

УДК 621.365.5

Разработка модели для оптимизации параметров индукционно-стыковой сварки стальных изделий плоским индуктором

И.Ю. Долгих¹, Л.Б. Корюкин²

¹ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²ООО «ЧПУ Технологии», г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Широкий спектр технологических преимуществ индукционного нагрева обуславливает его использование в различных областях промышленности, одной из которых является стыковая сварка изделий различного вида и функционального назначения. Однако использование существующих методов индукционно-стыковой сварки ограничивается размером поперечного сечения соединяемых деталей, что требует внедрения новых технических решений, направленных на расширение области их применения, а также на повышение энергетических показателей и качества готовой продукции. В то же время практическое применение нового способа сварки на основе индукционного нагрева требует проведения предварительных исследований на базе математических моделей, предназначенных для выбора режима работы оборудования, обеспечивающего оптимальные параметры процесса нагрева в целях получения равномерного распределения температуры в слое требуемой толщины и приемлемых значений энергетических показателей.

Материалы и методы: Решение поставленной задачи выполнено на основе применения программного комплекса COMSOL Multiphysics, посредством совместного решения уравнения электромагнитного поля в квазистационарном приближении через азимутальную составляющую векторного магнитного потенциала и дифференциального уравнения теплопроводности, характеризующего распределение теплового поля в пространстве и во времени.

Результаты: Разработана новая модель индукционного нагрева при стыковой сварке стальных труб на основе применения плоского индуктора, позволяющая анализировать картины распределения магнитного поля, объемной плотности тепловыделения и температуры в расчетной области, а также определять динамику изменения энергетических показателей процесса нагрева при учете нелинейно изменяющихся физических свойств моделируемых объектов.

Выводы: Разработанная модель позволяет осуществлять параметрический анализ индукционного нагрева плоским индуктором стальных труб в рамках стыковой сварки, который необходим при выборе режима работы оборудования, обеспечивающего повышение электрического КПД процесса нагрева, равномерности распределения температуры и, как следствие, качества получаемых изделий.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индукционно-стыковая сварка, плоский индуктор, моделирование объектов, электромагнитные и температурные процессы.

Development of a model for optimizing parameters of induction-butt welding of steel products with a flat coil

I.Yu. Dolgikh¹, L.B. Koryukin²

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²ООО «CNC Technology», Ivanovo, Russian Federation
E-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

Abstract

Background: A wide range of technological advantages of induction heating conduce its application in various fields of industry, among which is butt welding of many types of products for different functional purposes. However, the use of the existing induction-butt welding methods is limited by the size of the joined parts cross-section, which requires introduction of new technical designs aimed at widening the scope of their application as well as improvement of energy parameters and finished product quality. At the same time, practical application of the new welding method based on induction heating requires preliminary studies based on mathematical models designed for selecting the equipment operation mode that ensures the optimal parameters of the heating process in order to obtain even temperature distribution in the layer of the required thickness and to ensure acceptable energy data.

Material and methods: The problem was solved on the basis of the COMSOL Multiphysics software package, by jointly solving the electromagnetic field equation in the quasi-stationary approximation through the vector magnetic potential azimuthal component and the differential heat equation that characterizes the thermal field distribution in space and time.

Results: The result of this work is a new induction heating model for steel pipes butt welding with the help of a flat coil, which makes it possible to analyze magnetic field distribution forms, heat release volume density and temperature in the calculation area, and also to determine the numerical values of the dynamics of changes in energy indicators of the heating process taking into account the physical properties of simulated objects that change nonlinearly.

Conclusions: The developed model makes it possible to carry out parametric analysis of induction heating of steel pipes with a flat coil as part of butt welding. Such analysis is necessary for choosing the mode of equipment operation that increases the electrical efficiency of the heating process, the temperature distribution uniformity and, consequently, products quality.

Key words: induction heating, induction-butt welding, flat coil, object modeling, electromagnetic and temperature processes.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.4.061-069

Введение. В настоящее время прогрессивным электротехнологическим процессом является индукционный метод нагрева, основанный на выделении тепловой энергии в токопроводящем теле, находящемся в переменном электромагнитном поле. Применение индукционного нагрева обеспечивает широкий спектр энергетических и технологических преимуществ [1], одним из которых является возможность осуществления бесконтактной передачи энергии в заданную область изделия при использовании атмосферы требуемого химического состава. Указанное обстоятельство делает актуальным его применение в различных производственных процессах, связанных с нагревом и плавкой металлов, таких как, например, термическая и термохимическая обработка деталей машин [2, 3], обработка давлением [4, 5], сварка, пайка, наплавка [6, 7], а также выплавка в печах различных типов [8, 9] высококачественных металлов и сплавов. Столь широкое многообразие осуществляемых технологических процессов и видов обрабатываемых объектов, обуславливает существование большого количества конструкций индукторов (рис. 1), являющихся источником электромагнитного поля и, как следствие, влияющих непосредственным образом на распределение плотности тепловыделения в объеме изделия и определяющих температуру в заданных его областях.

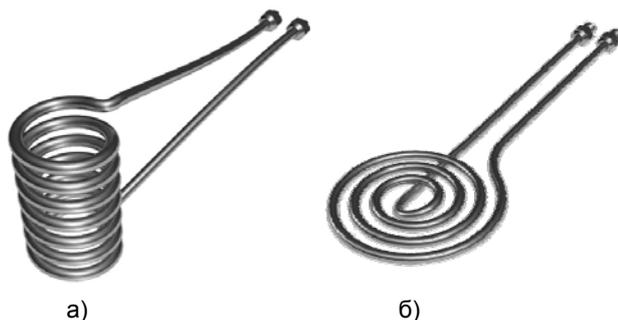


Рис. 1. Внешний вид существующих конструкций индукторов: а – для нагрева изделий цилиндрической формы; б – для нагрева плоских поверхностей

Одним из основных направлений использования индукционного нагрева является стыковая сварка, применяющаяся для получения неразъемных соединений отдельных частей трубопроводов, а также различного вида деталей сплошных сечений [10, 11]. В этом случае высокая производительность и стабильное качество каждого конкретного вида изделия могут быть получены за счет грамотного выбора тех-

нологических параметров процесса нагрева. Значительный интерес в этом плане представляет требование, связанное с необходимостью обеспечения равномерного распределения источников тепла по площади торцов деталей, участвующих в создании неразъемного соединения. Анализ существующих видов индукционной сварки изделий встык, основанных на использовании внешних цилиндрических индукторов (рис. 2), указывает на их существенный недостаток, заключающийся в выделении греющей мощности в поверхностных слоях околошовной зоны соединяемых объектов. При этом глубинные слои прогреваются вследствие теплопередачи теплопроводностью, что обуславливает необходимость применения токов сравнительно небольшой величины при значительном времени нагрева.

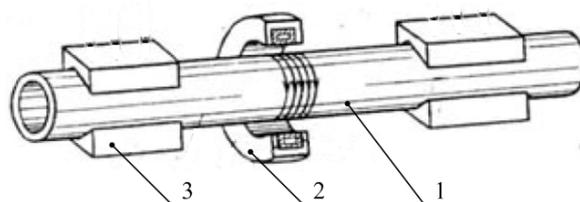


Рис. 2. Схема высокочастотной стыковой сварки: 1 – свариваемое изделие; 2 – индуктор; 3 – зажимы для фиксации изделия

Указанное обстоятельство отрицательно сказывается на энергетических показателях процесса нагрева и качестве готовой продукции вследствие увеличения зоны неблагоприятного температурного воздействия вдоль заготовки. Практика показывает нецелесообразность использования представленного технического решения при сварке деталей, поперечный размер которых превышает 30 мм [10].

В связи с этим в области осуществления индукционно-стыковой сварки широкие перспективы представляет использование плоского индуктора [12], располагаемого между частями свариваемого изделия. Достоинство применения индуктора данного вида связано с принципиальной возможностью осуществления непосредственного электромагнитного воздействия на поверхности деталей, участвующих в создании неразъемного соединения, что приводит к выделению греющей мощности только в требуемой области и создает условия для обеспечения ее равномерного нагрева. При этом глубина нагреваемого слоя и его

температура определяются с учетом материала изделия и вида сварки (оплавлением или давлением) и могут регулироваться подбором параметров, определяющих время нагрева, а также величину и частоту тока в индукторе.

В то же время разработка нового способа сварки, помимо формулирования технологических основ, требует детальной проработки отдельных его этапов. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость решения вопросов, связанных с выбором конструкции индуктора, обеспечивающей оптимальное распределение объемной плотности тепловыделения для каждого конкретного вида изделия. Так, например, учитывая необходимость осуществления равномерного двухстороннего нагрева, при сварке труб рационально использование одновиткового индуктора из медной шины, располагаемого между двумя свариваемыми заготовками. В то же время важным вопросом является исследование режимов работы источника питания, обеспечивающего наилучшие энергетические показатели производственного процесса, а также требуемый режим нагрева для деталей заданного вида. Для решения указанных задач могут быть использованы методы компьютерного моделирования, одним из которых является применение современных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов. Широкие перспективы в этом плане предоставляет программа полевого моделирования COMSOL Multiphysics, которая дает возможность изучения электромагнитных и температурных процессов индукционного нагрева как в отдельности, так и в комплексе [13] при учете нелинейных характеристик моделируемых объектов.

Ниже рассмотрены основные принципы разработки модели исследования физических процессов индукционного нагрева в рамках стыковой сварки стальных труб с внутренним диаметром $2R_{\text{внутр}} = 102$ мм и толщиной стенки $D_{\text{ст}} = 10$ мм с применением одновиткового плоского индуктора, выполненного из медной трубки диаметром $d_{\text{инд}} = 10$ мм и толщиной стеки 2 мм. Величина воздушного зазора между индуктором и изделием принята равной $a_{\text{возд}} = 2$ мм. Решение поставленной задачи выполнено в двумерной осесимметричной постановке, в которой моделируемые объекты (рис. 3) представляются в виде сечений витков индуктора и нагреваемых деталей, расположенных с одной стороны от оси симметрии. Кроме того, геометрия модели включает в себя границу расчетной области, представляющую собой линию окружности, расположенную на значительном расстоянии от источников поля.

Определение оптимальных параметров индукционного нагрева в рамках стыковой сварки деталей заданного вида может быть осуществлено в два этапа. На первом этапе решается электромагнитная задача, на базе

которой производится выбор конструкции индуктора и его расположения относительно частей изделия исходя из требования обеспечения равномерного распределения объемной плотности тепловыделения, а также приемлемых значений энергетических показателей процесса нагрева, важным критерием оценки которых является величина электрического КПД. На втором этапе исследуются тепловые процессы, на основании чего выбирается режим нагрева, обеспечивающий необходимый его темп и требуемый характер распределения температуры в заданной области изделия.

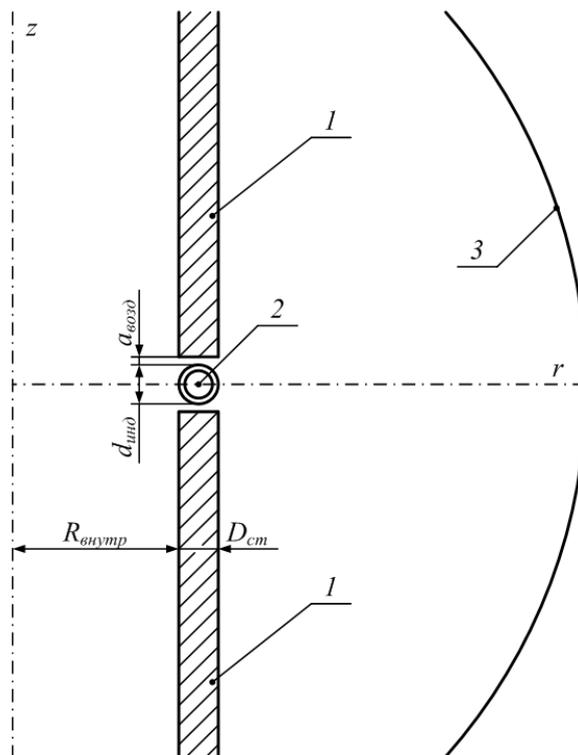


Рис. 3. Геометрия модели стыковой сварки труб на основе применения одновиткового индуктора: 1 – части свариваемого изделия; 2 – одновитковый индуктор; 3 – расчетная область

Методы исследования электромагнитных процессов. Модель исследования электромагнитных процессов индукционного нагрева основывается на решении уравнения электромагнитного поля в квазистационарном приближении через азимутальную составляющую векторного магнитного потенциала, которое в цилиндрической системе координат имеет вид [13]

$$-j\omega\sigma A_{\varphi} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_{\varphi}) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial}{\partial z} (A_{\varphi}) \right) = -\frac{\sigma U_m}{2\pi r}, \quad (1)$$

где ω – угловая частота, рад/с; σ – удельная электрическая проводимость материала моделируемых объектов, См/м; A_{φ} – комплексное значение амплитуды азимутальной составляющей

щей векторного магнитного потенциала в расчетной области, В·с/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость моделируемых объектов; U_m – амплитуда напряжения, создаваемого сторонним источником питания, В; r, z – пространственные координаты, м.

После вычисления распределения векторного магнитного потенциала могут быть определены плотность тока в индукторе $J_{\phi \text{ инд}}$ и изделия $J_{\phi \text{ изд}}$:

$$J_{\phi \text{ инд}} = \frac{\sigma_{\text{инд}} U_{\text{инд}}}{2\pi r} - \sigma_{\text{инд}} j\omega A_{\phi}; \quad (2)$$

$$J_{\phi \text{ изд}} = -\sigma_{\text{изд}} j\omega A_{\phi}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{инд}}, \sigma_{\text{изд}}$ – удельная электрическая проводимость материалов индуктора и изделия; $U_{\text{инд}}$ – напряжение на индукторе.

Комплексное значение амплитуды тока в индукторе $I_{m \text{ инд}}$ определяется путем интегрирования плотности тока по его сечению $S_{\text{инд}}$:

$$I_{m \text{ инд}} = \int_{S_{\text{инд}}} J_{\phi \text{ инд}} dS_{\text{инд}}. \quad (4)$$

Объемная плотность тепловыделения $Q_{\text{изд}}$, являющаяся причиной нагрева изделия, определяется выражением

$$Q_{\text{изд}} = \frac{1}{2\sigma_{\text{изд}}} |J_{\phi \text{ изд}}|^2. \quad (5)$$

Тогда выделяющаяся в изделии активная мощность будет равна

$$P_{\text{изд}} = \int_{S_{\text{инд}}} (Q_{\text{изд}} \cdot 2\pi r) dS_{\text{изд}}. \quad (6)$$

Таким образом, в качестве исходных данных принимаются амплитудное значение напряжения или тока в индукторе и его частота, а также величины, характеризующие физические свойства материалов индуктора, изделия и окружающего воздуха, основным из которых является удельное электрическое сопротивление. При этом, поскольку решается стационарная задача исследования электромагнитного поля, можно считать его значения постоянным и соответствующим начальной температуре. В то же время при моделировании индукционного нагрева изделий, выполненных из ферромагнитных материалов, важной характеристикой является магнитная проницаемость, значение которой зависит от напряженности H и индукции B магнитного поля. Указанная зависимость может быть учтена на основе использования выражения следующего вида:

$$\mu_r(B) = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (7)$$

в котором значения B и H определяются по кривой намагничивания для заданной марки стали [14].

В качестве граничных условий задается равенство нулю азимутальной составляющей векторного магнитного потенциала на внешней

границе расчетной области; симметрия распределения магнитного потока на оси симметрии; непрерывность магнитного потока на внутренних границах модели.

Результаты исследования электромагнитных процессов. На рис. 4 представлены результаты моделирования электромагнитных процессов индукционного нагрева, полученные при стабилизации в индукторе тока величиной 1 кА, частотой 5 кГц при учете нелинейной зависимости магнитной проницаемости материала изделия (сталь 40) от индукции. Анализ представленных результатов указывает на концентрацию объемной плотности тепловыделения в поверхностных слоях (рис. 4,а), непосредственно участвующих в создании сварного соединения частей изделия. При этом толщина слоя, содержащего внутренние источники тепла, уменьшается с ростом частоты тока, что создает условия для регулирования нагреваемого объема по глубине, определяемой технологией осуществляемого процесса. Так, например, использование значительных по величине токов высокой частоты способно обеспечить быстрый симметричный нагрев тонкого слоя обеих частей изделия на глубину, достаточную для получения при их сжатии неразъемного соединения, посредством установления межатомных связей. В то же время кривая, характеризующая распределение тепловыделения на поверхности заготовки (рис. 4,б), указывает на некоторую неравномерность, пик которой находится в непосредственной близости к средней точке толщины стенки трубы, что при быстром нагреве до диапазона высоких температур может привести к некоторому перегреву этого участка. Однако с точки зрения осуществления индукционно-стыковой сварки такое распределение данного параметра можно назвать благоприятным. В этом случае максимальное значение температуры в изделии рационально ограничить значением, соответствующим температуре плавления материала детали, причем в прилегающих областях она будет несколько ниже. При сжатии частей изделия с требуемым усилием указанное обстоятельство будет способствовать получению надежного сварного соединения при отсутствии наружных дефектов, связанных с нежелательным вытеснением жидкого металла из области стыка двух деталей.

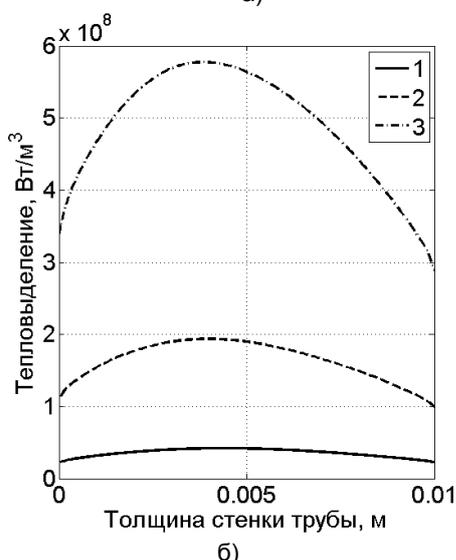
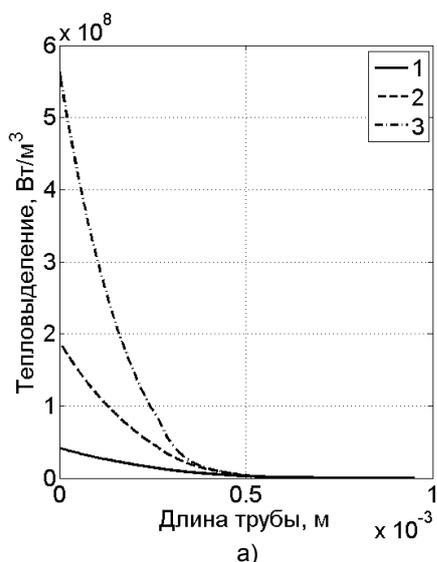


Рис. 4. Распределение объемной плотности тепло-выделения по длине (а) и ширине (б) изделия: 1 – частота 1000 Гц; 2 – частота 2500 Гц; 3 – частота 5000 Гц

В то же время помимо обоснования технологических преимуществ использования предложенной конструкции индуктора важным вопросом является выбор оптимальных параметров процесса индукционного нагрева с точки зрения обеспечения высоких энергетических показателей. Наибольший интерес в этом плане представляет зависимость коэффициента мощности и электрического КПД от частоты тока в индукторе. При известных значениях напряжения $U_{инд}$ и тока $I_{инд}$ в индукторе, а также рассеиваемой в изделии активной мощности $P_{изд}$ указанные параметры определяются в соответствии с выражениями:

$$\cos \varphi_{инд} = \frac{P_{инд}}{S_{инд}} = \frac{\operatorname{Re}(\dot{U}_{инд} \cdot \tilde{I}_{инд})}{|\dot{U}_{инд} \cdot \tilde{I}_{инд}|}, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P_{изд}}{P_{инд}} \cdot 100 \% = \frac{P_{изд}}{\operatorname{Re}(\dot{U}_{инд} \cdot \tilde{I}_{инд})} \cdot 100 \%. \quad (9)$$

Результаты исследования энергетических показателей индукционного нагрева представлены на рис. 5, 6.

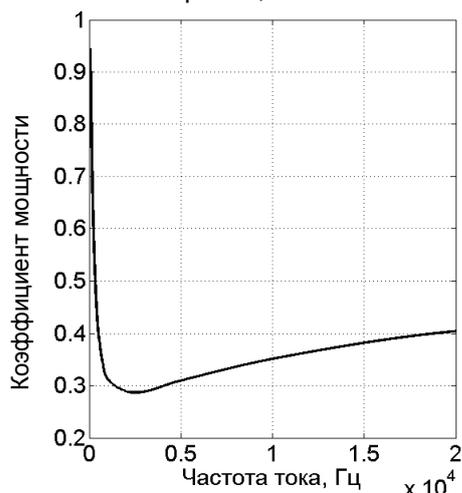


Рис. 5. Зависимость коэффициента мощности индуктора от частоты протекающего в нем тока

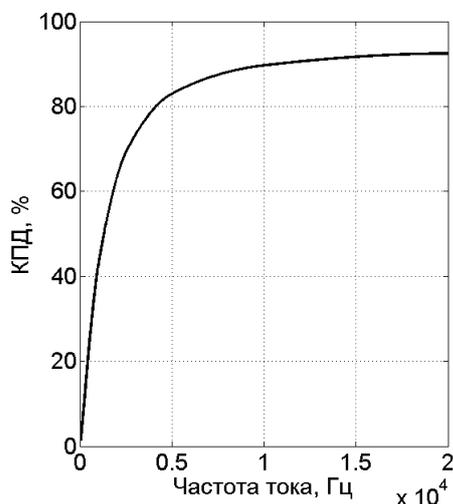


Рис. 6. Зависимость электрического КПД от частоты тока в индукторе

Анализ полученных результатов показывает, что минимальной частотой, обеспечивающей высокие энергетические показатели, является 5 кГц. Ее дальнейшее повышение не приводит к существенному росту электрического КПД нагрева, вследствие чего указанное значение можно назвать оптимальным.

Методы исследования температурных процессов. Следующим этапом разработки технологических основ индукционно-стыковой сварки труб является исследование режимов нагрева частей изделия на базе создания и анализа моделей температурных процессов. В основе решения тепловой задачи лежит уравнение теплопроводности [13], описывающее распределение теплового поля в пространстве и во времени:

$$C \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad (10)$$

где C – теплоемкость материала нагреваемого изделия, Дж/(кг·К); γ – плотность материала изделия, кг/м³; T – температура, К; r, z – пространственные координаты, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q – удельная объемная мощность источников тепла, Вт/м³.

Особенностью разработки модели исследования теплового поля является ярко выраженная температурная зависимость физических свойств нагреваемого объекта. В этом случае, учитывая необходимость осуществления совместного расчета электромагнитных и температурных процессов индукционного нагрева, интерес представляет изменение величин, характеризующих теплоемкость, теплопроводность, удельное электрическое сопротивление и магнитную проницаемость материала изделия. Каждый из указанных параметров нелинейно зависит от температуры (рис. 7) и в определенной степени влияет на режим нагрева и его технологические особенности, а также на технические характеристики нагревательного оборудования, его технико-экономические показатели и эксплуатационные условия работы.

Учет указанных зависимостей в программе COMSOL Multiphysics осуществляется путем ввода соответствующих функций на основе табличных данных, приводимых в справочной литературе для каждой конкретной марки стали. Изменение магнитной проницаемости задается путем ввода выражения следующего вида:

$$\mu_r(T) = 1 + (\mu_r(B) - 1) \cdot mu_temp(T), \quad (11)$$

где $mu_temp(T)$ – вспомогательная функция, вид которой представлен на рис. 8.

Настройка граничных условий включает в себя ввод температуры окружающего воздуха на внешней границе расчетной области, а также учет тепловых потерь с поверхности заготовки на основе использования значений коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением, определяемый степенью черноты нагреваемого объекта.

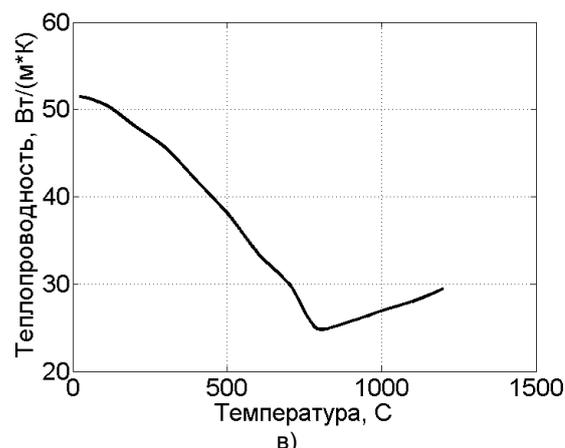
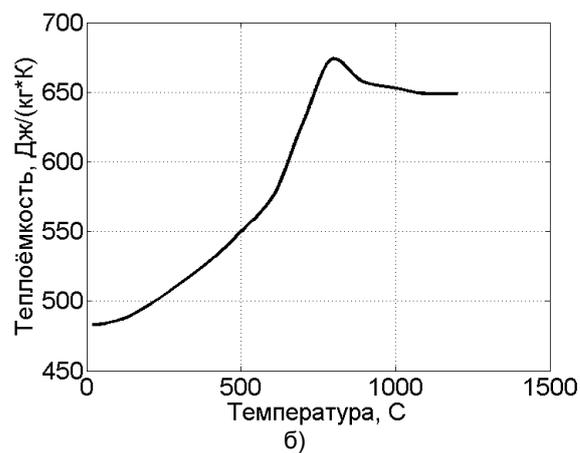
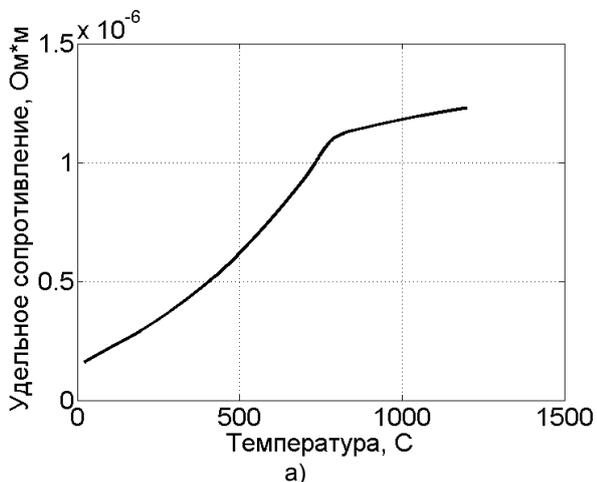


Рис. 7. Температурные зависимости физических свойств стального изделия: а – теплоемкость; б – теплопроводность; в – удельное электрическое сопротивление

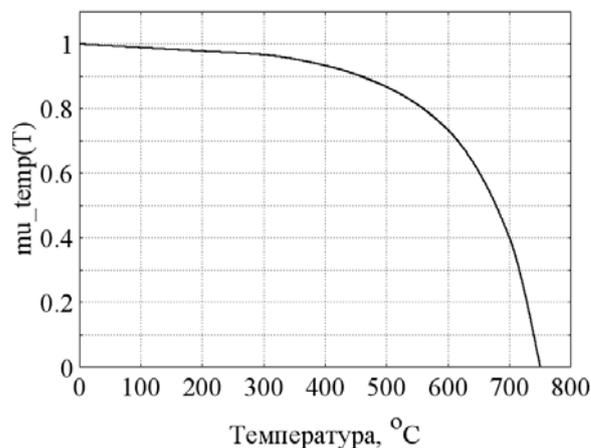


Рис. 8. Вспомогательная функция, определяющая температурную зависимость магнитной проницаемости стального изделия

Результаты исследования температурных процессов. Исследование температурных процессов индукционного нагрева частей свариваемого изделия выполнено при протекании в течение 15 с в индукторе тока величиной 8 кА и частотой 5 кГц. На рис. 9 представлены кривые, характеризующие динамику изменения температуры в отдельных точках

поверхности части изделия, соответствующих внутренней и наружной границам, а также средней точке по толщине.

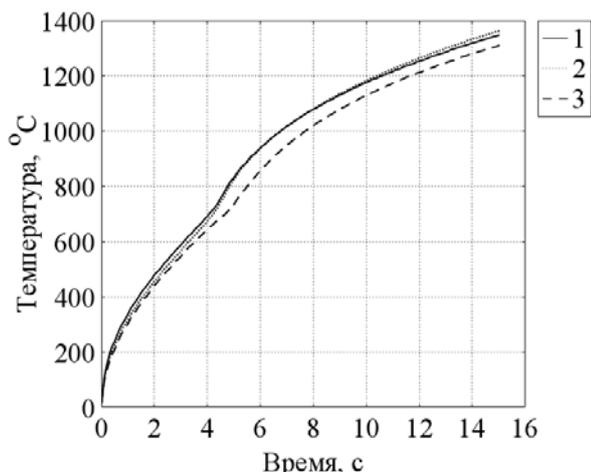


Рис. 9. Динамика изменения температуры на поверхности изделия: 1 – внутренняя граница; 2 – средняя точка толщины стенки трубы; 3 – наружная граница

Анализ полученных результатов показал, что за заданный промежуток времени обеспечивается симметричный нагрев поверхностного слоя деталей до уровня температур, соответствующего рекомендациям [7] в области осуществления стыковой сварки стальных труб. При этом толщина слоя, подвергшегося термическому влиянию по длине трубы (рис. 10,а), находится в пределах 20 мм, а перепад температур по толщине ее стенки (рис. 10,б) к моменту окончания нагрева не превышает 60 °С.

Полученные результаты указывают на технико-экономическую перспективность использования предложенного способа нагрева в рамках индукционно-стыковой сварки, и обуславливают возможность получения стабильно высокого качества неразъемного соединения при последующем после удаления индуктора сжатии.

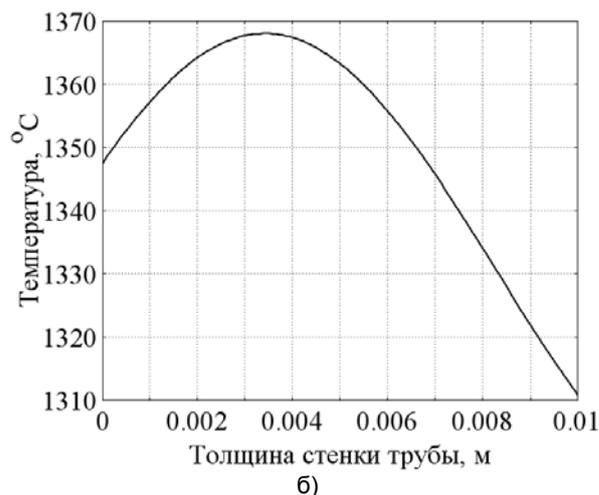
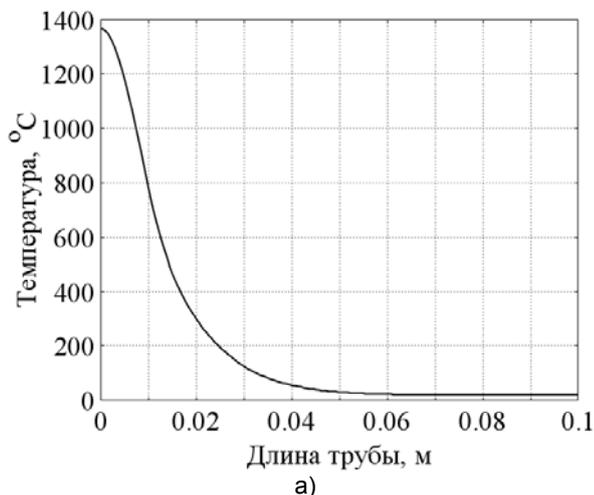


Рис. 10. Распределение температуры в части свариваемого изделия: а – по его длине; б – по ширине

Выводы. Предложенный метод моделирования предоставляет широкие перспективы в области исследования индукционного нагрева и может быть использован для анализа электромагнитных и тепловых процессов, лежащих в основе осуществления стыковой сварки стальных труб плоским индуктором. При этом применение разработанной модели, по сравнению с имеющимися аналитическими [15] и компьютерными [16] методами, дает возможность проводить точный учет изменения всего комплекса физических свойств объектов, а также варьировать исходные данные модели. Указанное обстоятельство способствует выбору технических решений, лежащих в основе оптимизации конструкции индуктора и режима работы оборудования, обеспечивающих высокие энергетические показатели, заданную скорость нагрева и требуемый характер распределения температуры в объеме изделия.

Список литературы

1. **Зимин Л.С., Байкин А.В.** Применение индукционного нагрева в промышленных технологиях // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2013. – Т. 1. – С. 3–7.
2. **Шепеляковский К.З.** Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. – М.: Машиностроение, 1972. – 288 с.
3. **Зислин Г.С., Каменская Н.И.** Восстановительная термическая обработка паропроводов ТЭС методом индукционного нагрева подвижным индуктором // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – № 10. – С. 25–31.
4. **Энергоэффективный индукционный нагрев алюминиевых заготовок перед прессованием / В.С. Немков, В.Б. Демидович, И.И. Растворова и др. // Индукционный нагрев. – 2012. – № 21. – С. 10–15.**
5. **Демидович В.Б., Никитин Б.М., Оленин В.А.** Индукционный нагрев титановых заготовок перед

обработкой давлением // Индукционный нагрев. – 2008. – № 1. – С. 20–25.

6. **Фомин Н.И., Затуловский Л.М.** Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Металлургия, 1979. – 247 с.

7. **Шамов А.Н., Лунин И.В., Иванов В.Н.** Высокочастотная сварка металлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Политехника, 1991. – 240 с.

8. **Теоретические основы и аспекты электротехнологий. Физические принципы и реализация. Интенсивный курс. Основы I.** – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 359 с.

9. **Филиппов К.П., Кубышкин В.И.** Новые области применения индукционного нагрева – камерные индукционные печи // Индукционный нагрев. – 2008. – № 4. – С. 41–43.

10. **Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением: учеб. пособие / под ред. Г.Г. Чернышова и Д.М. Шашина.** – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 464 с.

11. **Патент 2387524** Российская Федерация, МПК В 23 К 20/14. Способ диффузионной сварки в вакууме многослойных изделий из разнородных нержавеющей сталей / А.Н. Семенов, С.В. Онищенко, Е.Ю. Ривкин, М.И. Плышевский, С.Н. Новожилов, В.П. Гордо, Г.Н. Шевелев; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.

12. **Патент 2558802** Российская Федерация, МПК В 23 К 13/01. Способ индукционно-стыковой сварки профилей различной конфигурации / А.Н. Королев, В.В. Тютиков, И.Ю. Долгих, А.С. Орлов; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22.

13. **Практ В.А., Дмитриевский В.А., Сарпулов Ф.Н.** Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. – М.: Изд-во «Спутник+», 2011. – 158 с.

14. **Константинов О.Я.** Магнитная технологическая оснастка. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1974. – 384 с.

15. **Алиферов А., Лупи С.** Индукционный и электроконтактный нагрев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 411 с.

16. **Долгих И.Ю., Королев А.Н., Захаров В.М.** Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 5. – С. 57–63.

References

1. Zimin, L.S., Baykin, A.V. *Primenenie induktsionnogo nagreva v promyshlennykh tekhnologiyakh* [Application of induction heating in industrial technologies]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (XVII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «State and Development Prospects of Electric Technologies» (XVII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2013, vol. 1, pp. 3–7.

2. Shepelyakovskiy, K.Z. *Uprochnenie detaley mashin poverkhnostnoy zakalkoy pri induktsionnom nagreve* [Hardening of machine parts by surface hardening during induction heating]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 288 p.

3. Zislina, G.S., Kamenskaya, N.I. *Vosstanovitel'naya termicheskaya obrabotka paroprovodov TEHS metodom induktsionnogo nagreva podvizhnym indukto-*

rom [Reduction heat treatment of TPP steam lines by induction heating with a movable coil]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2011, no. 10, pp. 25–31.

4. Nemkov, V.S., Demidovich, V.B., Rastvorova, I.I., Chmilenko, F.V., Sit'ko, P.A. *Energoeffektivnyy induktsionnyy nagrev alyuminievykh zagotovok pered pressovaniem* [Energy-efficient induction heating of aluminum preforms before pressing]. *Induktsionnyy nagrev*, 2012, no. 21, pp. 10–15.

5. Demidovich, V.B., Nikitin, B.M., Olenin, V.A. *Induktsionnyy nagrev titanovykh zagotovok pered obrabotkoy davleniem* [Induction heating of titanium billets prior to plastic working]. *Induktsionnyy nagrev*, 2008, no. 1, pp. 20–25.

6. Fomin, N.I., Zatulovskiy, L.M. *Elektricheskie pechi i ustanovki induktsionnogo nagreva* [Electric furnaces and induction heating installations]. Moscow: Metallurgiya, 1979. 247 p.

7. Shamov, A.N., Lunin, I.V., Ivanov, V.N. *Vysokochastotnaya svarka metallov* [High-frequency welding of metals]. Leningrad: Politekhnik, 1991. 240 p.

8. *Teoreticheskie osnovy i aspekty elektrotekhnologii. Fizicheskie printsipy i realizatsiya. Intensivnyy kurs. Osnovy I* [Theoretical background and aspects of electrotechnologies. Physical principles and realization. Intensive course. Fundamentals I]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU «LETI», 2013. 359 p.

9. Filippov, K.P., Kubyshekin, V.I. *Novye oblasti primeneniya induktsionnogo nagreva – kamernye induktsionnye pechi* [New areas of application for induction heating – batch-type induction furnaces]. *Induktsionnyy nagrev*, 2008, no. 4, pp. 41–43.

10. Chernyshov, G.G., Shashina, D.M. *Oborudovanie i osnovy tekhnologii svarki metallov plavleniem i davleniem* [Equipment and fundamentals of the technology of metal welding by melting and pressure]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo «Lan'», 2013. 464 p.

11. Semenov, A.N., Onishchenko, S.V., Rivkin, E.Yu., Plyshevskiy, M.I., Novozhilov, S.N., Gor-do, V.P., Shevelev, G.N. *Sposob diffuzionnoy svarki v vakuume mnogoslonykh izdeliy iz raznorodnykh nerzhavayushchikh staley* [Method of multi-layer vacuum diffusion welding of products from dissimilar stainless steels]. Patent RF, no. 2387524, 2010.

12. Korolev, A.N., Tyutikov, V.V., Dolgikh, I.Yu., Orlov, A.S. *Sposob induktsionno-stykovoy svarki profilyey razlichnoy konfiguratsii* [Method of induction-butt welding of profiles of various configurations]. Patent RF, no. 2558802, 2015.

13. Prakht, V.A., Dmitrievskiy, V.A., Sarapulov, F.N. *Modelirovanie teplovykh i elektromagnitnykh protsessov v elektrotekhnicheskikh ustanovkakh* [Modeling of thermal and electromagnetic processes in electrical installations]. Moscow: Izdatel'stvo «Sputnik+», 2011. 158 p.

14. Konstantinov, O.Ya. *Magnitnaya tekhnologicheskaya osnastka* [Magnetic processing equipment]. Leningrad: Mashinostroenie, 1974. 384 p.

15. Aliferov, A., Lupi, S. *Induktsionnyy i ehlektrokontaktnyy nagrev* [Induction and direct resistance heating]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2011. 411 p.

16. Dolgikh, I.Yu., Korolev, A.N., Zakharov, V.M. *Modelirovanie dinamiki temperaturnykh protsessov pri induktsionnom nagreve* [Simulation of thermal processes dynamics under induction heating]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 5, pp. 57–63.

Долгих Иван Юрьевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии,
e-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

Dolgikh Ivan Yuryevich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Theoretical Basics of Electrical
Engineering and Electric Technologies,
e-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

Корюкин Лев Борисович,

ООО «ЧПУ Технологии» (Иваново),
технический директор,
e-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

Koryukin Lev Borisovich,

ООО «CNC Technology» (Ivanovo),
Chief Technology Officer,
e-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru