

УДК 621.785, 669.1, 519.6.

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ

А.В. Павлушин *

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

E-mail: alex1995i79@gmail.com

Аннотация. В работе представлена нелинейная двумерная численная модель температурных полей и полей термических напряжений в процессе поверхностной индукционной закалки стальной заготовки сложной геометрической формы. Проблемно-ориентированная модель разработана в ППП ANSYS Mechanical APDL для интеграции в процедуры численного решения задач оптимального проектирования индуктора и управления стадиями нагрева и охлаждения. Описаны этапы моделирования: задание свойств материалов, построение геометрии и наложение КЭ-сетки, задание краевых условий и настройки алгоритма расчета модели. Для моделирования стадии нагрева решаются взаимосвязанные электромагнитная, тепловая и упругопластическая задачи, в результате чего определяются пространственно-временные распределения электромагнитных источников тепла, температурных полей и полей термических напряжений по объему заготовки. Модель стадии нагрева ориентирована на дальнейшее использование в численной процедуре параметрической оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной установки с целью получения максимально возможной равномерности температурного распределения, от которой существенно зависит качество микроструктуры закаливаемого слоя. Для моделирования стадии охлаждения решаются тепловая и упругопластическая задачи, в результате чего определяются пространственно-временные распределения полей температуры и термонапряжений по объему заготовки. В качестве охлаждающей (закалочной) среды используется водяной дуи, применяемый после индукционного нагрева при поверхностной закалке для формирования мартенситной микроструктуры. Расчет стадии охлаждения выполняется при использовании эквивалентного коэффициента поверхностной теплоотдачи, зависящего от температуры, что значительно упрощает процесс моделирования. Модель стадии охлаждения может быть интегрирована в численную процедуру решения задачи оптимального управления спреерным устройством, которое позволяет контролировать закалку путем регулировки интенсивности подачи воды.

Ключевые слова: численное моделирование, индукционный нагрев, интенсивное охлаждение, поверхностная закалка, температурное поле, термические напряжения, ANSYS.

* Алексей Владимирович Павлушин, инженер НИС кафедры «Автоматика и управление в технических системах», аспирант.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ в рамках научного проекта № 22–29–00180.

Введение

Использование современных технологий поверхностной индукционной закалки позволяет упрочнять детали различной геометрической формы. Благодаря высокой скорости протекания процесса и концентрации внутренних источников тепла в поверхностном слое, этот метод обладает высоким энергосберегающим потенциалом по сравнению с конкурентоспособными термохимическими технологиями.

Однако формирование равномерного распределения температурных полей и полей термических напряжений в процессе поверхностной индукционной закалки деталей сложной геометрической формы с угловыми зонами представляет собой сложную и до сих пор не решенную задачу. Исследование технологического процесса поверхностной индукционной закалки, которое условно может быть разделено на стадии нагрева и охлаждения, удобно провести на основе численной конечно-элементной модели, разработанной в наиболее универсальном мультифизическом ППП *ANSYS*. Подробное описание процессов, происходящих при индукционном нагреве, представлено в статьях [1, 2].

В данной статье основное внимание уделяется анализу физических процессов, происходящих при поверхностной закалке с применением высокоинтенсивного способа охлаждения детали. Такой способ позволяет охлаждать заготовки со скоростью не ниже критической $V_{кр}$, чтобы предотвратить перлитное превращение и сформировать мартенситную микроструктуру металла. Процесс охлаждения представляет собой интенсивное распыление воды на поверхность заготовки при помощи управляемых разбрызгивающих устройств. Возможность управления позволяет установить один из специальных режимов контроля охлаждения путем регулировки интенсивности подачи воды. По сравнению с растворами полимеров, охлаждение распылением водяной струи демонстрирует повышенную экологическую безопасность, поскольку можно отказаться от добавок и других химикатов [3].

Основной целью исследования является моделирование и анализ распределений температуры и термических напряжений при поверхностной закалке заготовок *L*-образной формы в ППП *ANSYS Mechanical APDL*. Модель стадии нагрева ориентирована на дальнейшее использование в численной процедуре параметрической оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной установки с целью получения максимально возможной равномерности температурного распределения, от которой существенно зависит качество микроструктуры закаливаемого слоя. Модель стадии охлаждения может быть интегрирована в численную процедуру решения задачи оптимального управления спреерным устройством, которое позволяет контролировать закалку путем регулировки интенсивности подачи воды.

Моделирование стадии индукционного нагрева

Для исследования процессов индукционного нагрева под поверхностную закалку была разработана двумерная численная осесимметричная модель системы «индуктор – заготовка», включающая взаимосвязанный расчет электромагнитной, тепловой и упругопластической задач в ППП *ANSYS Mechanical APDL* [4, 5]. Общий вид алгоритма моделирования представлен на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм моделирования стадии индукционного нагрева

Решение вышеописанных взаимосвязанных задач реализовано при использовании специальных типов конечных элементов для двумерного расчета из библиотеки *ANSYS Mechanical APDL: PLANE13, PLANE55, и PLANE182(42)* соответственно. В качестве исходных данных задаются свойства материалов в виде табличных нелинейных зависимостей: для электромагнитного анализа – магнитная проницаемость и удельное сопротивление; для теплового анализа используются удельная теплоемкость, коэффициент линейного температурного расширения, коэффициент теплопроводности; для прочностного анализа применяются модуль Юнга, коэффициент Пуассона и билинейная модель пластичности [6, 7]. Затем задается геометрия заготовки сложной формы, типовой квадратной формы витков индуктора, окружающего воздушного пространства, присваиваются свойства отдельным областям, и накладывается конечно-элементная сетка. На рис. 2, а представлено схематичное осесимметричное изображение геометрии стальной заготовки сложной геометрической формы, на котором штриховыми линиями указана область поверхностного закаливаемого слоя. На рис. 2, б изображена геометрия системы «индуктор-заготовка» в *ANSYS Mechanical APDL* с наложенной конечно-элементной сеткой.

На следующем этапе производится настройка опций решателя, задаются начальные и граничные условия. Для исследования технологического процесса индукционной закалки выбраны 18 точек, расположенных в закаливаемом слое: 3 точки – вдоль оси симметрии, 8 точек – на границе закаливаемого слоя, 7 точек – на поверхности заготовки. На рис. 3, а и 3, б слева представлены трехмерные изображения заготовки с указанием расположения выбранных точек. Соответствующие результаты расчета температур в указанных точках представлены на рис. 3, а и 3, б справа.

Анализ скоростного нагрева выявил, что квадратная форма витков не позволяет достичь требуемой температуры T^* в области точек $T4$ и $T12$ и сформировать однородную аустенитную микроструктуру под закалку. При этом область расположения точек $T5$ и $T13$ перегревается на протяжении всего процесса. Решение демонстрирует очень быстрый нагрев точки $T5$ до температуры выше

1100°C (приблизительно за 2 секунды), при этом температура в точке T_4 за то же время достигает только 500°C, за счет чего образуется недопустимый температурный градиент. На рис. 3, в представлено конечное температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя. Перепад температур составил приблизительно 440°C.

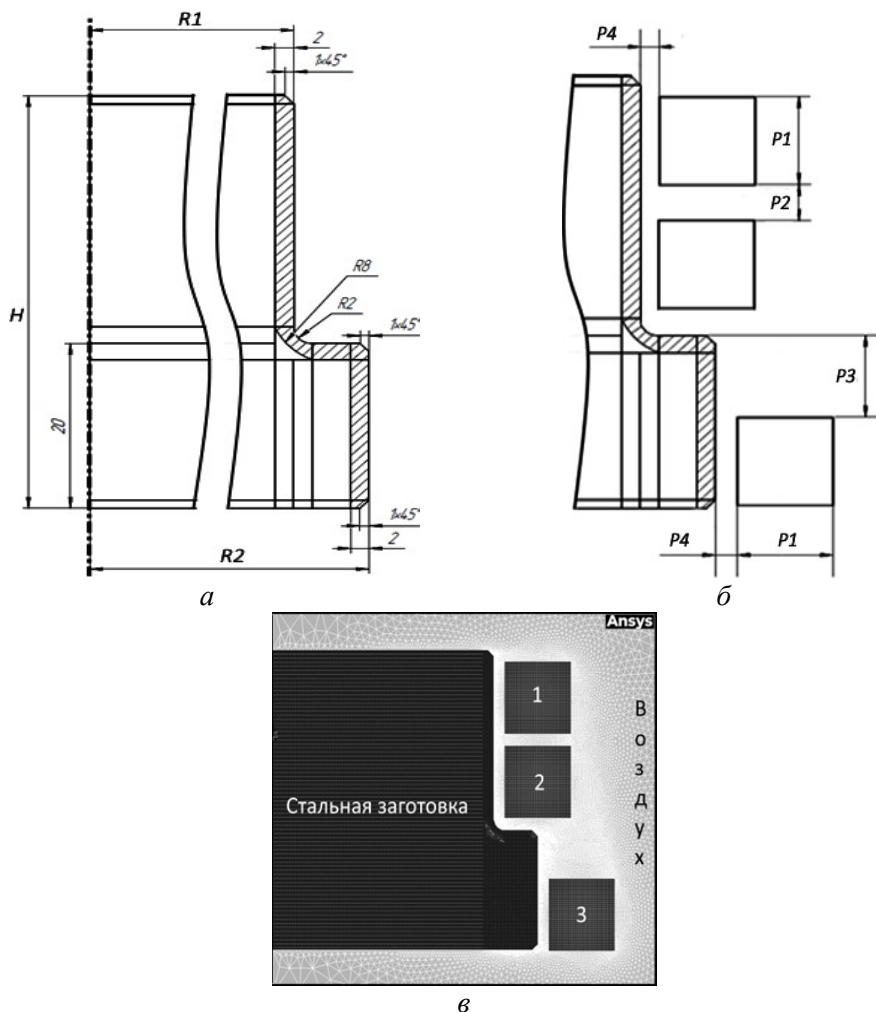


Рис. 2. Двумерная осесимметричная модель системы «индукционный нагреватель – стальная заготовка»: а – общий вид геометрии заготовки; б – параметры геометрии витков индуктора; в – наложенная конечно-элементная сетка в ППП ANSYS Mechanical APDL

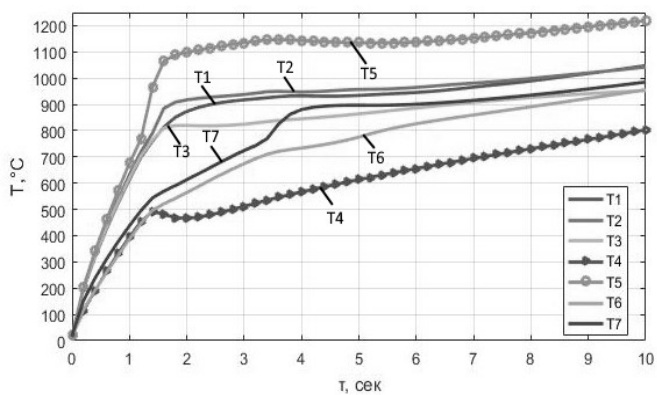
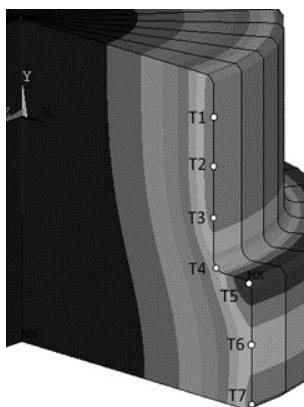
Исходные данные для моделирования стадии нагрева представлены в табл. 1.

Исходные данные для моделирования стадии нагрева

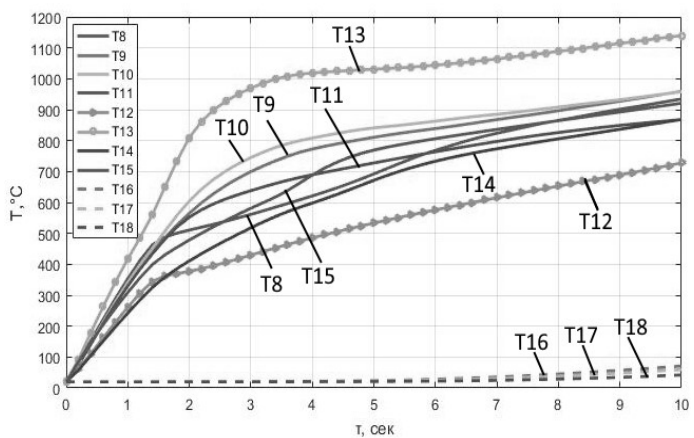
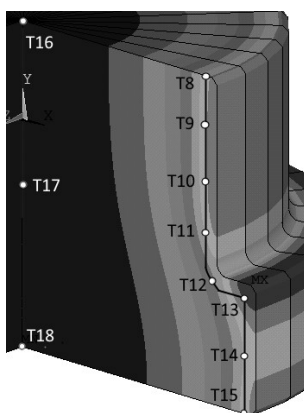
№	Наименование параметра	Значение
1	Начальная температура заготовки, T_a , °C	20
2	Длительность стадии индукционного нагрева, $\tau^{\text{нагр}}$, сек	10
3	Требуемая температура нагрева вдоль границы закаливаемого слоя, T^* , °C	900
4	Высота заготовки H , мм	50
5	Длина границы закаливаемого слоя стальной заготовки L , мм	55.8
6	Радиус заготовки $R1$, мм	40
7	Радиус заготовки $R2$, мм	48
8	Глубина поверхностного закаливаемого слоя C , мм	1.4-2
9	Типовая углеродистая сталь, (марка)	40
10	Сторона витка $P1$, мм	12
11	Расстояние от витков до заготовки $P4$, мм	2
12	Расстояние между витком №1 и №2 $P2$, мм	2
13	Расстояние между горизонтальной поверхностью выступа и витком №3 $P3$, мм	8,17
14	Сила тока витка №1,3 I_1 , А	1432
15	Сила тока витка №2 I_2 , А	1832
16	Частота тока источника питания f , кГц	50
17	Шаг расчета модели n , сек	0,2

Одним из способов устранения описанных недопустимых неравномерностей температурного распределения является решение задачи оптимального проектирования витка индуктора сложной геометрической формы, частично повторяющей контуры заготовки в угловой зоне [8]. В связи с тем, что в обрабатываемом слое наблюдаются локальные перегревы, при постановке задачи необходимо учесть фазовые ограничения на максимально допустимые значения температуры поверхности $T_{\text{доп}}$. Решение соответствующей задачи оптимального проектирования индукционной заготовки представлено в работах [1, 2, 9, 15 – 17].

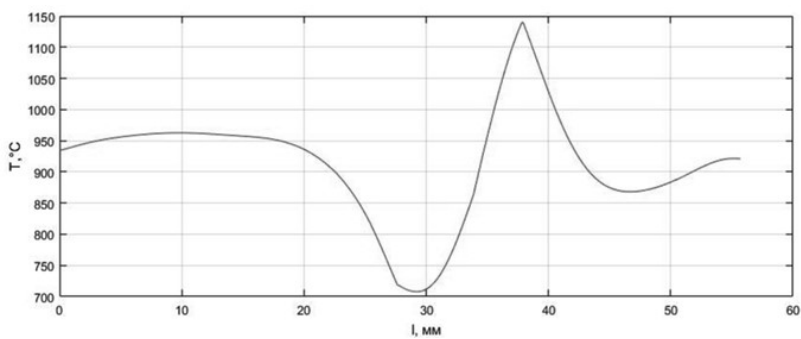
При исследовании стадии индукционного нагрева необходимо проанализировать эквивалентные напряжения, для расчета которых применяется критерий наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения. Данный критерий Губера-Мизеса хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными для изотропных материалов. Функционал ANSYS позволяет моделировать напряжения на основе теории малых упругопластических деформации при помощи билинейной модели пластичности (*BKIN*) с изотропным упрочнением и независимыми от температуры параметрами [10, 14]. Результаты расчета эквивалентных напряжений по Мизесу в процессе индукционного нагрева представлены на рис. 4.



a



б



в

Рис. 3. Температуры закаливаемого слоя: *a* – зависимость изменения температур от времени на поверхности заготовки; *б* – зависимость изменения температур от времени вдоль границы закаливаемого слоя и центре заготовки; *в* – распределение вдоль границы в конце стадии индукционного нагрева

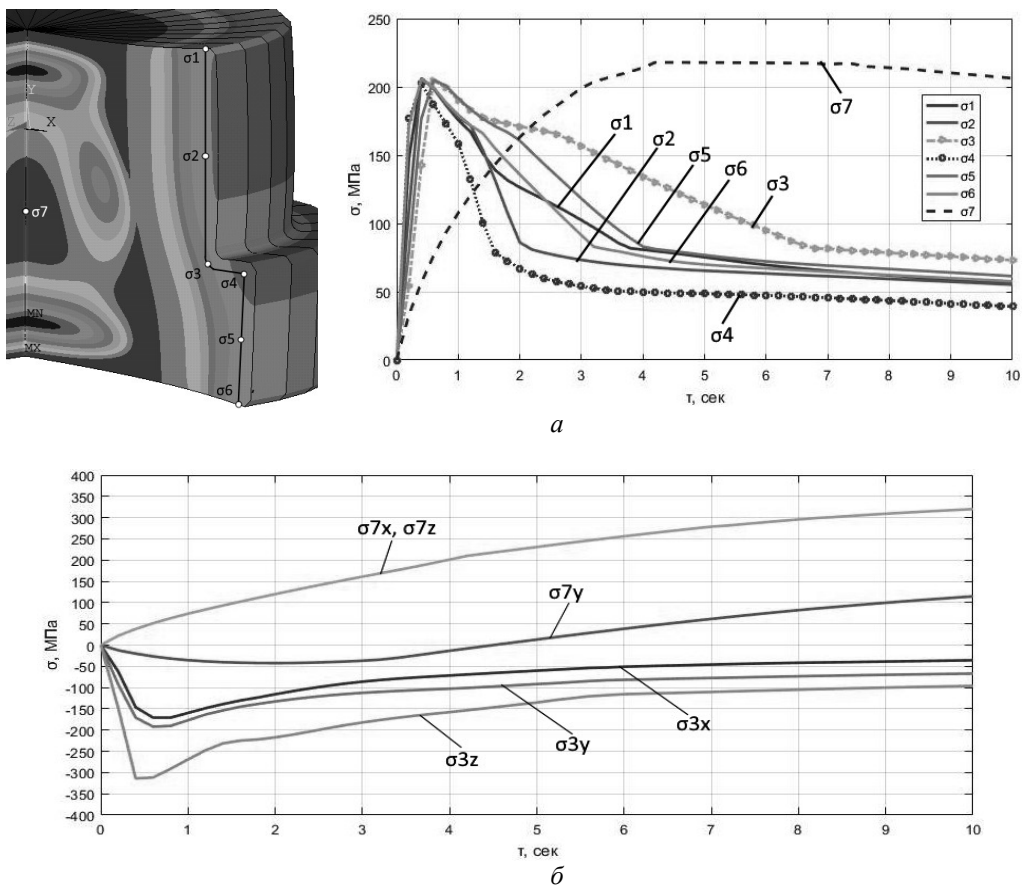


Рис. 4. Термические напряжения в процессе нагрева: *a* – эквивалентные напряжения по Мизесу; *б* – компоненты напряжений по сечению заготовки в точках σ_3 и σ_7

В начале индукционного нагрева наибольшие значения растягивающих напряжений наблюдаются на поверхностном закаливаемом слое заготовки в точках σ_1 – σ_6 , которые со временем начинают уменьшаться. Напротив, напряжения центра в точке σ_7 становятся сжимающими и со временем увеличиваются до значений, сопоставимых с теми, что были на поверхностном слое вначале нагрева.

Для более подробного исследования необходимо рассмотреть осевые компоненты напряжений. На рис. 6 выделены две точки (т. σ_3 и т. σ_7), в которых проявились наибольшие значения термических напряжений, приближающиеся к пределу текучести материала, который составляет не менее 335 МПа по ГОСТ 1050 – 2013 для стали 40. В точке σ_3 , находящейся в угловой области на поверхности заготовки, наибольшие термические напряжения наблюдаются в начале процесса нагрева, а в расположенной в центре точке σ_7 – к концу процесса. Приближение значений к пределу текучести подтверждает необходимость учета технологических ограничений на термонапряжения при решении задачи оптимального проектирования и управления процессами индукционного нагрева. Максимальное значение термонапряжений в ходе всего процесса не превышает предела прочности для стали 40, который составляет не менее 570 МПа. Итого-

вый вектор суммы компонент ХУ деформаций геометрии заготовки составил около 0.4 мм, что составляет 1% радиуса $R1 = 40$ мм и 0.83% радиуса $R2 = 48$ мм.

Моделирование стадии охлаждения

Одна из главных целей поверхностной закалки – формирование мартенситной микроструктуры, которая достигается высокой скоростью охлаждения детали. Для этого после поверхностного индукционного нагрева заготовок переходят к следующей стадии – высокоскоростному охлаждению закалочной средой, например, водяным душем. При таком способе подачи охлаждающей воды теплообмен с окружающей средой происходит значительно интенсивнее благодаря разрушению паровой пленки из-за кинетической энергии струй и большой скорости перемещения воды относительно охлаждаемой поверхности. Интенсивность охлаждения может изменяться в широких пределах за счет изменения количества смеси и ее скорости истечения из разбрызгивающего устройства. Однако у такого способа охлаждения есть очевидный недостаток – необходимость периодической очистки отверстий форсунок, поэтому вода должна быть достаточно чистой, т.к. окалина и другие механические примеси могут очень быстро засорить отверстия [11, 12].

Для исследования стадии охлаждения под поверхностную закалку в ППП *ANSYS Mechanical APDL* разработана двумерная численная осесимметричная модель системы «устройство подачи охлаждающей среды – заготовка», включающая взаимосвязанный расчет тепловой и упругопластической задач (рис. 5).

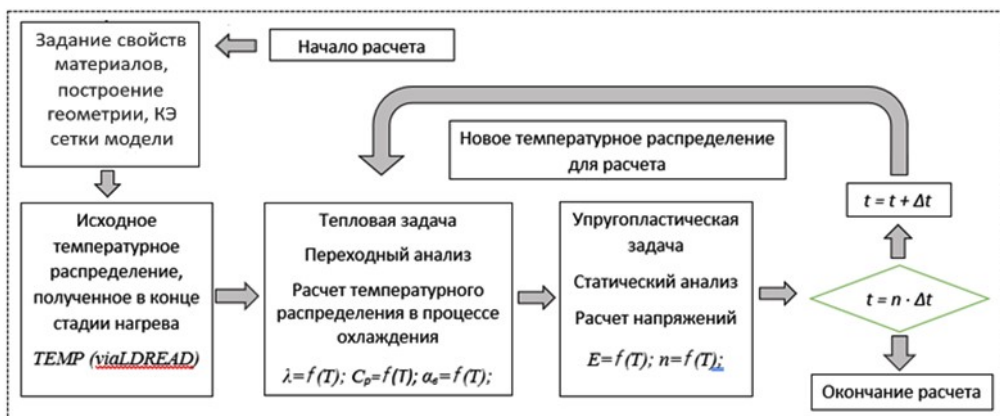


Рис. 5. Алгоритм моделирования стадии охлаждения

В работе рассматривается охлаждение путем распыления воды через разбрызгивающее устройство. Для моделирования процесса охлаждения используется эквивалентный поверхностный коэффициент теплоотдачи, который изменяется в зависимости от температуры поверхности заготовки и параметра расхода воды M , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, являющегося постоянной величиной, равной отношению количества охлаждающей жидкости ($\text{м}^3/\text{сек}$) к площади закаливаемой заготовки (м^2) [12]. Общий вид системы охлаждения и применяемая при моделировании зависимость эквивалентного коэффициента поверхностной теплоотдачи $\alpha_{\text{ЭКВ}}$ от температуры поверхности охлаждения представлены на рис. 6.

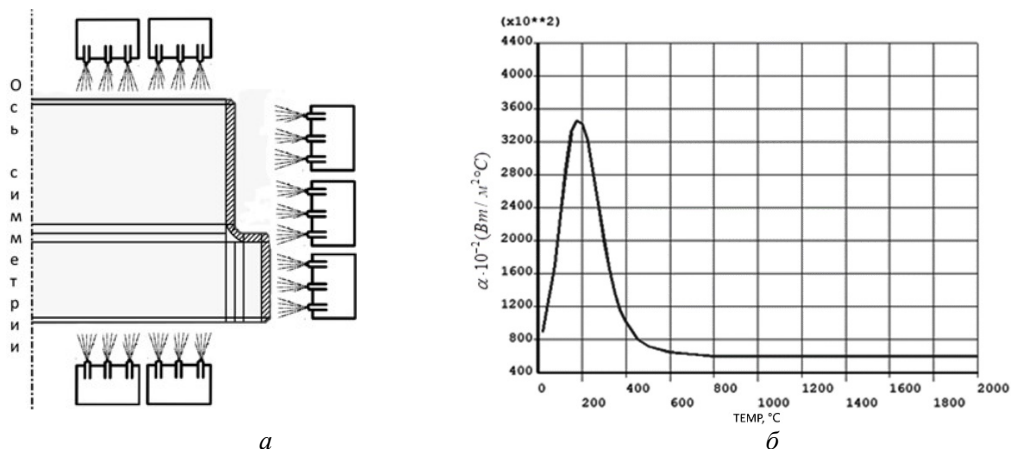


Рис. 6. Моделирование стадии охлаждения: *а* – схема спрейерной системы подачи охлаждающей среды на поверхность металла, *б* – расчетная зависимость коэффициентов теплоотдачи от температуры с поверхности заготовки при $M = 1.2 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$

Исходные данные для моделирования стадии охлаждения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для моделирования стадии охлаждения

№	Наименование параметра	Значение
1	Длительность стадии охлаждения, $t^{\text{охл}}$, сек	5
2	Шаг расчета модели m , сек	0,05
3	Температура начала мартенситного превращения, T_m , °C	≈345
4	Критическая скорость охлаждения для стали 40, °C/сек	≈520

В процессе закалки скорость охлаждения заготовки не должна опускаться ниже критической $V_{\text{кр}}$, т.к. в интервале температур перлитного превращения (от точки A_1 (724 °C) до температур минимальной устойчивости переохлажденного аустенита углеродистых и низколегированных сталей (500-550 °C)) закалочная среда должна обеспечить такую интенсивность охлаждения, при которой будет предотвращен перлитный распад аустенита и температура заготовки опустится ниже обозначенного интервала, в котором устойчивость аустенита возрастает и замедление охлаждения уже не опасно. В противном случае аустенит будет претерпевать перлитное превращение, что снизит качество закалки [11, 13]. В начале стадии охлаждения наибольший температурный перепад возникает между поверхностью и центром, особенно в области выступа. В ходе процесса наблюдается снижение температуры поверхностного слоя заготовки и прогрев центральной части заготовки путем теплопроводности (рис. 7).

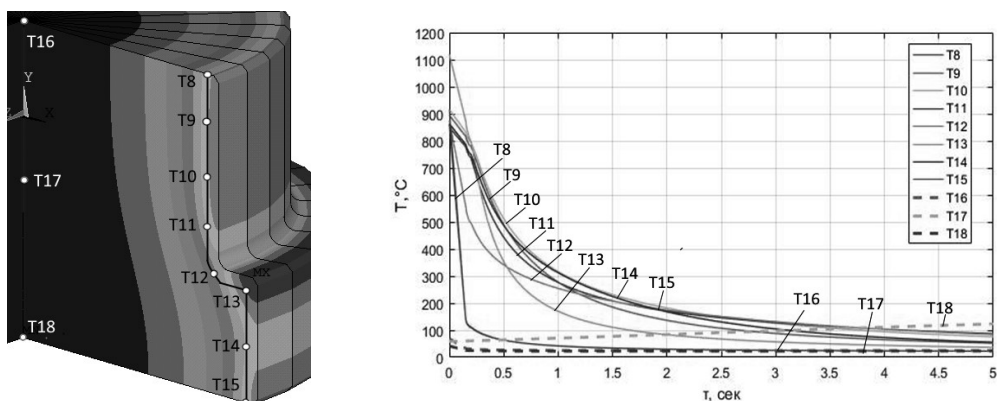


Рис. 7. Температуры в точках вдоль границы закаливаемого слоя и центре заготовки в процессе охлаждения

Выбор интервала температур мартенситного превращения производится в зависимости от материала. В основном используются диапазоны от 350 °С до 100 °С или от 300 °С до 200 °С. В этих интервалах происходит окончательное превращение аустенита в мартенсит, которое сопровождается возникновением высоких внутренних напряжений и опасностью появления закалочных микротрещин [11].

Вследствие высокой пластичности стали, деформации при высоких температурах оказываются упругопластическими, и поверхностные слои растягиваются относительно центральных. Охлаждение поверхностных слоев приводит к не одинаковому тепловому сжатию, а следовательно, к возникновению термических деформаций и напряжений. Поскольку охлаждаемое тело остается сплошным, то на поверхности в конце охлаждения наблюдаются сжимающие напряжения, а в центре растягивающие. По окончании процесса охлаждения, изначально возникшие временные напряжения затем формируют остаточные напряжения, имеющие противоположный знак [11, 13, 14]. На рис. 8 представлены результаты расчета термических напряжений в процессе быстрого охлаждения.

Как показывает анализ результатов моделирования, в начале интенсивного охлаждения наибольшие значения термических напряжений образуются на поверхности заготовки, а затем их величина постепенно уменьшается. Со временем в центре заготовки на оси Y наблюдается повышение температуры от прогретой за счет теплопроводности поверхности и одновременное снижение напряжений, после чего все поверхности контакта охлаждаются до температуры воды, и происходит перераспределение внутренних напряжений, что влияет на свойства конечного продукта.

Во избежание формирования чрезмерной хрупкости металла и получения достаточной его твердости необходимо сформулировать и решить задачу поиска такого управления подачей воды спреерным устройством, которое создает оптимальные физические условия теплообмена с поверхностью заготовки, позволяющие сформировать мартенситную микроструктуру металла с требуемыми свойствами.

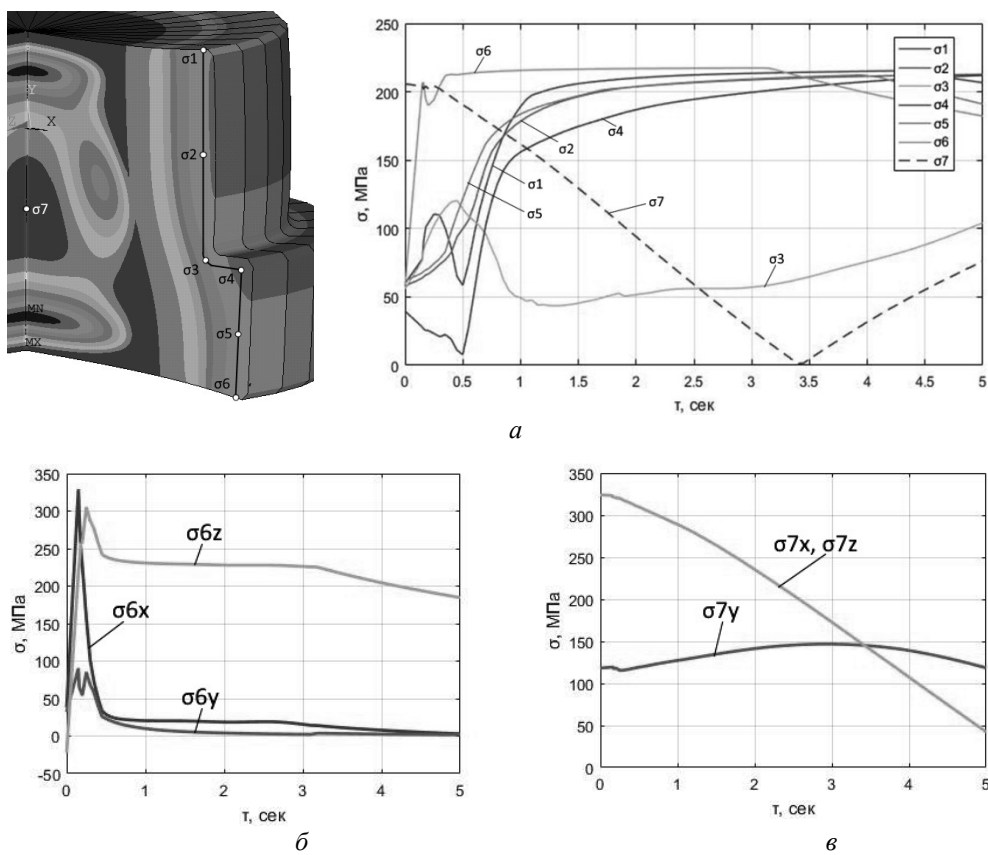


Рис. 8. Термические напряжения на стадии охлаждения: *a* – эквивалентные напряжения по Мизесу; *б* – компоненты напряжений в точке σ_6 на поверхности; *в* – компоненты напряжений в точке σ_7 в центре

Заключение

Рассмотрена проблемно-ориентированная численная нелинейная модель технологического процесса поверхностной индукционной закалки стальной заготовки сложной геометрической формы с угловой зоной. Разработанные и реализованные в ППП ANSYS алгоритмы моделирования позволили получить пространственно-временные распределения внутренних электромагнитных источников тепла, температур и термонапряжений на стадиях нагрева заготовки в индукционном нагревателе и ее охлаждения с помощью водяного душа.

Анализ результатов моделирования позволил выявить области значений температур и термических напряжений, превышающих или приближающихся к предельно допустимым согласно технологическим требованиям. Показано, что представленная конфигурация индуктора с квадратной формой витков не позволяет одновременно прогреть угловую зону и не перегреть выступ, что подтверждает необходимость перехода к более сложной геометрической форме витка индуктора, находящегося в области выступа стальной заготовки *L*-образной геометрической формы.

Представленная модель стадии индукционного нагрева, позволяющая проанализировать влияние вариаций основных технологических параметров процесса индукционного нагрева на динамику изменения тепловых полей и полей термонапряжений, может быть интегрирована в численную процедуру оптимально-

го проектирования сложной формы витков индуктора и оптимизации его режимных параметров, обеспечивающую требуемую равномерность температурного поля при отсутствии недопустимых перегревов.

Представленная модель стадии охлаждения может быть интегрирована в численную процедуру для поиска алгоритма управления спрейерным устройством, который обеспечит оптимальную интенсивность подачи воды с целью получения максимального качества мартенситной микроструктуры металла в конце процесса закалки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pleshivtseva Y., Pavlushin A., Popov A.* Optimal Design of Inductor Coils for Surface Hardening // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2022. Pp. 680 – 685.
2. *Павлушин А. В.* Оптимизация конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной установки для закалки // Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29. №. 3 (71). С. 38 – 51.
3. *Арзамасов Б. Н. и др.* Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. М.: Машиностроение. 1986. 386 с.
4. Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 30.05.2022).
5. *Rudnev V., Loveless D., Cook R. L.* Handbook of induction heating. CRC press, 2017.
6. *Сорокин В. Г. и др.* Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение. 1989. Т. 640. С. 36.
7. *Драгунов Ю. Г.* Марочник сталей и сплавов. Под редакцией Зубченко А. С. 2016.
8. *Рапопорт Э. Я., Плишивцева Ю. Э.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. М.: Наука, 2012.
9. *Pleshivtseva Y., Popov A., Pavlushin A.* Software Solution for Optimal Design of Inductor for Surface Hardening // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2021. Pp. 646 – 649.
10. *Коршиков С. Е.* Моделирование полей упругих деформаций в процессе индукционного нагрева вращающихся заготовок // Информатика, телекоммуникации и управление. 2012. №. 1 (140). С. 94 – 98.
11. *Башкин Ю. А., Ушаков Б. К., Секей А. Г.* Технология термической обработки стали: Учебник для студентов вузов. Металлургия, 1986.
12. *Dossett J., Totten G. E.* ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, ASM Intern. 2013.
13. Анализ диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита: метод. указания к прак. и лаб. работам по дисциплинам «Основы термической обработки», «Материаловедение» для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 150400 «Металлургия» / Т.В. Нуждина, М.Н. Чеэрова, Т.В. Комарова. Н. Новгород: НГТУ, 2014. 34 с.
14. *Pleshivtseva Y.E., Yakubovich E.A.* The influence of induction heating modes on thermal stresses within the billets // Advances in Automation, 2020. Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, September 8-14, 2019, Sochi, Russia. Book Series: Lecture Notes in Electrical Engineering Editors: Prof. Andrey A. Radionov, Alexander S. Karandaev Publisher: Springer International Publishing Print ISBN: 978-3-030-39224-6. Electronic ISBN: 978-3-030-39225-3. Part of: Springer Professional Wirtschaft+Technik", Springer Professional "Technik".
15. *Плишивцева Ю. Э., Попов А. В., Попова М. А., Дервянов М. Ю.* Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. №. 1. С. 40 – 50.
16. *Pleshivtseva Y.; Baldan M.; Popov A.; Nikanorov A.; Rapoport E.; Nacke B.* Effective methods for optimal design of induction coils on example of surface hardening, COMPEL // The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2019, ISSN: 0332-1649, 39 (1). Pp. 90 – 99.

17. *Коршиков С. Е.* Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева цилиндрических слитков с учетом технологических ограничений: Дис. Сам. гос. техн. ун-т, 2015. 157 с.

Статья поступила в редакцию 28 марта 2022 г.

PROBLEM-ORIENTED MODEL OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SURFACE INDUCTION HARDENING

A.V. Pavlushin *

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

E-mail: alex1995i79@gmail.com

Abstract. *The paper presents a nonlinear two-dimensional numerical model of the temperature and thermal stress fields within a steel billet of complex geometric shape in the surface induction hardening process. The problem-oriented model developed in the ANSYS Mechanical APDL software package can be integrated into the optimization procedure for designing an induction coil and controlling the heating and cooling stages. The following steps of modeling are described: setting the properties of materials, the geometry building and overlaying the FE mesh, setting the boundary conditions, and setting up the model calculation algorithm. To simulate the heating stage, the interrelated electromagnetic, thermal, and elastic-plastic problems are solved, which results in obtaining the spatio-temporal distributions of electromagnetic heat sources, temperature fields, and thermal stress fields over the workpiece volume. The model of the heating stage is oriented for further use in the numerical procedure of parametric optimization of the design and operating parameters of the induction installation to obtain the highest possible uniformity of the temperature distribution, on which the quality of the microstructure of the hardened layer depends significantly. To simulate the cooling stage, thermal and elastic-plastic problems are solved, providing the spatial-temporal distributions of temperature fields and thermal stresses over the workpiece volume. As a cooling (quenching) medium, a water shower is used after induction heating to form a martensitic microstructure of the surface hardened layer. The simulation of the cooling stage is performed using the temperature-dependent equivalent surface heat transfer coefficient, which greatly simplifies the modeling process. The model of the cooling stage can be integrated into the numerical procedure for solving the problem of optimal control of the spraying device, which allows for improving the hardening quality by adjusting the intensity of the water supply.*

Keywords: *numerical simulation, induction heating stage, intensive cooling, surface hardening, temperature field, thermal stresses, ANSYS.*

REFERENCES

1. *Pleshivtseva Y., Pavlushin A., Popov A.* Optimal Design of Inductor Coils for Surface Hardening // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2022. Pp. 680 – 685.
2. *Pavlushin A. V.* Optimization of design and operating parameters of an induction heating installation for hardening // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering sciences. 2021. V. 29. №. 3(71). Pp. 38 – 51.
3. *Arzamasov B.N. et al.* Materials Science: A Textbook for Higher Technical Educational Institutions. M.: Mashinostroyeniye. 1986. 384 p.
4. Engineering Simulation & 3D Design Software ANSYS. 2022. URL: <https://www.ansys.com/blog/how-to-make-matlab-apps-for-ansys/> (30.05.2022).
5. *Rudnev V., Loveless D., Cook R. L.* Handbook of induction heating. CRC press, 2017.
6. *Sorokin V. G. et al.* Grader of steels and alloys. M.: Mashinostroyeniye. 1989. V. 640. 36 p.
7. *Dragunov Yu. G.* Grader of steels and alloys. Edited by Zubchenko A. S. 2016.
8. *Rapoport E. Ya., Pleshivtseva Yu. E.* Optimal control of temperature modes of induction heating. M.: Nauka, 2012.

* *Aleksey V. Pavlushin, Postgraduate Student.*

9. *Pleshivtseva Y., Popov A., Pavlushin A.* Software Solution for Optimal Design of Inductor for Surface Hardening // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2021. Pp. 646 – 649.
10. *Korshikov S. E.* Modeling of fields of elastic deformations in the process of induction heating of rotating billets. Informatics, telecommunications and management. 2012. №. 1(140). Pp. 94 – 98.
11. *Bashkin Yu. A., Ushakov B. K., Sekey A. G.* Technology of heat treatment of steel: Textbook for university students. M.: Metallurgy, 1986.
12. *Dossett J., Totten G. E.* ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, ASM Intern. 2013.
13. Analysis of the diagram of isothermal decomposition of supercooled austenite: method. instructions for practice and lab. works on the disciplines "Fundamentals of Heat Treatment", "Materials Science" for students of all forms of education in the direction of preparation 150400 "Metallurgy" / T.V. Nuzhdina, M.N. Cheerova, T.V. Komarova. N. Novgorod: NSTU, 2014. 34 p.
14. *Pleshivtseva Y.E., Yakubovich E.A.* The influence of induction heating modes on thermal stresses within the billets // Advances in Automation, 2020. Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, September 8-14, 2019, Sochi, Russia. Book Series: Lecture Notes in Electrical Engineering Editors: Prof. Andrey A. Radionov, Alexander S. Karandaev Publisher: Springer International Publishing Print ISBN: 978-3-030-39224-6. Electronic ISBN: 978-3-030-39225-3. Part of: Springer Professional Wirtschaft+Technik", Springer Professional "Technik".
15. *Pleshivtseva Yu. E., Popov A. V., Popova M. A., Derevyanov M. Yu.* Optimal design of an inductor for surface hardening of cylindrical blanks based on a numerical two-dimensional model // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics. 2019. №. 1. Pp. 40 – 50.
16. *Pleshivtseva, Y.; Baldan, M.; Popov, A.; Nikanorov, A.; Rapoport, E.; Nacke, B.* Effective methods for optimal design of induction coils on example of surface hardening, COMPEL. The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2019, ISSN: 0332-1649, 39 (1). Pp. 90 – 99.
17. *Korshikov S. E.* Optimal control of temperature regimes of induction heating of cylindrical ingots taking into account technological limitations: dis. Sam. state tech. un-t, 2015. 157 p.