

УДК 681.518

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ*

К.С. Пешкин

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

E-mail: kir.peschkin@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке проблемно-ориентированной численной модели процесса зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки. Проанализирован рынок программных продуктов (ПП) для численного решения задач различной физической природы и обоснован выбор наиболее универсального пакета для решения взаимосвязанных тепловой и электромагнитной задач – ПП ANSYS Mechanical APDL. Приведены ключевые для решения поставленной задачи функции и конкурентные преимущества программного пакета. Подробно рассмотрены последовательные этапы построения осесимметричной модели трехсекционной нагревательной установки: присвоение постоянных и нелинейных физических свойств материалов заготовки и индуктора; задание конструктивных и режимных характеристик системы «заготовка – индуктор» в параметрическом виде; построение осесимметричной геометрической модели системы; реализация возможности автономного управления токами секций индуктора; определение и присвоение конечных элементов; наложение конечно-элементной сетки, задание начальных и граничных условий. Приведен анализ результатов моделирования. Реализованная численная модель процесса зонного индукционного нагрева ориентирована на интеграцию в специальную оптимизационную процедуру, основанную на альтернативном методе параметрической оптимизации и направленную на снижение отклонений результирующих температурных распределений от требуемого профиля, оцениваемых в равномерной метрике.

Ключевые слова: Зонный индукционный нагрев, программный пакет, ANSYS Mechanical APDL, метод конечных элементов, краевые условия, численная модель

Введение

Термическая обработка металлических заготовок является обязательным этапом перед операциями их пластической деформации в промышленном производстве. Основной целью термообработки деталей является изменение их механических свойств, таких как твердость, прочность и упругость, а также устранение опасных напряжений в структуре металла, которые могут привести к короблению и образованию трещин на последующих стадиях обработки изделия.

* Кирилл Сергеевич Пешкин, аспирант кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов»

Для термической обработки больших партий металлических полуфабрикатов часто применяют электротермические способы термообработки, в частности процесс индукционного нагрева, имеющий очевидные преимущества перед типовыми пламенными способами нагрева [1, 2, 3–5].

Отличительной особенностью индукционной термообработки являются широкие возможности гибкого управления и оптимизации процесса, позволяющие повысить эффективность нагрева за счет достижения экстремальных значений критерия оптимальности. Проблемы оптимизации процесса индукционного нагрева по типовым критериям качества, сводящиеся к поиску оптимальных значений конструкционных и режимных параметров индукционных нагревательных установок (ИНУ), рассматриваются в работах А.Г. Бутковского, В.С. Немкова, Ю.В. Егорова, Э.Я. Рапопорта, Л.С. Зимина, А.И. Данилушкина, П. Ди Барбы, Б. Наке, М. Форзана, Э. Бааке, М.Ю. Лившица, Ю.Э. Плешивцевой, В.Б. Демидовича и др. [1, 6–11].

Для анализа качества процессов индукционного нагрева применяются современные программные пакеты, позволяющие проводить численный конечно-элементный анализ сложных нелинейных мультифизических задач. Пакеты, связанные с анализом электромагнитных и температурных полей, позволяют решать систему взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье, описывающую процесс индукционного нагрева [12]. Численная модель индукционной нагревательной системы «заготовка – индуктор» строится на основе конкретных конструктивных и режимных параметров и учитывает теплофизические свойства материалов, условия взаимодействия с окружающей средой и иные факторы, влияющие на процесс нагрева.

В статье приводится статистический анализ использования программного пакета (ПП) ANSYS для численного моделирования физических процессов и рассматривается процесс построения проблемно-ориентированной численной модели процесса зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки, разрабатываемой для решения задачи оптимального управления и проектирования зонной ИНУ. Рассматриваются специфические особенности построения модели, связанные с реализацией возможности автономного управления секциями индуктора. На основе полученных результатов численного моделирования поставлены задачи на следующие работы.

Численная модель зонной индукционной установки предлагает большие возможности для инженерного анализа и оптимизации процесса нагрева стальной заготовки под обработку давлением [13, 14]. Кроме того, она может стать основой для создания цифрового двойника, являющегося одним из основных элементов сложных автоматизированных интеллектуальных систем управления технологическими процессами и киберфизических промышленных систем [15].

Содержательная постановка задачи исследования

В сфере современного промышленного производства большое внимание уделяется совершенствованию и оптимизации технологических процессов с целью сокращения затрат материальных и энергетических ресурсов и повышения качества конечных продуктов. В частности, в области промышленного применения технологий индукционного нагрева стремление к инновациям проявляется в разработке методов достижения специфичных температурных профилей для различных видов продукции. Эта тенденция позволяет перейти от традиционной

практики равномерного нагрева к более целенаправленному и эффективному способу, известному как зонный индукционный нагрев.

Особенность зонного индукционного нагрева заключается в интенсивном нагреве определенных участков заготовки, подвергаемых в дальнейшем операциям пластической деформации. При этом остальные участки заготовки нагреваются до некоторой меньшей температуры для предотвращения коробления металла и образования трещин. Таким образом, основной задачей зонной ИНУ является точная локализация процесса нагрева для достижения заданного температурного профиля [16]. Промышленное применение методики зонного индукционного нагрева позволяет с высокой точностью контролировать требуемое температурное распределение по объему заготовки, что существенно сказывается на экономии материальных и энергетических ресурсов при повышении качества конечной продукции.

В настоящем исследовании рассматривается процесс зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки (рис. 1, *а*) в трехсекционном индукторе (рис. 1, *в*). По длине стальной заготовки определены три зоны нагрева – ДУ1, ДУ2, ДУ3 и переходные зоны ПЗ между участками, которые напрямую не нагреваются (рис. 1, *б*). Зону ДУ2 требуется нагреть до температуры 1250 °С с допустимым отклонением температуры ± 30 °С, поскольку предполагается, что в дальнейшем именно этот участок будет подвергаться операциям пластической деформации. Центральную зону ДУ1 (теплоизолированный центр заготовки) и зону ДУ3 (наиболее близкую к торцу заготовки) требуется нагреть до температуры 950 °С с допустимым отклонением температуры ± 30 °С (см. рис. 1, *б*) для сохранения температурного перепада по длине заготовки. При этом должны соблюдаться технологические ограничения на максимальную температуру нагрева стальной заготовки (1350 °С – температура плавления стали) и минимальную температуру нагрева заготовки перед операциями пластической деформации (700 °С – температура, по достижении которой снимаются внутренние напряжения) [17].

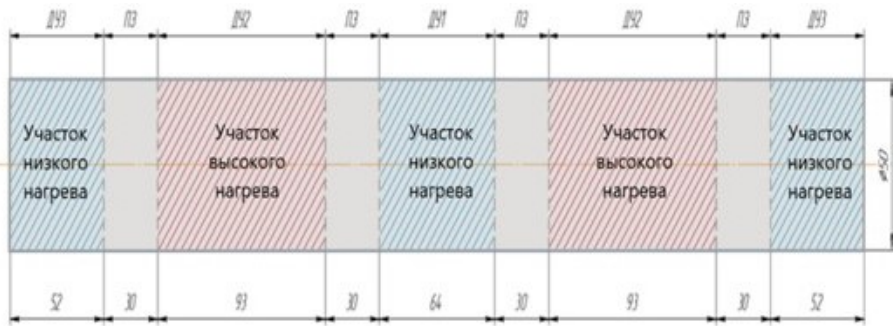
Для достижения заданного конечного, неравномерного по длине заготовки температурного распределения проектируется зонная ИНУ, которая представляет собой индуктор с тремя независимыми секциями (см. рис. 1, *в*). Каждая секция индуктора характеризуется набором параметров: длиной секции L_i , числом равномерно расположенных вдоль секции витков N_i и подведенным к этим виткам питающим током I_i .

Целью настоящего исследования является разработка численной модели процесса зонного индукционного нагрева ориентированной на анализ процесса и реализацию процедуры оптимизации конструктивных и режимных параметров ИНУ, направленной на достижение требуемого конечного температурного распределения на поверхности стальной заготовки (см. рис. 1, *б*) с максимальной точностью. Выбор программного пакета и построение численной модели процесса зонного индукционного нагрева подробно описаны далее.

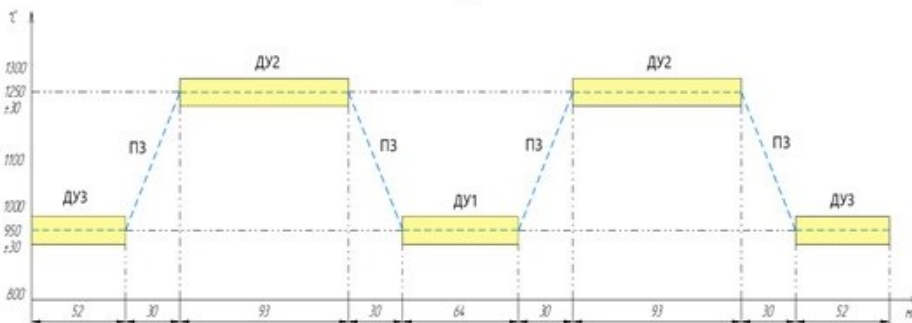
Современные программные пакеты для численного моделирования

В настоящее время на рынке программного обеспечения представлен большой выбор пакетов численного моделирования, предназначенных для инженерного анализа и опытно-конструкторских расчетов. В большинстве программных пакетов реализуется метод конечных элементов (МКЭ), который представляет

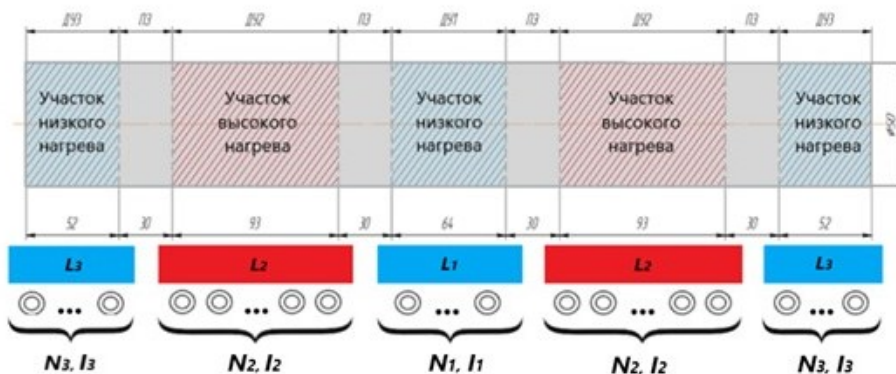
собой наиболее распространенный способ анализа дифференциальных уравнений в частных производных при решении широкого спектра инженерных задач, включая, но не ограничиваясь исследованиями в области механики деформируемого твердого тела, теплопередачи, гидродинамики и электромагнетизма [18].



а)



б)



в)

Рис. 1. Исходные данные для задачи исследования:

a – стальная цилиндрическая заготовка;

б – требуемое конечное температурное распределение; *в* – зонный индуктор

Подробный анализ программных пакетов численного моделирования физических процессов, актуальных для решения инженерных задач различной степе-

ни сложности, представлен в [19]. При выборе ПП для численного моделирования необходимо исходить из требований решаемой задачи, учитывая основные функциональные возможности программных пакетов, к которым относятся типы решаемых физических задач, возможности геометрического проектирования, особенности задания физических свойств материала, архитектура ПП и возможность его интеграции в другие программные средства.

Исходя из содержательной постановки задачи исследования, определенной в предыдущем пункте, на основе сравнительного анализа в [19] ПП ANSYS выбран в качестве инструмента для построения численной модели индукционной установки зонного нагрева, ориентированной на последующее использование при решении задач оптимизации. ANSYS представляет собой многоцелевой программный пакет для численного моделирования физических процессов и явлений в области механики, динамики жидкостей и газов, теплофизики, электромагнетизма и акустики [20]. Он обладает широкими функциональными возможностями для численного моделирования процессов индукционного нагрева: решением совмещенных электромагнитной и тепловой задач, моделированием кинематического движения, проведением статических и динамических расчетов, выбором различных типов конечных элементов, заданием нелинейных свойств материалов, геометрическим проектированием в 2D/3D-областях, наличием встроенного алгоритмического языка APDL (на базе языка FORTRAN), интеграцией с другими программными средствами с использованием специальных команд.

ANSYS.Inc является одним из крупнейших продавцов на рынке CAE продуктов (Computer-Aided Engineering – систем для расчета, анализа и моделирования физических процессов), что подтверждается статистическим анализом. На рис. 2, а представлены ключевые финансово-экономические показатели ANSYS.Inc, которые отражают эффективность коммерческой деятельности компании. Исходя из приведенных данных, ANSYS.Inc имеет средний ежегодный прирост в выручке 11,9 %, в EBITDA – 8,2 % и в чистой прибыли – 12,6 %, что характеризует ANSYS.Inc не только как эффективную, но и как развивающуюся компанию. Коммерческая деятельность ANSYS.Inc характеризуется постоянным расширением рынка сбыта и информационной поддержки, что подтверждается присутствием офисов компании более чем в 25 странах мира и постоянно растущим штатом сотрудников (рис. 2, в). Среди потребителей продуктов ANSYS.Inc выделяются такие крупные производители, как Exxon, Caterpillar, General Electric, Siemens и т. д. (рис. 2, б). Наличие таких крупных мировых потребителей ПП Ansys характеризует данный пакет программ как высококачественный и многофункциональный продукт, позволяющий решать широкий спектр инженерных задач различной степени сложности. Кроме того, ПП Ansys постоянно совершенствуется и дополняется новыми модулями и функциями, реализуемыми в периодически выходящих новых версиях продукта (рис. 2, з).

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что ANSYS представляет собой в достаточной степени универсальный и надежный программный пакет, обладающий подробными официальными и пользовательскими руководствами и позволяющий решать взаимосвязанные электромагнитные и тепловые задачи. Ниже подробно рассматривается процесс построения проблемно-ориентированной численной модели зонной индукционной нагревательной установки (см. рис. 1, в).



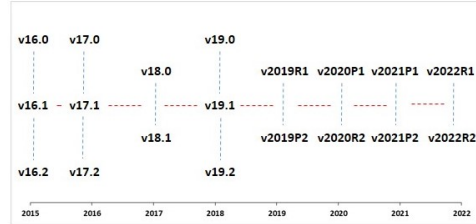
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 2. Статистический анализ ПП ANSYS:

a – ключевые финансовые показатели ANSYS, Inc [21]; *б* – основные потребители ПП ANSYS [22];
в – число сотрудников в ANSYS, Inc [21]; *г* – версии ПП ANSYS за период 2015–2022 гг.

Численное моделирование процесса зонного индукционного нагрева в ПП Ansys Mechanical APDL

Процесс индукционного нагрева представляет собой сложное явление, основанное на принципе электромагнитной индукции, генерирующей вихревые токи в материале и вызывающей его нагрев из-за Джоулева тепла. В общем виде математическая модель периодического процесса индукционного нагрева может быть представлена системой взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье, описывающей поведение электромагнитного и теплового полей и дополненной краевыми условиями [1]:

$$\left. \begin{aligned}
 \operatorname{rot} \vec{H} &= \sigma(T(\vec{x}; t)) \vec{E}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\
 \operatorname{div} \vec{B} &= 0; \operatorname{div} \vec{E} = 0; \\
 \vec{D} &= \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}; \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}; \vec{J} = \sigma \vec{E}; \\
 \alpha(T(\vec{x}; t)) \frac{\partial T(\vec{x}; t)}{\partial t} &= \operatorname{div}(\beta(T(\vec{x}; t)) \operatorname{grad} T(\vec{x}; t)) + F(\vec{x}; T(\vec{x}; t); u); \\
 t &\in (0; \tau^0); \vec{x}(x; y); T(\vec{x}; 0) = T_0(\vec{x}).
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля; $\sigma(T)$ – электрическая проводимость; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля; \vec{D} – вектор плотности электрического потока; t – время; \vec{B} – вектор плотности магнитного потока; $T(\vec{x}; t)$ – пространственно-временное распределение температуры; $\vec{x}(x; y)$ – вектор пространственных координат; $\alpha(T(\vec{x}; t))$ – коэффициент тепло-

отдачи в окружающую среду; $\beta(T(\bar{x};t))$ – коэффициент теплопроводности; $F(\bar{x};T(\bar{x};t);u)$ – удельная мощность внутренних электромагнитных источников тепла; $u(\bar{x};t)$ – управляющее воздействие; $T_0(\bar{x})$ – начальное пространственное распределение температуры; τ^0 – время окончания процесса нагрева [1].

Процесс численного моделирования в ANSYS Mechanical APDL [26] может быть выполнен с использованием двух платформ на выбор пользователя: встроенного графического интерфейса программного пакета или специализированного программного языка ANSYS APDL.

В общем случае процесс построения модели зонного индукционного нагрева можно условно представить в виде следующих этапов:

- выбор типа решаемой задачи;
- задание физических свойств материалов;
- проектирование геометрической модели системы «индуктор – заготовка»;
- определение типов конечных элементов;
- присвоение соответствующих свойств областям и элементам;
- формирование конечно-элементной сетки;
- задание начальных и граничных условий,

после которых происходит итерационное решение задач электромагнитного и теплового анализа (рис. 3) [24].

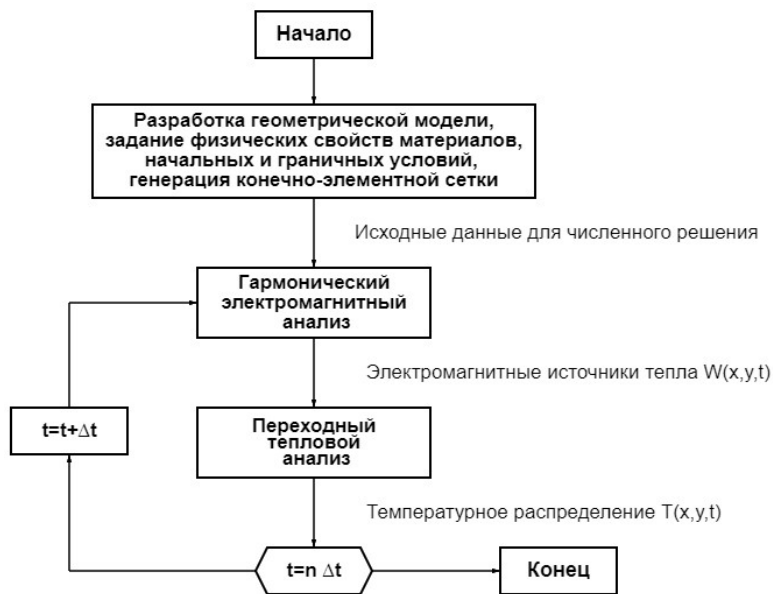


Рис. 3. Последовательность решения задачи численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева

Исходными данными для численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева являются физические свойства материалов, к которым относятся материал заготовки и материал витков индуктора (медь). Заготовка выполнена из стали марки С45, химический состав которой приведен в табл. 1. Данный тип стали относится к конструкционным углеродистым качественным

сталей, отличающимся хорошей физической устойчивостью к интенсивным нагрузкам, трениям и ударам, резистивностью к агрессивным погодным условиям и перепадам температур, отсутствием отпускной хрупкости и т. д. [25]. Химический состав стали С45 обеспечивает описанные выше эксплуатационные преимущества изделий и обуславливает физические свойства стали, заданные в виде постоянных или нелинейных параметров и представленные в табличной форме (табл. 2, 3) и графическом виде (рис. 4, 5).

Таблица 1

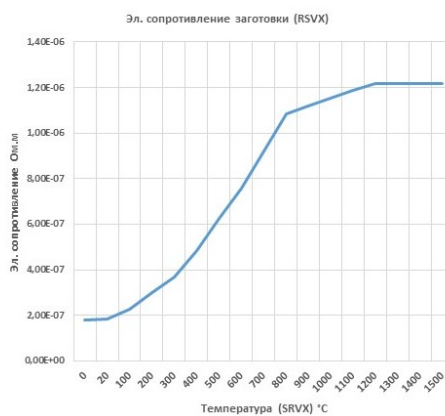
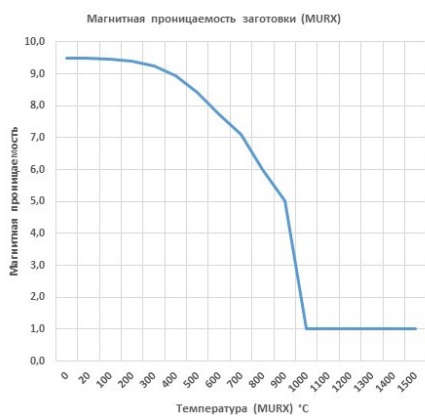
Химический состав стали марки С45

Класс стали	Марка	Доля элементов, %							
		С	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
					Не более				
Нелегированные специальные	45	0.42–0.50	0.17–0.37	0.50–0.80	0.03	0.035	0.25	0.3	0.3

Таблица 2

Физические свойства стали марки С45 и меди для решения электромагнитной задачи

Температура (MURX) °С	Магнитная проницаемость заготовки (MURX), [1]	Магнитная проницаемость проводника (MURX), [1]	Температура (RSVX) °С	Электрическое сопротивление заготовки (RSVX), [Ом·м]	Электрическое сопротивление проводника (RSVX), [Ом·м]
0	9.5	1.0	0	1.80E-07	2.0e-8
20	9.5		20	1.85E-07	
100	9.5		100	2.27E-07	
200	9.4		200	2.99E-07	
300	9.2		300	3.70E-07	
400	9.0		400	4.85E-07	
500	8.4		500	6.25E-07	
600	7.7		600	7.57E-07	
700	7.1		700	9.22E-07	
800	6.0		800	1.09E-06	
900	5.0		900	1.12E-06	
1000	1.0		1000	1.15E-06	
1100	1.0		1100	1.19E-06	
1200	1.0		1200	1.22E-06	
1300	1.0		1300	1.22E-06	
1400	1.0		1400	1.22E-06	
1500	1.0		1500	1.22E-06	



а)

б)

Рис. 4. Электромагнитные свойства стали С45:
 а – зависимость магнитной проницаемости от температуры;
 б – зависимость электрического сопротивления от температуры

Таблица 3

Физические свойства стали С45 для решения тепловой задачи

Температура (KXX) °C	Теплопроводность, (KXX), [Вт/м.°K]	Температура (C) °C	Удельная теплоемкость, (C), [Дж/кг.°K]	Плотность (DENS), [кг/м ³]	Коэффициент конвективной теплоотдачи, (Alphasteel), [Вт/(м ² K)]	Коэффициент теплоотдачи излучением, (Emissteel), [1]
20	48.0	20	474.6	7800	5.0	0.85
100	47.2	100	487.9			
200	45.8	200	501.2			
300	42.5	300	523.4			
400	39.1	400	545.7			
500	35.4	500	573.8			
600	31.7	600	601.8			
700	27.6	700	649.1			
800	23.5	800	696.3			
900	25.1	900	693.8			
1000	26.6	1000	691.3			
1100	28.0	1100	688.8			
1200	29.3	1200	686.3			
1300	29.7	1300	686.0			
1400	30.0	1400	686.0			
1500	30.0	1500	686.0			

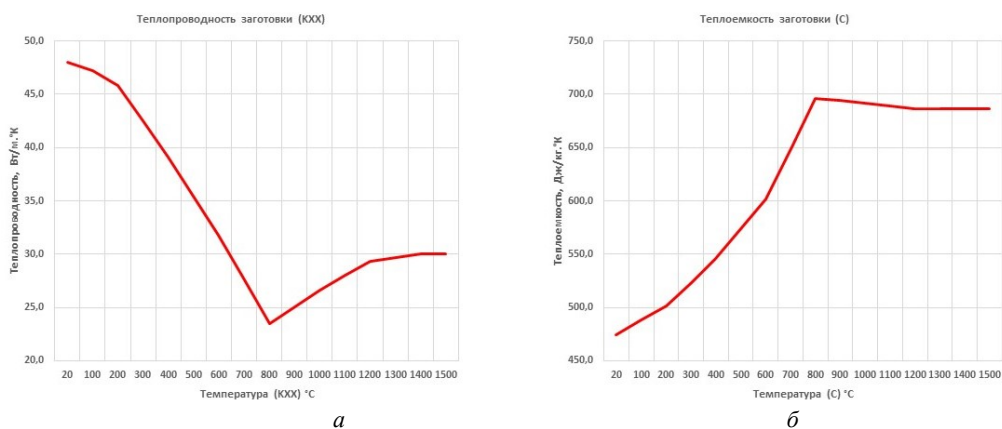


Рис. 5. Теплофизические свойства стали С45:
а – зависимость теплопроводности от температуры;
б – зависимость теплоемкости от температуры

После задания теплофизических и электромагнитных свойств материалов проектируется двумерная осесимметричная геометрическая модель системы «заготовка – индуктор» (рис. 6, *а*), которая включает цилиндрическую заготовку, три секции индуктора (с равномерно расположенными на них витками) и окружающую среду (воздух), область которой впоследствии определяется таким образом, чтобы ее увеличение не повлияло на точность решения тепловой задачи.

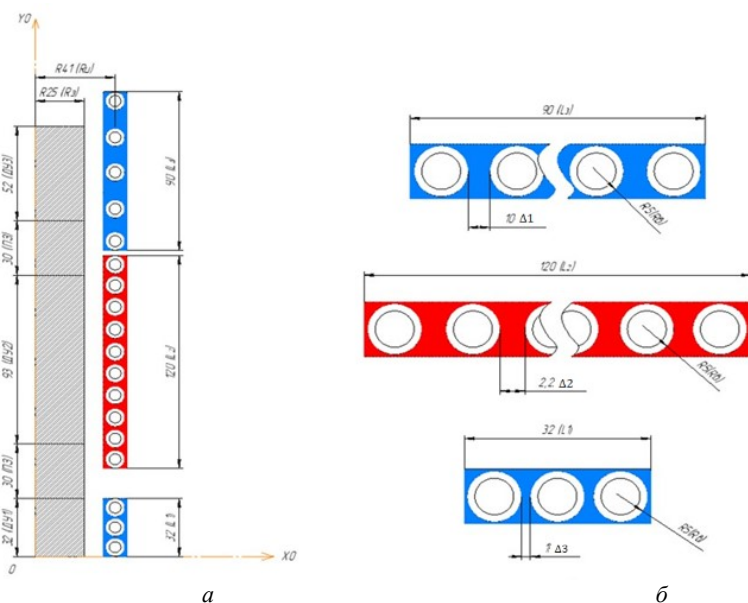


Рис. 6. Схематичное изображение геометрической модели системы «заготовка – индуктор»:
а – общий вид системы; *б* – секции индуктора

Рассматриваемая в работе осесимметричная заготовка (см. рис. 1, *a*), характеризующаяся длиной L_3 , равной сумме длин зон нагрева (ДУ1, ДУ2, ДУ3) и переходных зон ПЗ, и диаметром D_3 , проектируется таким образом, чтобы горизонтальная ось X0 и вертикальная ось Y0 являлись осями симметрии. В таком случае рассматривается только четверть системы «заготовка – индуктор», что существенно снижает требования к вычислительным мощностям ЭВМ и ускоряет процесс численного моделирования в ANSYS Mechanical APDL за счет сокращения числа узлов сеточного разбиения и количества конечных элементов.

Разрабатываемая численная модель ориентирована на её последующее использование в процедуре решения оптимизационной задачи, обеспечивающей достижение заданного конечного температурного распределения на поверхности заготовки (см. рис. 1, *b*) с максимальной точностью. Это проявляется в специфических требованиях к проектированию ИНУ. В соответствии с заданным неравномерным температурным профилем проектируется трехсекционный индуктор (рис. 6, *b*), каждая секция которого характеризуется собственным набором параметров: длиной секции (L_1, L_2, L_3), числом равномерно расположенных в пределах каждой секции витков (N_1, N_2, N_3) и значением питающего тока (I_1, I_2, I_3).

Исходя из равномерного расположения витков вдоль секций (см. рис. 6, *b*) рассчитывается расстояние между витками Δ_i , которое зависит от числа витков в секции N_i , длины секции L_i и радиуса витков R_B :

$$\Delta_i = \frac{L_i - (N_i \times 2R_{Bi})}{N_i - 1}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

В отличие от известных моделей [26], где на секции индуктора подается общий ток I источника питания, т. е. $I_1 = I_2 = I_3 = I$, в настоящей модели реализуется возможность автономного управления токами для каждой секции индуктора. Такое построение модели открывает большие возможности при локальном управлении, контроле и оптимизации процесса зонного индукционного нагрева. Помимо задания значений токов (I_1, I_2, I_3) необходимо присвоить их элементам и узлам геометрической модели, что реализуется с использованием кодов, написанных на встроенном параметрическом языке ANSYS APDL.

В связи с тем, что проектируемая геометрическая модель является осесимметричной, возникает особенность в присвоении тока виткам первой секции индуктора. В случае, когда при осесимметричном рассмотрении первой секции L_1 число витков N_1 представляется дробным значением (при симметричном делении длины L_1 и числа витков N_1 пополам), значение N_1 округляется до целого числа. На рис. 7 и 8 представлены программные коды, реализующие присвоение токов элементам и узлам геометрической модели в случаях целочисленного и дробного значений N_1 соответственно.

Описанные выше характеристики процесса зонного индукционного нагрева, к которым относятся геометрические размеры системы «заготовка – индуктор», начальные и краевые условия, режимные параметры, задаются в параметрическом виде с помощью ANSYS APDL. Параметрическая форма позволяет оперативно изменять характеристики системы «заготовка – индуктор», вследствие чего пропадает необходимость полной перестройки модели. Исходные данные для

численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки представлены в табл. 4.

```

*IF,modulo1,EQ,0,THEN

*DO,inkrem_curr,1,%,((N3)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+inkrem_curr%,%,1000+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+inkrem_curr%,%,1000+inkrem_curr+7%
nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentm_r,currentm_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO

*DO,inkrem_curr,1,%,((N2)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentmM_r,currentmM_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO

*DO,inkrem_curr,1,%,((N1)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+((N3+N2)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3+N2)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+((N3+N2)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3+N2)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentm_r,currentm_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO

```

Рис. 7. Присвоение автономных токов элементам модели в случае целочисленного значения N_1

```

*ELSEIF,modulo1,NE,0,THEN

*DO,inkrem_curr,1,%,((N3)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+inkrem_curr%,%,1000+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+inkrem_curr%,%,1000+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentm_r,currentm_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO
  inkrem_curr=inkrem_curr+8

*DO,inkrem_curr,1,%,((N2)*8)%8
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentmM_r,currentmM_i
  esel,all
  nsel,all
  *ENDDO
  inkrem_curr=inkrem_curr+8

*DO,inkrem_curr,2,1,%,N1-0.5%,1
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  cp,next,volt,all
  esel,s,mat,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr%,%,1000+((N3)*8)+inkrem_curr+7%
  nsle
  *GET,nmin,NODE,0,NUM,MIN
  f,nmin,amps,currentm_r,currentm_i
  esel,all
  nsel,all
  inkrem_curr=inkrem_curr+8
  *ENDDO
*ENDIF

```

Рис. 8. Присвоение автономных токов элементам модели в случае дробного значения N_1

**Исходные данные для численного моделирования процесса
зонного индукционного нагрева**

№	Наименование параметра	Значение
1	Начальная температура заготовки, $T_{нач}$, °С	20
2	Длительность стадии индукционного нагрева, τ^0 , с	20
3	Требуемая температура нагрева участков ДУ1 и ДУ3, $T_{1,3}$, °С	950
4	Требуемая температура нагрева участков ДУ2, T_2 , °С	1250
5	Критическая температура заготовки, $T_{кр}$, °С	1350
6	Длина заготовки, L_3 , мм	237
7	Радиус заготовки, R_3 , мм	25
8	Конструкционная углеродистая качественная сталь, (марка)	C45
9	Частота тока индуктора, f , Гц	527
10	Шаг расчета модели, с	1
11	Длина первого участка нагрева, ДУ1, мм	32
12	Длина второго участка нагрева, ДУ2, мм	93
13	Длина третьего участка нагрева, ДУ3, мм	52
14	Длина переходной зоны, ПЗ, мм	30
15	Длина первой секции индуктора, L_1 , мм	35
16	Длина второй секции индуктора, L_2 , мм	128
17	Длина третьей секции индуктора, L_3 , мм	64
18	Число витков на первой секции индуктора, N_1 , шт	2
19	Число витков на второй секции индуктора, N_2 , шт	12
20	Число витков на третьей секции индуктора, N_3 , шт	4
21	Расстояние между витками первой секции индуктора, Δ_1 , мм	13
22	Расстояние между витками второй секции индуктора, Δ_2 , мм	0.5
23	Расстояние между витками третьей секции индуктора, Δ_3 , мм	5.5
24	Радиус индуктора, R_{II} , мм	94
25	Радиус витков индуктора, R_B , мм	5
26	Сила тока витков первой секции индукторов, I_1 , А	4744
27	Сила тока витков второй секции индукторов, I_2 , А	4744
28	Сила тока витков третьей секции индукторов, I_3 , А	4744

После задания исходных для ранее построенной геометрической модели данных необходимо сгенерировать конечно-элементную сетку, для чего осуществляется выбор и присвоение типов конечных элементов (КЭ), требуемых для решения задач анализа. Библиотека элементов ANSYS обладает широким набором типов конечных элементов для анализа полей различной физической природы [26]. Выбор КЭ обуславливается спецификой решаемых задач, так как уникальность каждого конечного элемента в библиотеке определяется двумя основными свойствами элементов: числом степеней свободы, определяющим тип решаемой задачи, и формой (размерностью) конечного элемента.

Процесс индукционного нагрева, представляющий собой взаимодействие электромагнитного и теплового полей, описывается уравнениями Максвелла и Фурье (1), что напрямую влияет на выбор типов конечных элементов при построении численной модели. Для решения тепловой задачи библиотека ANSYS предлагает тип конечного элемента PLANE13, для электромагнитной задачи – PLANE55 [26].

КЭ типа PLANE13 используется в решении двумерных взаимосвязанных задач магнитной, электрической, тепловой природы и механики сплошных сред. Он определяется четырьмя узлами с четырьмя степенями свободы на каждый узел (рис. 9, а). КЭ PLANE13 позволяет моделировать зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля (кривые В-Н) и обладает высоким потенциалом жесткости при изгибе и напряжении [26, 13].

КЭ типа PLANE55 используется в решении двумерных задач теплопроводности как плоский или осесимметричный кольцевой элемент. Он определяется четырьмя узлами с одной степенью свободы на каждый узел (рис. 9, б). В основном его применяют для двумерного стационарного или переходного теплового анализа [26, 13].

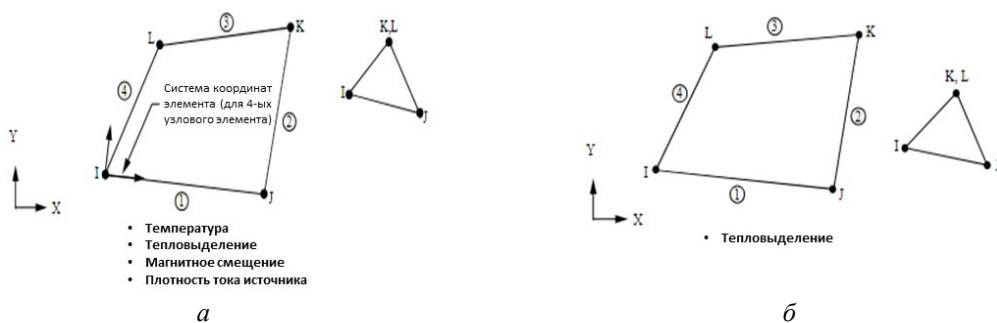


Рис. 9. Схематичное изображение КЭ численной модели процесса зонного индукционного нагрева:
а – КЭ типа PLANE13; б – КЭ типа PLANE55

После определения типов КЭ на геометрическую модель накладывается четырёхугольная конечно-элементная сетка и все области геометрической модели делятся на определенное число элементов. Это число определяет компромисс между точностью получаемого решения и требованиями к вычислительной мощности ЭВМ (т. е. времени решения задачи). Соответственно, в областях заготовки и витков индуктора, где требуется высокая точность решения, конечно-элементная сетка обладает высокой дисперсностью (т. е. увеличенным числом элементов и узлов). Наложение конечно-элементной сетки является важным этапом численного моделирования, напрямую влияющим на результат решения задачи. Поэтому в ПП ANSYS реализована функция оценки качества сеточного разбиения, которая позволяет выявить области некорректного распределения КЭ.

На рис. 10 представлена система «заготовка – индуктор» с наложенной конечно-элементной сеткой, реализованной в ПП ANSYS Mechanical APDL. Оценка качества генерации сетки показала, что сеточное разбиение геометрии системы выполнено корректно, сетка КЭ включает в себя 10797 элементов и 11036 узлов.

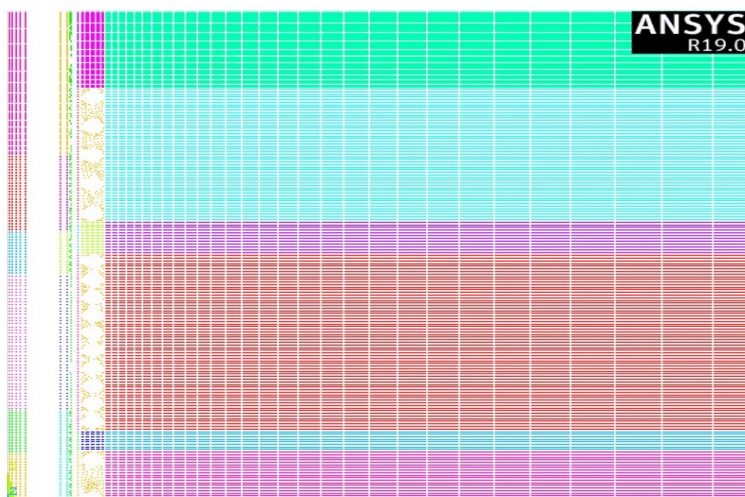


Рис. 10. Система «заготовка – индуктор» с наложенной конечно-элементной сеткой

Последним этапом задания исходных данных для численного моделирования является присвоение начальных и краевых условий, определенных ранее в параметрической форме. Начальные условия, к которым относится температура заготовки в нулевой момент времени $T_{нач}$, равная температуре воздуха $T_{возд}$, необходимы для определения параметров в каждом узле в нулевой момент времени при вычислении характеристик электромагнитного поля [9]. Граничные условия, к которым относятся коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена (Alphasteel и Emissteel соответственно), определяют взаимодействие нагреваемой заготовки с окружающей средой, т. е. конвективные потери и потери с излучением.

Как было сказано ранее, принцип работы ПП ANSYS Mechanical APDL основан на встроенном алгоритмическом языке, близком к FORTRAN, поэтому все введенные ранее параметры были записаны в соответствующие файлы (геометрическая модель, тепловые свойства, электромагнитные свойства, конечно-элементная сетка и т. д.). Данные файлы объединены главным файлом, который определяет сценарий расчета, т. е. содержит последовательность команд на открытие файлов и выполнение прописанных в этих файлах алгоритмов.

После запуска численной модели на решение сначала происходит определение магнитно-векторного и скалярного электрического потенциалов, после чего производится расчет количества выделенной тепловой энергии по закону Джоуля – Ленца, что необходимо для определения температурных полей [26]. Расчет двумерной модели занимает около 20–30 минут в зависимости от нагрузки процессора фоновыми приложениями. ПК, на котором производилось численное реше-

ние, имеет следующие технические характеристики: процессор Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU 2.40GHz, объем оперативной памяти 16 Гб, видеокарта NVIDIA GeForce GTX 1650 2 Гб, ОС Windows 10.0 64-разрядная.

Результаты численного решения

Основной целью построения численной модели процесса зонного индукционного нагрева в ПП ANSYS Mechanical APDL является анализ конечного температурного распределения на поверхности заготовки и определение его соответствия требованиям задания (см. рис. 1, б). Моделируемый процесс состоит из двух этапов: нагрева и охлаждения заготовки. На этапе нагрева длительностью $\tau^0 = 20$ с источник питания зонной ИУ включен; внутренние источники тепла индуцируются в заготовке. По окончании этапа нагрева ИУ отключается и нагретая заготовка естественно охлаждается при $T_{\text{возд}}$ на протяжении времени $\tau^{\text{охл}} = 10$ с. При оптимальной длительности охлаждения заготовки происходит выравнивание температурного распределения для его максимального приближения к профилю, требуемому для последующих технологических операций, за счет естественных тепловых потерь при отсутствии внутренних источников тепла.

Для анализа изменения температуры во времени выбраны 8 характерных точек (рис. 11), равномерно расположенных на поверхности заготовки. Изменение температуры во времени в характерных точках позволяет определить возможный момент достижения заготовкой критической температуры $T_{\text{кр}}$, при которой происходит недопустимый перегрев стали, и отображает описанное выше температурное выравнивание, начинающееся с момента времени $\tau^{\text{охл}} = 20,5$ с (см. рис. 11).

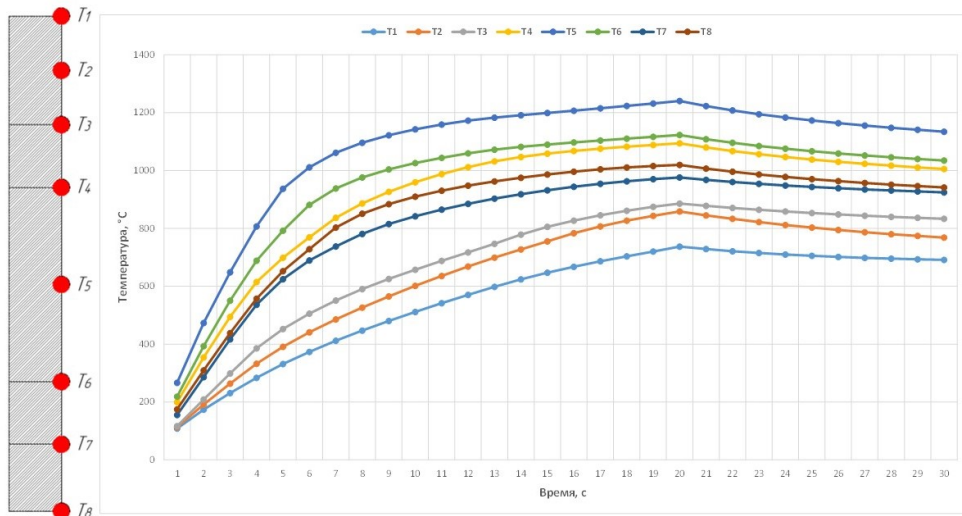


Рис. 11. Расположение критических точек на поверхности заготовки и изменение температуры в этих точках во времени

Перепад температур между критическими точками объясняется их расположением относительно поверхности заготовки. Максимальные значения темпера-

туры наблюдаются в точках Т4, Т5, Т6, расположенных в наиболее «горячей» зоне ДУ2 (нагреваемой второй секцией индуктора L_2). В точке Т8 можно наблюдать температуру теплоизолированного центра заготовки. Точки Т1, Т2 и Т3 отображают температуру зоны наиболее близкой к торцу заготовки, где наблюдаются наибольшие конвективные потери и потери с излучением. В связи с этим критические температуры третьего участка нагрева ДУ3 ниже остальных.

На рис. 12 представлено распределение температуры на поверхности заготовки в конечный момент времени, полученное в ходе численного моделирования при $I_1 = I_2 = I_3 = I = 4744$ А, $N_1 = 2$, $N_2 = 12$, $N_3 = 4$, $L_1 = 35$ мм, $L_2 = 128$ мм, $L_3 = 64$ мм [28].

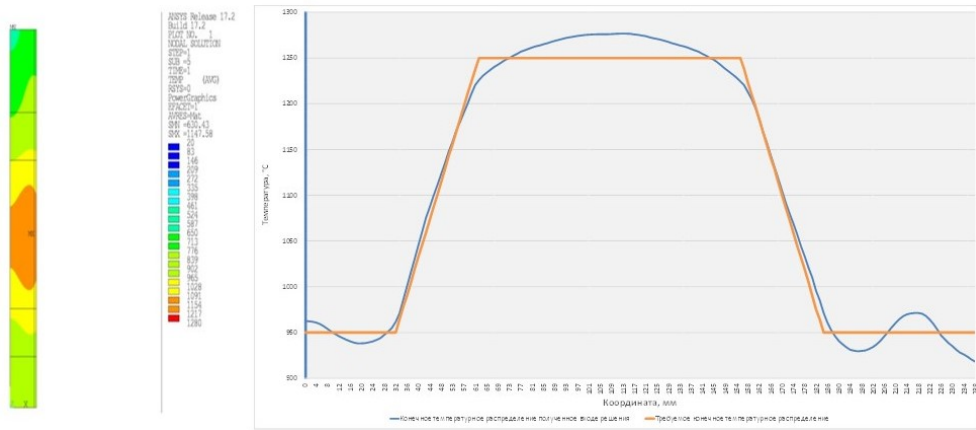


Рис. 12. Конечное температурное распределение на поверхности заготовки, полученное в ходе численного решения, в сравнении с требуемым конечным температурным распределением

Как видно из рисунка, полученное в ходе численного решения в ПП ANSYS конечное температурное распределение на поверхности заготовки приближено к требованиям задания (см. рис. 1, б). Однако отмечается существенный потенциал в снижении отклонений температуры от требуемой в пределах участков нагрева заготовки за счет реализации возможности автономного управления токами отдельно для каждой секции индуктора, что отличается от подхода, продемонстрированного в [28]. Для снижения отклонений температуры от требуемой (рис. 12) необходимо определение оптимальных значений характеризующих секции ИУ параметров, к которым относятся L_i , N_i , I_i , $i = 1, 2, 3$. При этом отклонение результирующего температурного распределения от заданного профиля целесообразно оценивать в равномерной метрике, которая соответствует наиболее строгим технологическим требованиям, предъявляемым к процессам нагрева перед операциями пластической деформации.

Применение специальных методов равномерной оптимизации, в частности альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами [1], для поиска оптимальных конструктивных и режимных параметров зонной ИУ с целью достижения максимально возможной точности нагрева, будет рассмотрено в дальнейших исследованиях.

Заключение

Анализ современных программных продуктов численного моделирования мультифизических электротехнологических процессов определил выбор ПП ANSYS Mechanical APDL как наиболее подходящего инструмента для моделирования процесса зонного индукционного нагрева. На выбор данного программного продукта повлияли его высокая производительность, возможность решать взаимосвязанные задачи различной физической природы, постоянная информационная поддержка и обновление, подробные руководства, построение геометрической 2D- и 3D-модели и т. д.

В статье представлены основные этапы и результаты численного моделирования в ПП ANSYS Mechanical APDL процесса зонного нагрева стальной цилиндрической заготовки в трехсекционной индукционной установке. Проанализированы временные диаграммы изменения температуры в характерных точках, расположенных на поверхности заготовки. Рассмотрены способы задания геометрических характеристик зонной ИУ в параметрическом виде, представлены постоянные и нелинейные физические свойства материалов заготовки и индуктора, построена осесимметричная геометрическая модель зонной ИУ. Описано построение индуктора, включающее проблемно-ориентированное представление секций индуктора и расположения на них витков, реализована возможность автономного управления токами для каждой секции индуктора, что является существенным отличием модели от известных [26] и позволяет в дальнейшем использовать ее в оптимизационных процедурах. Определены и описаны типы конечных элементов для решения взаимосвязанных тепловой и электромагнитной задач и определены начальные и граничные условия.

Полученное в ходе численного решения в ПП ANSYS конечное температурное распределение на поверхности заготовки обладает существенным потенциалом в снижении температурных отклонений от требуемого температурного распределения за счет реализованной возможности автономного управления токами отдельно для каждой секции индуктора. Для снижения температурных отклонений и достижения требуемого конечного температурного распределения необходимо применение специальной оптимизационной методики, основанной на альтернативном методе параметрической оптимизации [1]. Интеграция разработанной модели в оптимизационную процедуру позволит найти оптимальные по критерию максимальной точности нагрева конструктивные и режимные параметры зонной ИУ, что будет продемонстрировано в следующих работах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я., Плешевцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012. 309 с.
2. Бааке Э., Шпенст В.А. Последние научные исследования в сфере электротермической металлургической обработки // Записки Горного института, секция "Электромеханика и машиностроение". 2019. № 240. С. 660–668.
3. Лебедев Д.В., Готовкина Е.Е. Разработка конструкции индуктора для закалки детали сложной формы // Вестник ИГЭУ. 2023. № 3. С. 16–24.
4. Карпей Ф.С., Кузьмич И.А. Индукционный нагрев в кузнечно-прессовом производстве // Литьё и металлургия 2020 [Электронный ресурс]: сборник научных работ III Международной научно-практической интернет-конференции студентов и магистрантов, 18–19 ноября 2020 г. Минск: БНТУ, 2021. С. 8–10.
5. Петров П.А., Крутина Е.В., Калтин Ю.Г. Нагрев и нагревательные устройства в кузнечном производстве. Учебное пособие для вузов. М.: МГТУ «МАМИ», 2010. 110 с.

6. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с.
7. *Зимин Л.С.* Оптимальное проектирование систем индукционного нагрева в технологических комплексах обработки металла давлением: автореф. дис... докт. техн. наук. Л., 1987. 30 с.
8. *Данилушкин А.И.* Оптимальное управление процессом индукционного непрерывного нагрева: автореф. дис. канд. техн. наук. Ленинград, 1979. 16 с.
9. *Коломейцева М.Б., Панасенко С.А.* Оптимизация нагрева сплошного цилиндра в индукторе // Техническая кибернетика. Тр. МЭИ. М.: МЭИ, 1972. Вып. 95. С. 139–143.
10. *Лившиц М.Ю.* Разработка и исследование адаптивной системы оптимального управления процессом индукционного нагрева металла с прогнозирующей моделью: автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1982. 19 с.
11. *Демидович В.Б., Чмленко Ф. В., Растворова И.И.* Оптимальное проектирование индукционных нагревателей с использованием численных моделей // Индукционный нагрев. 2011. № 15. С. 6–10.
12. *Демидович В.Б.* Применение индукционного нагрева в металлургической промышленности. СПб., 2003.
13. Роль численного моделирования и продвинутых цифровых технологий в развитии различных отраслей промышленности // Материалы XVII Международной онлайн-конференции CAD/FEM/Ansys. CAD/CAM/CAE Observer #1 (141), 2021. С. 61–66.
14. *Azad M. Madni, Carla C. Madni, Scott D. Lucero* Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. 2019. № 7.
15. *Пешикин К.С.* Назначение и перспективы развития киберфизических систем управления технологическими процессами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. № 1. С. 47–59.
16. Моделирование температурного поля неравномерно нагретой по длине заготовки при ее остывании на штампе / *В.В. Кухарь, О.А. Лаврентик, В.А. Бурко, М.В. Крестников* // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2007. № 17. С. 125–129.
17. Сталь 45. Применение углеродистой конструкционной Стали 45 при производстве редукторов и цепных звёздочек // Stalcu.ru все про обработку металла URL: <https://stalcu.ru/temperatura-plavleniya-stali-45.html?ysclid=lojx4dvej6319835808> (дата обращения: 05.11.2023).
18. *Елисеев К.В., Зиновьева Т.В.* Вычислительный практикум в современных CAE-системах // Компьютерное моделирование. СПб.: СПбПУ, 2008. С. 36–54.
19. *Попов А.В.* Оптимальное проектирование индукционного нагревателя для поверхностной закалки в условиях интервальной неопределенности параметров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. № 3. С. 139–154.
20. Основы работы в ANSYS 17 / *Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова* М.: ДМК Пресс, 2017. 210.
21. STOCK ANALYSIS: сайт. URL: <https://stockanalysis.com/stocks/anss/company/> (дата обращения: 30.01.2024)
22. marketcap: сайт. URL: <https://marketcap.ru/stocks/BA/financial-statements/income-statement/market-cap/?ysclid=ls098hw011241832261> (дата обращения: 30.01.2024)
23. ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения 16.02.2024)
24. *Коришиков С.Е.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева цилиндрических слитков с учетом технологических ограничений: автореф. дис... канд. техн. наук. Самара, 2015. 24 с.
25. Марочник сталей и сплавов / *А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др.*; под ред. *А.С. Зубченко*. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
26. *Ennen M, Niedzwiecki I, Baake E.* Tailored heating of billets for hot forming using an induction heating approach. in Proceeding of XIX International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing: Plzen (Czech Republic), September 2–3. 2021.
27. *Павлушин А.В.* Совместная оптимизация конструктивных параметров индуктора и алгоритмов управления процессом нагрева под поверхностную закалку // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 3. С. 17–28.

28. *Пешкин К.С.* Параметрическая оптимизация конструкции индукционной установки для зонного нагрева деталей перед операцией пластической деформации // Сборник научных трудов. МНИЦ «Наукофера». Смоленск: Общество с ограниченной ответственностью «Смоленский социологический центр», 2022. С. 46–53.

Статья поступила в редакцию 17 февраля 2024 г.

PROBLEM-ORIENTED NUMERICAL MODEL OF THE PROCESS OF TAILORED INDUCTION HEATING OF A STEEL CYLINDRICAL BILLET*

K.S. Peshkin

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

E-mail: kir.peschkin@yandex.ru

Abstract. *The article is devoted to the development of a problem-oriented numerical model of the process of tailored induction heating of a steel cylindrical billet. The market of software products (SP) for the numerical solution of problems of various physical nature is analyzed and the choice of the most universal package for solving interrelated thermal and electromagnetic problems – ANSYS Mechanical APDL is justified. The key functions and competitive advantages of the software package for solving the task are given. The successive stages of building an axisymmetric model of a three-section heating system are considered in detail: assignment of constant and nonlinear physical properties of billet and inductor materials; setting the design and operating characteristics of the "billet-inductor" system in parametric form; construction of an axisymmetric geometric model of the system; realization of the possibility of autonomous control of the currents of the inductor sections; definition and assignment of finite elements; superimposing a finite element grid, setting initial and boundary conditions. The analysis of the simulation results is given. The implemented numerical model of the tailored induction heating process is focused on integration into a special optimization procedure based on the alternanse parametric optimization method and aimed at reducing deviations of the resulting temperature distributions from the required profile, estimated in a uniform metric.*

Keywords: *Tailored induction heating, software package, ANSYS Mechanical APDL, the finite element method, boundary conditions, numerical model*

REFERENCES

1. *Rapoport E.Ya., Pleshevtseva Yu.E.* Optimal'noye upravleniye temperaturnymi rezhimami induktsionnogo nagreva [*Optimal control of temperature conditions of induction heating*]. M.: Nauka, 2012. 309 p. (In Russian).
2. *Baake E., Shpenst V.A.* Posledniye nauchnyye issledovaniya v sfere elektrotermicheskoy metallurgicheskoy obrabotki [*Latest scientific research in the field of electrothermal metallurgical processing*] // *Zapiski Gornogo instituta, sektsiya "Elektromekhanika i mashinostroyeniye"*. 2019. № 240. Pp. 660–668. (In Russian).
3. *Lebedev D.V., Gotovkina E.E.* Razrabotka konstruktsii induktora dlya zakalki detali slozhnoy formy [*Development of an inductor design for hardening parts of complex shape*] // *Vestnik IGEU*. 2023. № 3. Pp. 16–24. (In Russian).
4. *Karpey F.S., Kuz'mich I.A.* Induktsionnyy nagrev v kuznechno-pressovom proizvodstve [*Induction heating in forging and press production*] // *Lit'yë i metallurgiya 2020 [Elektronnyy resurs]: sbornik nauchnykh rabot III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet konferentsii studentov i magistrantov, 18–19 noyabrya 2020 g.* Minsk: BNTU, 2021. Pp. 8–10. (In Russian).
5. *Petrov P.A., Krutina E.V., Kalpin YU.G.* Nagrev i nagrevatel'nyye ustroystva v kuznechnom proizvodstve [*Heating and heating devices in forging*]. M.: MGTU «MAMI», 2010. 110 p. (In Russian).

* *Kirill S. Peshkin, Postgraduate Student*

6. *Rapoport E.YA.* Al'ternansnyy metod v prikladnykh zadachakh optimizatsii [Alternance method in applied optimization problems]. M.: Nauka, 2000. 336 p. (In Russian).
7. *Zimin L.S.* Optimal'noye proyektirovaniye sistem induktsionnogo nagreva v tekhnologicheskikh kompleksakh obrabotki metalla davleniyem [Optimal design of induction heating systems in metal forming technological complexes]: avtoref. dis... dokt. tekhn. nauk. L., 1987. 30 p. (In Russian).
8. *Danilushkin A.I.* Optimal'noye upravleniye protsessom induktsionnogo nepreryvnogo nagreva [Optimal control of the continuous induction heating process]: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. L., 1979. 16 p. (In Russian).
9. *Kolomeytseva M.B., Panasenko S.A.* Optimizatsiya nagreva sploshnogo tsilindra v induktore [Optimal control of the continuous induction heating process] // Tekhnicheskaya kibernetika, Tr. MEI. M.: MEI, 1972. Vip. 95. Pp. 139–143. (In Russian).
10. *Livshits M.Yu.* Razrabotka i issledovaniye adaptivnoy sistemy optimal'nogo upravleniya protsessom induktsionnogo nagreva metalla s prognoziryuyushchey model'yu [Development and research of an adaptive system for optimal control of the process of induction heating of metal with a predictive model]: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk. M., 1982. 19 p. (In Russian).
11. *Demidovich V.B., Chmilenko F.V., Rastvorova I.I.* Optimal'noye proyektirovaniye induktsionnykh nagrevateley s ispol'zovaniyem chislennykh modeley [Optimal design of induction heaters using numerical models] // Induktsionnyy nagrev. 2011. № 15. Pp. 6–10. (In Russian).
12. *Demidovich V.B.* Primeneniye induktsionnogo nagreva v metallurgicheskoy promyshlennosti [Application of induction heating in the metallurgical industry]. SPb., 2003. (In Russian).
13. Rol' chislennogo modelirovaniya i prodvinutykh tsifrovyykh tekhnologiy v razvitiy razlichnykh otrasley promyshlennosti [The role of numerical modeling and advanced digital technologies in the development of various industries] // Materialy XVII Mezhdunarodnoy onlayn-konferentsii CADFEM/Ansys. CAD/CAM/CAE Observer #1 (141), 2021. Pp. 61–66. (In Russian).
14. *Azad M. Madni, Carla C. Madni, Scott D. Lucero* Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering // Systems. 2019. № 7.
15. *Peshkin K.S.* Naznachenkiye i perspektivy razvitiya kiberfizicheskikh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Purpose and prospects for the development of cyber-physical process control systems] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije nauki. 2023. № 1. Pp. 47–59. (In Russian).
16. Modelirovaniye temperaturnogo polya neravnomerno nagretoy po dline zagotovki pri yeye ostyvaniy na shtampe [Modeling the temperature field of a workpiece unevenly heated along the length as it cools on the die] / *V.V. Kukhar', O.A. Lavrentik, V.A. Burko, M.V. Krestnikov* // Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2007. № 17. Pp. 125–129. (In Russian).
17. Stal' 45. Primeneniye uglerodistoy konstruktsionnoy Stali 45 pri proizvodstve reduktorov i tsepnykh zvezdochek [Steel 45. Application of carbon structural Steel 45 in the production of gearboxes and chain sprockets] // Stalcu.ru vse pro obrabotku metalla. URL: <https://stalcu.ru/temperature/temperatura-plavleniya-stali-45.html?ysclid=lojx4dvej6319835808> (data obrashcheniya: 05.11.2023). (In Russian).
18. *Yeliseyev K.V., Zinov'yeva T.V.* Vychislitel'nyy praktikum v sovremennykh CAE-sistemakh [Computational workshop in modern CAE systems] // Komp'yuternoye modelirovaniye. SPb.: SPbPU/ 2008. Pp. 36–54. (In Russian).
19. *Popov A.V.* Optimal'noye proyektirovaniye induktsionnogo nagrevatelya dlya poverkhnostnoy zakalki v usloviyakh interval'noy neopredelennosti parametrov [Optimal design of an induction heater for surface hardening under conditions of interval parameter uncertainty] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskije Nauki. 2020. № 3. Pp. 139–154. (In Russian).
20. Osnovy raboty v ANSYS 17 [ANSYS 17 Basics]. / *N.N. Fedorova, S.A. Val'ger, M.N. Danilov, YU.V. Zakharova* M.: DMK Press, 2017. 210 p. (In Russian).
21. STOCK ANALYSIS: sayt. – URL: <https://stockanalysis.com/stocks/anss/company/> (data obrashcheniya: 30.01.2024) (In Russian).
22. marketcap: sayt. – URL: <https://marketcap.ru/stocks/BA/financial-statements/income-statement/market-cap?ysclid=ls098hw0l1241832261> (data obrashcheniya: 30.01.2024) (In Russian).

23. ANSYS [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.ansys.com/> (data obrashcheniya 16.02.2024) (In Russian).
24. *Korshikov S.E.* Optimal'noye upravleniye temperaturnymi rezhimami induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh slitkov s uchetom tekhnologicheskikh ogranicheniy [Optimal control of temperature conditions of induction heating of cylindrical ingots taking into account technological limitations]: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk. – Samara, 2015 – 24 p. (In Russian).
25. *Marochnik staley i splavov [Brand of steels and alloys] / A.S. Zubchenko, M.M. Koloskov, Yu.V. Kashirskiy i dr.; pod red. A.S. Zubchenko.* M.: Mashinostroyeniye, 2003. 784 p. (In Russian).
26. *Ennen M, Niedzwiecki I, Baake E.* Tailored heating of billets for hot forming using an induction heating approach. in Proceeding of XIX International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing: Plzen (Czech Republic), September 2–3. 2021.
27. *Pavlushin A.V.* Sovmestnaya optimizatsiya konstruktivnykh parametrov induktora i algoritmov upravleniya protsessom nagreva pod poverkhnostnuyu zakalku [Joint optimization of inductor design parameters and control algorithms for the heating process for surface hardening] // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2023. № 3. Pp. 17–28. (In Russian).
28. *Peshkin K.S.* Parametricheskaya optimizatsiya konstruksii induktsionnoy ustanovki dlya zonnogo nagreva detaley pered operatsiyey plasticheskoy deformatsii [Parametric optimization of the design of an induction installation for zone heating of parts before plastic deformation] // Sbornik nauchnykh trudov. MNITS «Naukosfera». Smolensk: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Smolenskiy sotsiologicheskiy tsentr», 2022. Pp. 46–53 (In Russian).