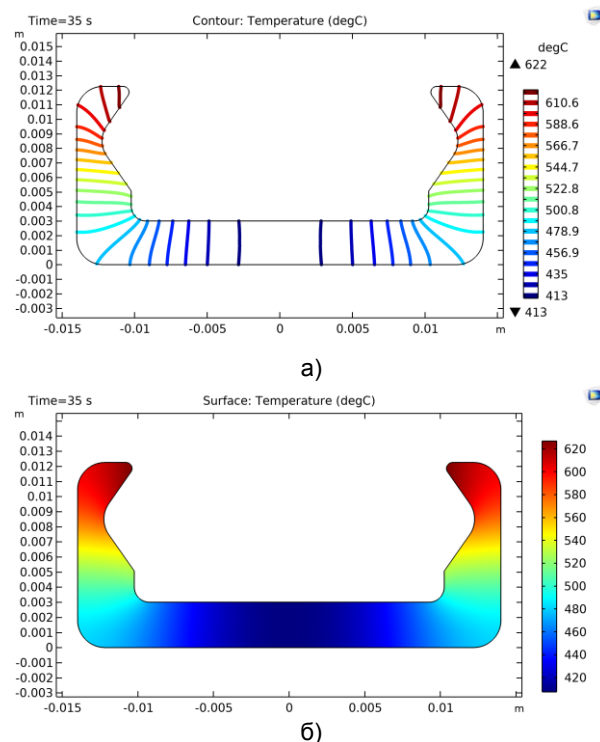


Рис. 6. Графики распределения температуры при первоначальной конструкции индуктора: а – изотермы; б – картина распределения температурного поля

Анализ картины магнитного поля (рис. 7,а) позволяет сделать вывод о необходимости его распределения. Для этого решено использовать дополнительные ферритовые вставки (рис. 7,б). Изменение длины поперечного сечения этих вставок приводит к изменению распределения магнитного поля и температуры боковой стенки профиля. Вычислительные эксперименты показали, что при слишком коротком поперечном сечении ферритовых вставок изотермы загибаются недостаточно, а при более длинном – наблюдается смещение зоны максимального нагрева вниз от центра боковой стенки. В результате исследования была выбрана длина ферритовых вставок, позволившая получить оптимальную картину распределения магнитного поля (рис. 7,б).

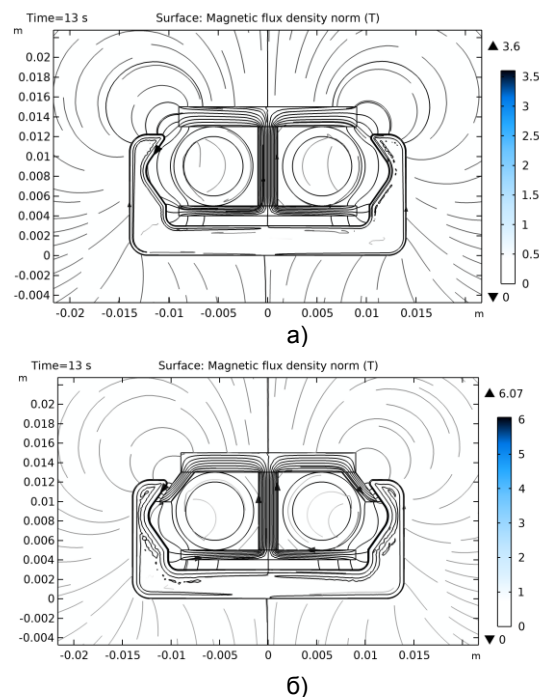


Рис. 7. Распределение магнитного поля: а – первоначальная конструкция индуктора; б – оптимальная конструкция индуктора

Графики распределения температуры при оптимальной конструкции индуктора представлены на рис. 8. Изотермы (рис. 8,а) начинают загибаться в нужную сторону, однако за счет того, что деталь очень тонкая, она прогревается полностью, что не удовлетворяет условию закалки только поверхностей. Деталь в этом случае будет являться браком.

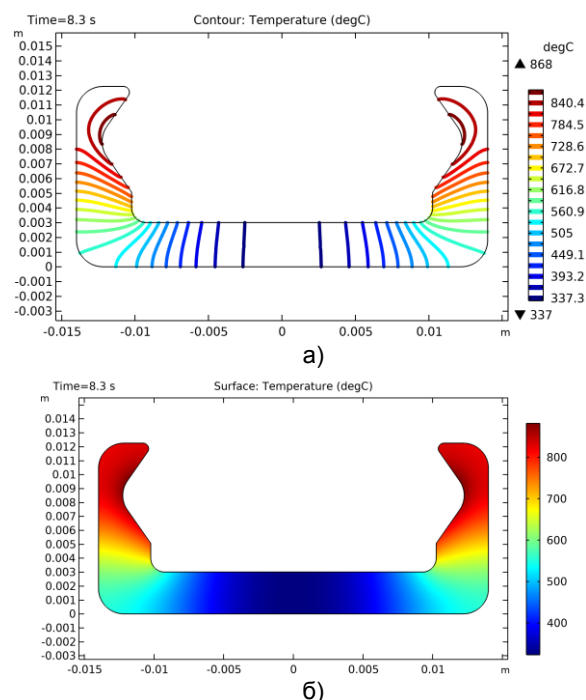


Рис. 8. Графики распределения температуры при нагреве до 850 °С при оптимальной конструкции индуктора: а – изотермы; б – картина распределения температурного поля

Для того чтобы избежать этого и снизить температуру наружной стенки, предлагается добавить дополнительные теплоотводы. В качестве таких теплоотводов могут быть теплоотводы в виде медных трубок, заполненных водой, прилегающих к наружной стенке детали, медных тетраэдров, трапеций, прилегающих острием к заготовке. Вычислительные эксперименты показали, что при использовании трубок с водой охлаждение наружной стенки происходит слишком интенсивно, полностью меняется картина распределения теплового поля, зоны соприкосновения с трубками не нагреваются до нужных температур, а увеличение подаваемого тока приводит к перегреву остальной части пластины; при использовании треугольных пластин отвод тепла недостаточен. Оптимальным является применение медных трапеций, варьируя форму, размеры и точку прилегания которых удалось разработать конструкцию, обеспечивающую заданное распределение картины теплового поля с повышенным градиентом температуры на внутренней и внешней стенках закаливаемой детали (рис. 9, 10).

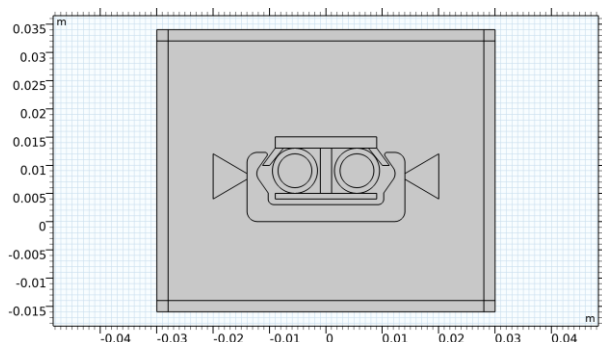


Рис. 9. Итоговая конструкция индуктора с закаливаемой деталью

На имитационной модели разработанной конструкции индуктора были проведены исследования влияния величины подаваемого тока и частоты на скорость нагрева поверхностей детали. Моделирование проводилось для токов 100, 200, 300, 400, 500 А на частоте 10, 30, 50–100 кГц. При токе 100 А, независимо от частоты, стенки детали не могут нагреться до требуемой температуры. Увеличение частоты приводит к более интенсивному процессу нагрева, но большее влияние на скорость тепловых процессов оказывает величина подаваемого тока (рис. 11,а), вследствие чего разница температур между внутренней и внешней стенками увеличивается, позволяя закалить требуемые радиусные участки, не подвергая при этом фазовому переходу внешнюю стенку детали. Выявлено, что при величине тока, равной 500 А, тепловое поле начинает изменяться: идет перегрев нижней части детали, при этом верхняя половина не догревается до закалочных температур, поэтому наиболее подходящим

режимом работы данной индукционной установки являются токи в диапазоне 300–400 А на частотах 80–100 кГц.

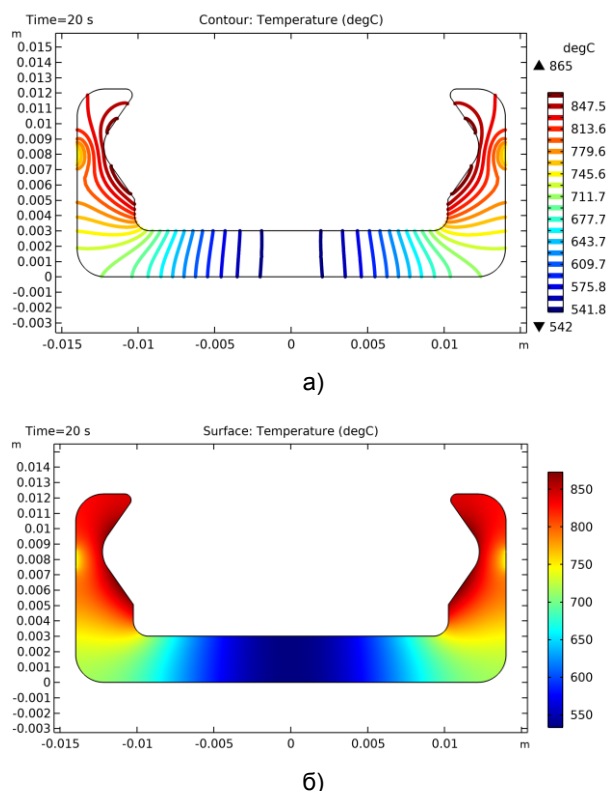


Рис. 10. Распределение температуры ($t = 20$ с, $I = 250$ А, $f = 100$ кГц): а – изотермы; б – картина распределения температурного поля

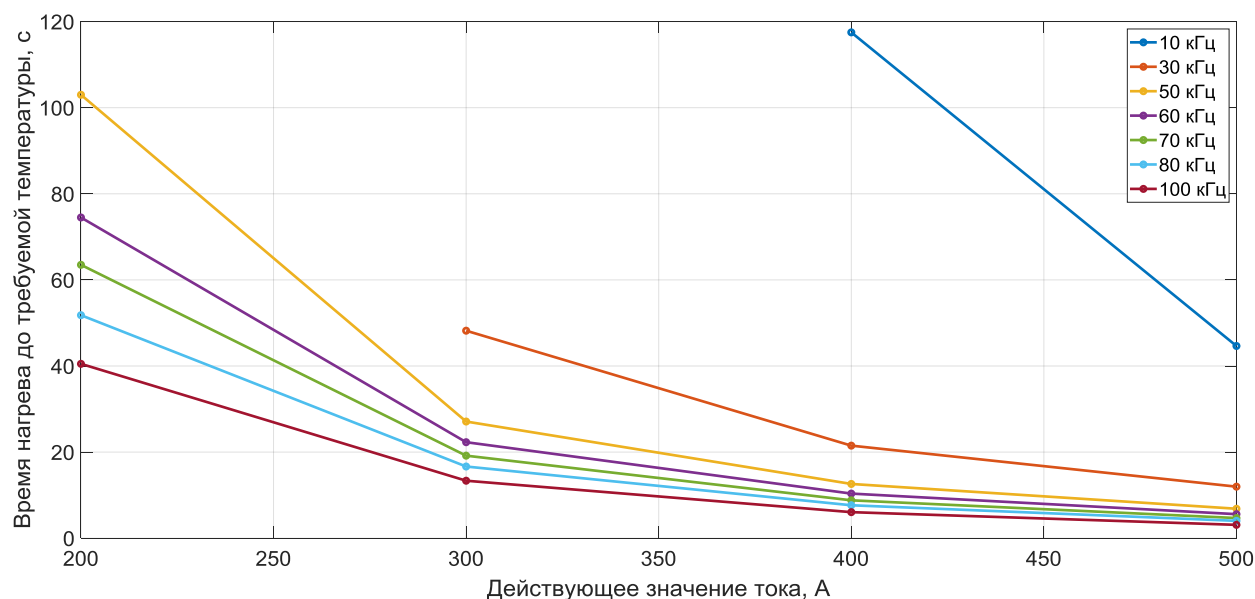
Выводы. Индукционный нагрев позволяет обрабатывать детали различных форм и размеров. Для эффективной работы индукционной установки необходимо правильно разработать конструкцию индуктора, выбрать подходящие материалы для его изготовления и оптимальный режим работы источника питания, согласованный с характеристиками индуктора-заготовки, и т.д.

Разработанный в результате выполненных исследований индуктор позволяет закалять отдельные участки очень тонкой детали сложной формы.

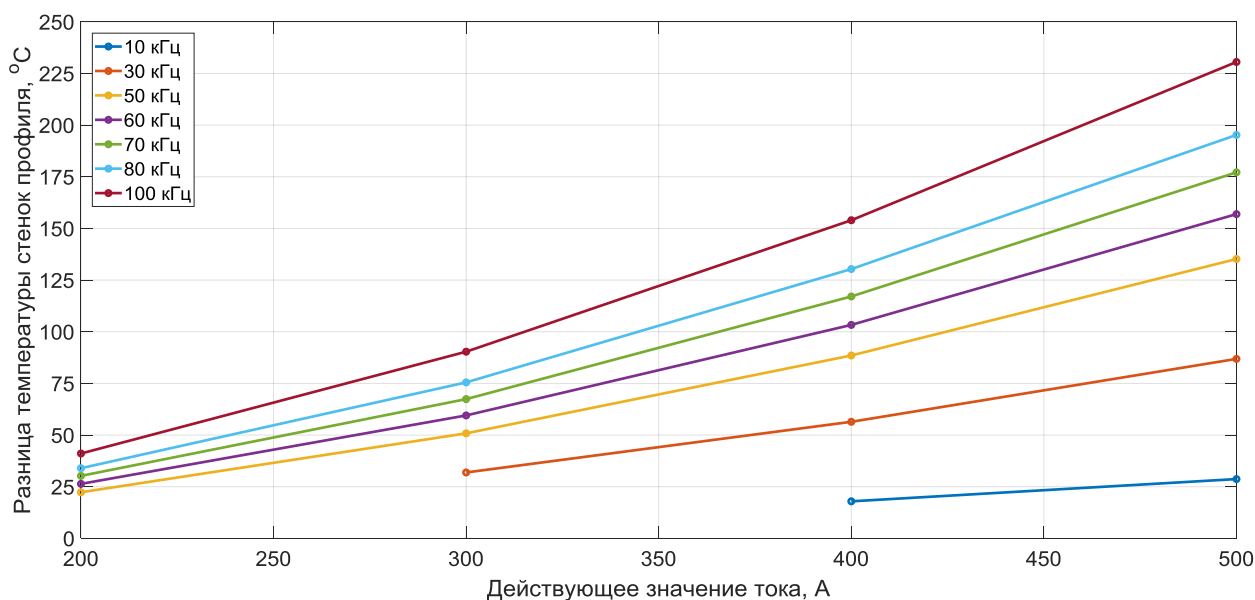
Условия индукционного нагрева детали под закалку, подобранные в процессе моделирования при вариации таких параметров, как частота, мощность нагрева, геометрия концентраторов магнитного поля, оказались удовлетворяющими требованиям закалки только поверхности.

Применение математического компьютерного моделирования позволило оперативно получить необходимые параметры технологического процесса закалки.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку системы регулирования коэффициента мощности индукционной установки.



а)



б)

Рис. 11. Энергетические характеристики при разных частотах генерируемого напряжения: а – время нагрева поверхности до температуры закалки от величины тока; б – разница температур закаливаемой и не закаливаемой поверхностей заготовки от величины подаваемого тока

Список литературы

1. Кучеров В.В. Особенности использования индукционных установок различного частотного диапазона; виды индукционных трансформаторов; градирни и чиллеры – промышленные системы охлаждения индукционного оборудования. Ч. II // Индустрия. – 2014. – № 6(88). – С. 13–17.
2. Торяников А.Ю., Барышников А.А. Сравнительный анализ высокоэнергетических методов поверхностного упрочнения стали // Молодой ученый. – 2021. – № 19(361). – С. 45–49.
3. Корягин Ю.Д., Филатов В.И. Индукционная закалка сталей: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 52 с.
4. Троценко В.В., Подольничик П.И. Индукционный нагреватель [Электронный ресурс] // Электрон-

ный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2018. – № 1(12) январь – март. – Режим доступа: <http://e-journal.omgau.ru/images/issues/2018/1/00516.pdf>

5. Рогинская Л.Э., Исмаилов Р.Р., Рахманова Ю.В. Согласование выходных параметров инвертора для индукционного нагрева с параметрами нагрузки с помощью ферромагнитного умножителя частоты // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9, № 2. – С. 12–17.

6. Гордиенко А.И., Михлюк А.И., Вегера И.И. Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы и перспективы развития // Литье и металлургия. – 2010. – № 1(54), 2(55). – С. 140–148.

7. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

8. Fundamentals of Heat and Mass Transfer /

F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine. – 6th ed. – New York: John Wiley & Sons, 2006.

References

1. Kucherov, V.V. Osobennosti ispol'zovaniya induktsionnykh ustanovok razlichnogo chastotnogo diapazona; vidy induktsionnykh transformatorov; gradirni i chillery – promyshlennye sistemy okhlazhdeniya induktsionnogo oborudovaniya. Ch. II [Features of the use of induction installations of different frequency ranges; types of induction transformers; cooling towers and chillers – industrial cooling systems for induction equipment. Part II]. *Industriya*, 2014, no. 6(88), pp. 13–17.
2. Toryannikov, A.Yu., Baryshnikov, A.A. Sravnitel'nyy analiz vysokoenergeticheskikh metodov poverkhnostnogo uprochneniya stali [Comparative analysis of high-energy methods of surface hardening of steel]. *Molodoy uchenyy*, 2021, no. 19(361), pp. 45–49.
3. Koryagin, Yu.D., Filatov, V.I. *Induktsionnaya zakalka staley* [Induction hardening of steels]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2006. 52 p.
4. Trotsenko, V.V., Podolyanchik, P.I. Induktsionnyy nagrevatel' [Induction heater]. *Elektronnyy nauchno-metodicheskiy zhurnal Omskogo GAU*, 2018, no. 1 (12), yanvar' – mart. Available at: <http://e-journal.omgau.ru/images/issues/2018/1/00516.pdf>.
5. Roginskaya, L.E., Ismagilov, R.R., Rakhmanova, Yu.V. Soglasovanie vykhodnykh parametrov invertora dlya induktsionnogo nagreva s parametrami nagruzki s pomoshch'yu ferromagnitnogo umnozhitelya chastoty [Matching the output parameters of an inverter for induction heating with load parameters using a ferromagnetic frequency multiplier]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 12–17.
6. Gordienko, A.I., Mikhlyuk, A.I., Vegera, I.I. Induktsionnaya termicheskaya obrabotka v mashinostroenii: analiz, problemy i perspektivy razvitiya [Induction heat treatment in mechanical engineering: analysis, problems and development prospects]. *Lit'e i metalurgiya*, 2010, no. 1(54), 2(55), pp. 140–148.
7. Slukhotskiy, A.E., Ryskin, S.E. *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Leningrad: Energiya, 1974. 264 p.
8. Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley & Sons, 2006.