

*Посвящается 110 годовщине
со дня рождения
профессора А. Е. Слухоцкого*

Моделирование технологических параметров индукционной поверхностной закалки на основе обобщенных экспериментальных исследований

**Ф. В. Чмиленко, Ю. В. Шанин[✉], А. А. Хоршев,
А. С. Бондарь, Чжан Ци, Д. Н. Бондаренко**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉]yurashanin@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается моделирование технологии индукционной поверхностной закалки низколегированных углеродистых сталей с содержанием углерода от 0.2 до 0.8 %. Для оптимизации технологических параметров – мощности и времени нагрева, частоты тока и глубины закалки, были обобщены экспериментальные данные: зависимости температур аустенизации и гомогенизации нагреваемой стали от скорости нагрева, содержания углерода и размера зерна исходной структуры. Также на основе экспериментальных данных получены зависимости роста зерна аустенита от скорости нагрева и температуры. Использовалась нелинейная сопряженная электротепловая численная модель, в которой расчет нелинейной ферромагнитной задачи проводился во временной области. Для исследования влияния фазовых превращений при индукционном нагреве на выбор оптимального режима нагрева был разработан итерационный алгоритм, управляющий численной электротепловой моделью. Сравниваются результаты моделирования режимов индукционной поверхностной закалки для тел цилиндрической формы из сталей ст35 и ст45, также приводится необходимая температура нагрева поверхности. Показано влияние исходной структуры на выбор режима нагрева. Кроме того, разработанная модель позволяет прогнозировать предельную твердость на поверхности закаленной детали для оптимального режима охлаждения.

Ключевые слова: индукционный нагрев, высокочастотная закалка, моделирование электромагнитных полей, углеродистые стали, фазовые превращения, аустенит

Для цитирования: Моделирование технологических параметров индукционной поверхностной закалки на основе обобщенных экспериментальных исследований / Ф. В. Чмиленко, Ю. В. Шанин, А. С. Бондарь, Ци Чжан, Д. Н. Бондаренко // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 2. С. 67–78. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-67-78.

Original article

Modeling of technological parameters of induction surface hardening based on generalized experimental studies

**V. V. Chmilenko, Y. V. Shanin[✉], A. A. Khorshev,
A. S. Bondar, Qi Zhang, D. N. Bondarenko**

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉]yurashanin@yandex.ru

Abstract. The article discusses the modeling of induction surface hardening technology of low-alloy carbon steels with a carbon content of 0.2 to 0.8 %. To optimize technological parameters, such as heating power and time, current frequency and quenching depth, experimental data were generalized: dependences of austeniza-

tion and homogenization temperatures heated steel on the heating rate, carbon content and grain size of the initial structure. Also, on the basis of experimental data, the dependences of austenite grain growth on the heating rate and temperature are obtained. A nonlinear coupled electrothermal numerical model was used in the work, in which the calculation of the nonlinear ferromagnetic problem was carried out in the time domain. To study the effect of phase transformations during induction heating on the choice of the optimal heating mode, an iterative algorithm was developed that controls the numerical electrothermal model. The article compares the results of simulation of induction surface hardening modes for cylindrical bodies made of St35 and St45 steels, and also provides the required surface heating temperature. The influence of the initial structure on the choice of heating mode is shown. In addition, the developed model makes it possible to predict the ultimate hardness on the surface of the hardened part for optimal cooling mode.

Keywords: induction heating, high-frequency quenching, modeling of electromagnetic fields, carbon steels, phase transformations, austenite

For citation: Chmilenko V. V., Shanin Y. V., Khorshev A. A., Bondar A. S., Zhang Q., Bondarenko D. N. Modeling of technological parameters of induction surface hardening based on generalized experimental studies // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no 2. P. 67–78. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-67-78.

Технология высокочастотной поверхностной закалки появилась в начале 1930-х гг. В нашей стране основоположником индукционного нагрева, в том числе и высокочастотной поверхностной закалки, является профессор В. П. Вологдин, который со своими сотрудниками (среди них был и А. Е. Слухоцкий) начал проводить работы в этом направлении в 1935 г. в Ленинградском электротехническом институте им. Ленина (ЛЭТИ) [V. Vologdin, Surface tempering. New high frequency eddy current method, Electrician, 1936. Vol. 116, no. 6]. В дальнейшем результаты этих работ широко использовались в промышленности. Необходимо отметить, что большие заслуги во внедрении этой технологии принадлежат и другим советским и зарубежным ученым: М. Г. Лозинскому [1], Г. И. Бабату, Е. Нортрупу [2]. Также развитию технологии способствовали работы фирмы «Тоссо» [3].

С момента зарождения технология индукционной поверхностной закалки стала интенсивно развиваться, и уже перед второй мировой войной появились первые серийные промышленные установки. Однако признание и массовое распространение в машиностроении данная технология получила уже после войны за счет ряда известных преимуществ – скорости и повторяемости технологического процесса, хороших возможностей по автоматизации, улучшенных механических свойств закаленного слоя, а также значительного энергосбережения.

Развитие было столь стремительным, что теория не успевала за практикой. Заметное отставание теории, которое наблюдается до сих пор, – это следствие ряда объективных факторов. В первую очередь, следует отметить, что техно-

логия индукционной поверхностной закалки объединяет в себе ряд нелинейных сопряженных процессов и явлений:

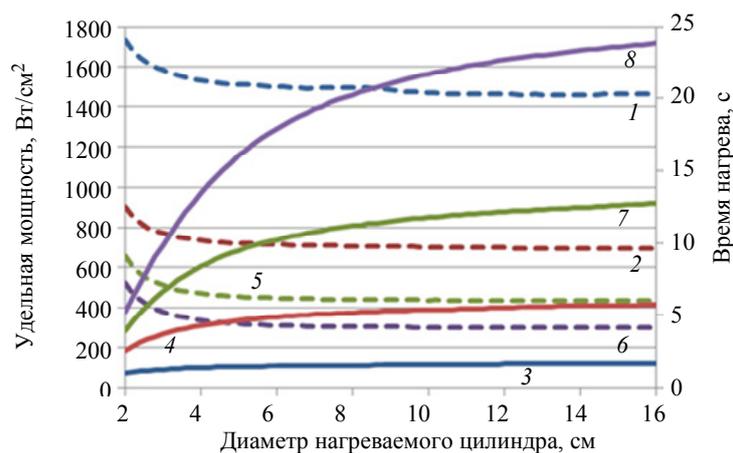
- распространение электромагнитного поля в нелинейной среде;
- нагрев тела под влиянием внутренних источников теплоты;
- фазовые и структурные превращения;
- механические напряжения и деформации.

Кроме того, данную технологию можно разбить на несколько этапов по времени – скоростной нагрев, быстрое охлаждение и отпуск, в течение которых происходят разные фазовые или структурные превращения. Таким образом, развитие теории индукционной закалки невозможно без решения задач металловедения, которое (как еще указывал В. П. Вологдин) отстает от других отраслей техники по степени обобщенности и использованию математического аппарата.

В данной статье авторы предприняли попытку обобщить экспериментальные данные по индукционной закалке углеродистых низколегированных сталей, проведенные в свое время во «Всероссийском научно-исследовательском институте токов высокой частоты им. В. П. Вологодина» (ВНИИТВЧ) и объединить эти результаты с подходом к расчету индукторов А. Е. Слухоцкого, применив при этом современные численные модели.

Постановка задачи. Развитие теории индукционного нагрева формировалось на основе моделей. В докомпьютерную эпоху это были аналитические модели, в дальнейшем стали превалировать численные.

В ЛЭТИ в 1970-х гг. проф. А. Е. Слухоцким была предложена аналитическая модель, целью которой было облегчение выбора режима работы



- 1 – 0.2 см, уд. мощность; 5 – 0.4 см, уд. мощность;
 2 – 0.3 см, уд. мощность; 6 – 0.5 см, уд. мощность;
 3 – 0.2 см, время; 7 – 0.4 см, время;
 4 – 0.3 см, время; 8 – 0.5 см, время

Рис. 1. Результаты аналитических расчетов для цилиндрических деталей из среднеуглеродистой стали при частоте тока 10 000 Гц для заданной глубины закалки [5]

Fig. 1. Analytical calculation results for cylindrical parts made of medium carbon steel at a current frequency of 10 000 Hz for a given quenching depth [5]

индуктора в зависимости от частоты питающего тока и от требуемой глубины закалки [4]. Результаты расчетов, полученные по этой модели для цилиндрических деталей из среднеуглеродистой стали при частоте тока 10 000 Гц для глубины закалки от 0.2 до 0.5 см, представлены на рис. 1 [5]. На основе приведенных графиков можно выбрать необходимую удельную мощность и определить время нагрева детали в индукторе.

Рассматриваемая модель имеет ряд недостатков, которые на современном этапе развития вычислительной техники можно устранить. Во-первых, ядро модели построено с помощью аналитических методов, которые при моделировании индукционного нагрева ферромагнитных тел дают большую погрешность, так как плохо учитывают нелинейные свойства материалов. Во-вторых, данная модель не учитывает ряд особенностей фазовых превращений в сталях при скоростном нагреве, а именно то, что температуры фазовых превращений – температура аустенизации (критическая точка A_{c3}) и температура гомогенизации (равномерное распределение углерода в аустените), на диаграмме железо–углерод сдвигаются вверх при увеличении скорости нагрева [6].

В связи с этим, в данной статье предлагается усовершенствовать подход, предложенный проф. А. Е. Слухоцким. Сопряженную нелинейную электротепловую модель имеет смысл реализо-

вать численно с помощью метода конечных разностей или метода конечных элементов. Так как в общей постановке задачи нет привязки к форме индуктора (требуется найти удельную поверхностную мощность), то можно обойтись решением в одномерной постановке. Система нелинейных дифференциальных уравнений электромагнитного поля и теплопроводности для нагрева длинного цилиндра или бесконечно широкой пластины в продольном магнитном поле имеет вид [7], [8]:

$$\text{модель 1} - \frac{1}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho x^n \frac{\partial H}{\partial x} \right) = j\omega\mu\mu_0 \dot{H};$$

$$\text{модель 2} - \frac{1}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho x^n \frac{\partial H}{\partial x} \right) = \mu\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t};$$

$$\gamma C \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{x^n} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda x^n \frac{\partial T}{\partial x} \right) = q,$$

где x – пространственная координата, м, $x \in [x_n, x_k]$; x_n, x_k – начальная и конечная точки, м; n – показатель геометрии системы, $n = 0$ – плоская, $n = 1$ – цилиндрическая; ω – круговая частота, рад/с; μ – магнитная проницаемость, $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-26}$ Гн/м – магнитная постоянная; H – напряженность магнитного поля, А/м; ρ – удельное электрическое сопротивление Ом · м; γ – плотность вещества, кг/м³; C – удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; T – температура нагрева, °С; λ – ко-

эффицент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; q – удельная объемная мощность внутренних источников теплоты, $\text{Вт}/\text{м}^3$.

При сильных нелинейностях, возникающих при нагреве стали до точки Кюри, предпочтительнее использовать решение во временной области (модель 2). Расчет во временной области, как правило, осуществляется в течение некоторого количества периодов, до тех пор, пока мощность, выделяемая на периоде, не придет к установившемуся значению. Источники теплоты определяются по распределению поля на последнем периоде.

В качестве граничных условий для электромагнитной модели выступает меняющаяся по синусоидальному закону напряженность магнитного поля на поверхности детали, которая через закон полного тока связана с током индуктора. Режим мощности может быть сведен к граничным условиям режима тока или режима напряжения с помощью итераций. Режим тока предпочтительнее, чем режим напряжения, так как для расчетов во временной области в этом случае требуется меньше периодов для выхода на установившийся режим. В данном исследовании использовалось 3 периода, каждый разбит на 256 шагов.

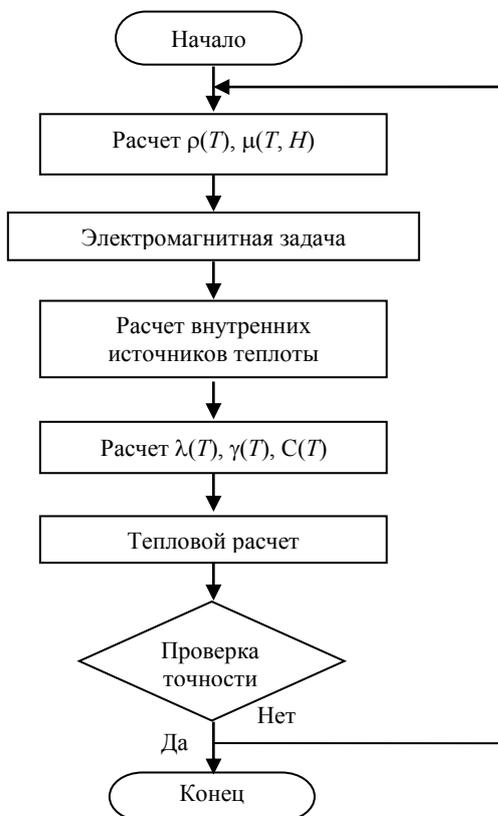


Рис. 2. Схема совместного решения нелинейных электромагнитной и тепловой задач
Fig. 2. Scheme for the joint solution of nonlinear electromagnetic and thermal problems

В [4], чтобы не усложнять модель, не учитывались тепловые потери с поверхности детали, что в достаточной мере справедливо для скоростных режимов. Численные модели в лучшей степени приспособлены к учету разного рода тепловых потерь.

Блок-схема для одного шага по времени нелинейной сопряженной электротепловой задачи приведена на рис. 2.

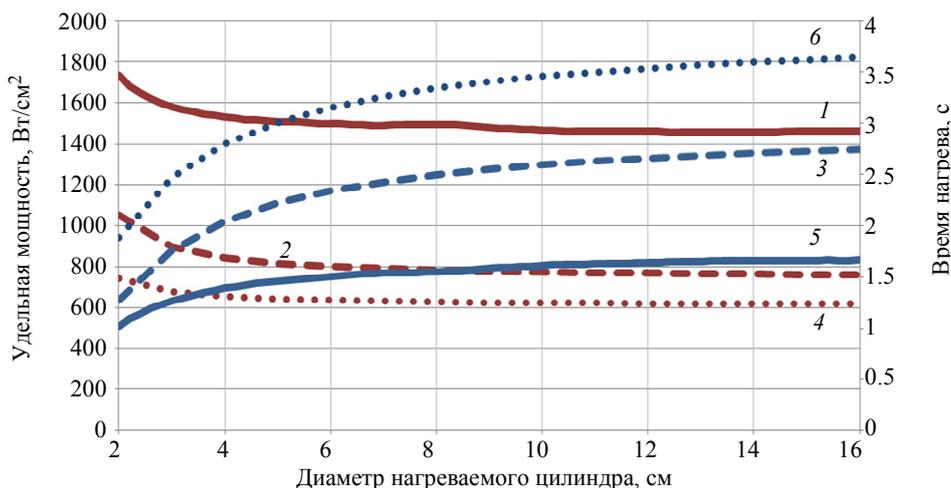
Сравнение результатов численных моделей для стали ст45 с исходным размером зерна 100 мкм с аналитическими расчетами [5] приведено на рис. 3. На графиках видна существенная разница при использовании разных моделей. Ошибка модели по первой гармонике относительно модели во временной области при расчете нагрева ферромагнитных тел приводит к завышению требуемой мощности и занижению необходимого времени нагрева. Ошибка аналитической модели имеет такую же тенденцию и более существенна. В связи с этим все остальные результаты, приведенные в данной статье, были получены с использованием модели во временной области.

Обобщение экспериментальных данных.

Расчеты, приведенные на рис. 1, сделаны из предположения, что температура поверхности заготовки нагревается до температуры 900 °С, а область на требуемой глубине закалки – до 750 °С. В общем случае это неверные предположения, так как желательно, чтобы температура на поверхности соответствовала температуре гомогенизации. В свою очередь, температура гомогенизации зависит от химического состава стали, скорости нагрева после начала фазовых превращений и от размера зерна исходной структуры.

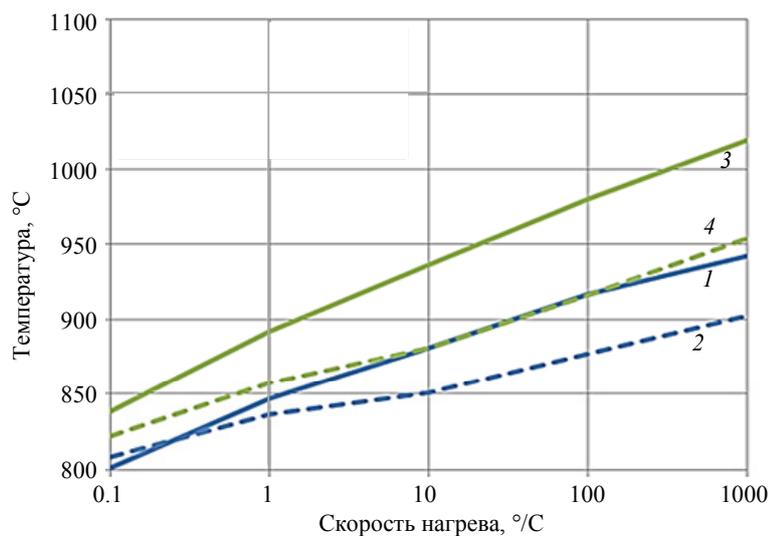
В ряде работ, опубликованных Н. В. Зиминим и Ф. В. Безменовым [6], [9], [10], представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных ранее во ВНИИТВЧ по определению температур аустенизации и гомогенизации для слаболегированных углеродистых сталей во время индукционного нагрева разной интенсивности. На рис. 4 представлены зависимости температур аустенизации и гомогенизации от скорости нагрева при размерах исходного зерна 10 и 100 мкм для стали ст45 [6]. Увеличение исходного размера зерна и скорости нагрева приводит к росту температуры критических точек.

В [9] приведены формулы, основанные на линейной интерполяции данных [6], но они не учитывают около трети экспериментальных значений. Поэтому в настоящем исследовании были заново построены интерполянты как на основе



1 – 0.2 см, уд. мощность [2]; 4 – 0.2 см, уд. мощность п/г;
 2 – 0.2 см, уд. мощность в/о; 5 – 0.2 см, время [2];
 3 – 0.2 см, время п/г; 6 – 0.2 см, время в/о.

Рис. 3. Результаты расчетов зависимостей удельной мощности и времени нагрева от диаметра нагреваемого цилиндра на частоте тока 10 000 Гц стали ст45 на глубине закалки 0.2 см
 Fig. 3. Calculation results of the dependences of the specific power and heating time on the diameter of the heated cylinder at a current frequency of 10 000 Hz for steel St45 at a quenching depth of 0.2 cm



1 – t_a , 100 мкм; 3 – t_h , 100 мкм;
 2 – t_a , 10 мкм; 4 – t_h , 10 мкм

Рис. 4. Зависимости температур аустенизации и гомогенизации от скорости нагрева при размерах исходного зерна 10 и 100 мкм для стали ст45
 Fig. 4. Dependences of austenization and homogenization temperatures on the heating rate at the initial grain sizes of 10 and 100 microns for steel St45

нейронных сетей, так и с помощью формул нелинейной регрессии:

$$t_x = a + bC_x + cy + dz + eC_x y + fC_x z + gyz + hC_x^2 + iy^2 + jz^2 + kC_x^2 y^2 + lC_x^2 z^2 + my^2 z^2,$$

где t_x – температура аустенизации или гомогенизации, °C; C_x – процентное содержание углерода

в стали, %; y – десятичный логарифм размера зерна, мкм; z – десятичный логарифм скорости нагрева, °C/c; $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m$ – коэффициенты нелинейной регрессии.

В связи с зашумленностью исходных данных предварительно была проведена экспертная оценка с присвоением экспериментальным значениям весовых коэффициентов. В таблице приведены коэффициенты для уравнения нелинейной ре-

грессии для определения температур гомогенизации и аустенизации низколегированных сталей с содержанием углерода от 0.2 до 0.8 % при скорости нагрева от 0.1 до 1000 °C/с для размера зерна исходной структуры от 1 до 100 мкм.

Коэффициенты нелинейной регрессии
Onlinear regression coefficients

Коэффициенты	Температура t , °C	
	Аустенизация	Гомогенизация
a	923.005	925.424
b	-269.067	-265.810
c	17.148	19.427
d	4.337	2.113
e	-7.506	0.437
f	8.030	11.000
g	11.177	19.851
h	50.445	43.544
i	2.841	8.229
j	2.076	1.967
k	-4.208	-13.491
l	-2.100	-2.644
m	-0.134	0.444

Для определения предельной допустимой твердости на поверхности закаливаемого изделия необходима информация о размере зерна аустенита. Для этого была произведена аппроксимация экспериментальных данным [11] о росте зерна аустенита углеродистых сталей от температуры (от 800 до 1100 °C) и скорости нагрева (0.1 до 1000 °C/с):

$$D_a = 10^{(a+bt_a+cv)},$$

где D_a – размер зерна при температуре аустенизации, мкм; t_a – температура аустенизации, °C; v – десятичный логарифм скорости нагрева, °C/с; $a = -1.64862$, $b = 0.003$, $c = -0.17618$ – коэффициенты регрессии.

После достижения температуры аустенизации дальнейший рост зерна предполагается из соотношения ~7 % на каждые 10° нагрева [11], что соответствует формуле

$$D_h = D_a e^{\ln(2)(t_h-t_a)/100},$$

где D_h – размер зерна при температуре гомогенизации, мкм; t_h – температура гомогенизации, °C.

Твердость после охлаждения для стали марки ст45 можно рассчитать на основе экспериментальных данных [11], [12] по следующим формулам: при $D \in [0; 20]$:

$$\text{HRC}(D, y) = -0.2D + 3y + 58;$$

при $D \in [20; 40]$:

$$\text{HRC}(D, y) = -0.05D + 3y + 55,$$

где HRC – твердость по Роквеллу; D – размер зерна аустенита, мкм; y – десятичный логарифм скорости нагрева, °C/с.

Разработка алгоритма, учитывающего экспериментальные данные. Для проведения вычислительных исследований и подбора оптимальной мощности индукционного нагрева с точки зрения критериев металловедения был разработан итерационный алгоритм управления численной электро-тепловой моделью, и на его основе создана программа. Такой подход, основанный на создании моделей, управляющих другими моделями, характерен для школы индукционного нагрева ЛЭТИ [8]. Далее следует описание алгоритма.

1. Перед работой алгоритма задаются частота питающего тока, содержание углерода в стали в процентах, размер исходного зерна, диаметр детали и требуемая глубина закалки, а также для начала итерационного процесса – предположительные удельная мощность и температура поверхности в конце индукционного нагрева.

2. Рассчитывается индукционный нагрев с помощью численной электро-тепловой модели. Один из результатов, время нагрева, позволяет определить среднюю скорость нагрева поверхности от температуры Ac1 (принимается за 727 °C) до максимальной температуры.

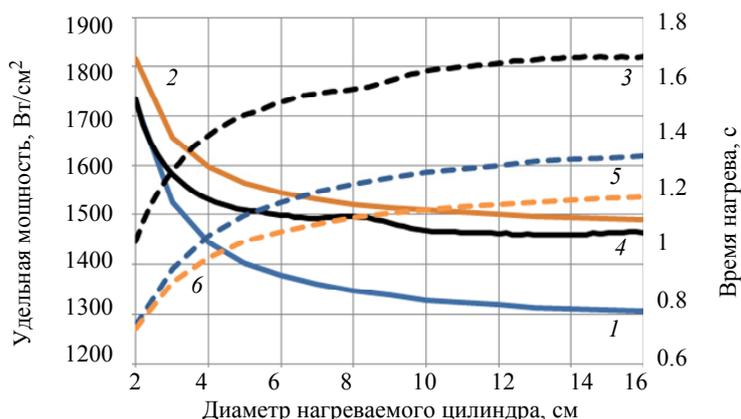
3. На основании скорости нагрева поверхности по формулам регрессии определяется требуемая максимальная температура поверхности (температура гомогенизации).

4. Если температура гомогенизации не равна с заданной точностью температуре поверхности, представленной в конце расчета в п. 2, то температуру гомогенизации принимаем за требуемую температуру на поверхности в конце нагрева и переходим к п. 2.

5. По результатам расчета в п. 2 определяется температура на глубине закалки.

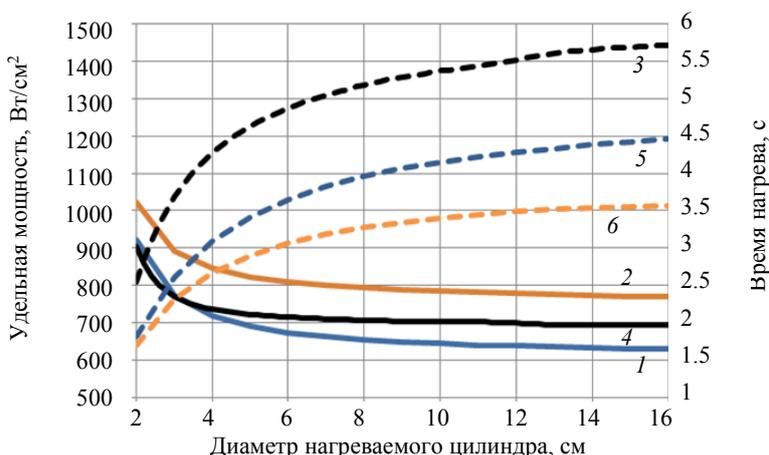
6. Если температура на глубине закалки не равна с заданной точностью 750 °C, то методом обратной квадратичной интерполяции находится новая удельная мощность и происходит переход к п. 2.

7. В случае успешной сходимости итераций в качестве результата кроме необходимой поверхностной мощности и времени нагрева рассчитываются зерно аустенита и предельно возможная твердость на поверхности.



1 – 0.2 см, уд. мощ. ст45; 4 – 0.2 см, уд. мощ. [2] ст45;
 2 – 0.2 см, уд. мощ. ст35; 5 – 0.2 см, время ст45;
 3 – 0.2 см, время [2] ст45; 6 – 0.2 см, время ст35;

Рис. 5. Результаты расчетов для закалки на частоте тока 10 000 Гц сталей ст45 и ст35 с размером исходного зерна 100 мкм на глубине закалки 0.2 см
 Fig. 5. Calculation results for quenching at a current frequency of 10 000 Hz steel St45 and St45 with a grain size of 100 microns at a quenching depth of 0.2 cm



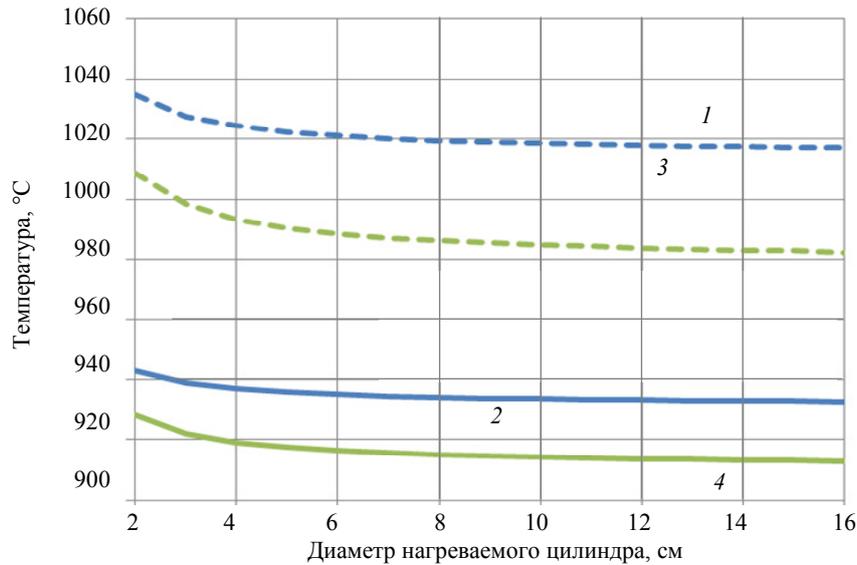
1 – 0.3 см, уд. мощ. ст45; 4 – 0.3 см, уд. мощ. [2] ст45;
 2 – 0.3 см, уд.мощ. ст35; 5 – 0.3 см, время ст45;
 3 – 0.3 см, время [2] ст45; 6 – 0.3 см, время ст35

Рис. 6. Результаты расчетов для закалки на частоте тока 10 000 Гц сталей ст45 и ст35 с размером исходного зерна 100 мкм на глубине закалки 0.3 см
 Fig. 6. Calculation results for quenching at a current frequency of 10 000 Hz steel St45 and St45 with a grain size of 100 microns at a quenching depth of 0.3 cm

Обсуждение результатов. На рис. 5 и 6 приведены результаты расчетов индукционной закалки на частоте тока 10 000 Гц для углеродистых сталей ст35 и ст45 с размером исходного зерна 100 мкм. Расчеты проводились для глубины закалки 0.2 и 0.3 см. На графиках видна существенная разница в параметрах нагрева – для стали ст35 требуемая удельная мощность примерно на 20 % выше. Для сравнения также приводятся результаты аналитических расчетов проф. А. Е. Слухоцкого [5].

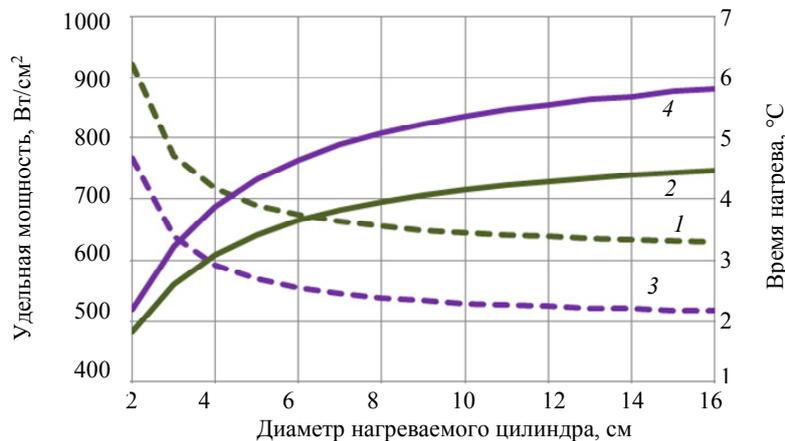
Хорошее совпадение удельной мощности, рассчитанной во временной области, с аналити-

ческим решением следует считать совпадением. На рис. 7 приведены зависимости температур аустенизации и гомогенизации на поверхности детали, которые определяются на основании средней скорости нагрева поверхности после критической точки A_{c1} по формуле регрессии при глубине закалки 0.2 и 0.3 см. Значение температуры гомогенизации значительно выше значения 900 °С, которое применялось в [4], [5]. Таким образом, результаты исследования авторов отличаются от [5] не только в связи с использованием более точной численной модели, но



1 – 0.2 см, t_h ; 2 – 0.2 см, t_a ; 3 – 0.3 см, t_h ; 4 – 0.3 см, t_a

Рис. 7. Значения температур гомогенизации и аустенизации на поверхности детали для разных режимов нагрева на частоте 10 000 Гц при глубине закалки 0.2 и 0.3 см
Fig. 7. Values of homogenization and austenization temperatures on the surface of the part for different heating modes at a frequency of 10 000 Hz at a quenching depth of 0.2 and 0.3 cm



1 – 100 мкм, уд. мощность; 3 – 50 мкм, уд. мощность;
2 – 100 мкм, время; 4 – 50 мкм, время

Рис. 8. Влияние исходной структуры на параметры термообработки
Fig. 8. Influence of the initial structure on the parameters of heat treatment

и в связи с тем, что рассчитывались совершенно другие режимы индукционного нагрева, учитывающие фазовые превращения. При расчете же одинаковых режимов работы индуктора разница результатов существенна.

Влияние исходной структуры на параметры термообработки показаны на рис. 8. Расчеты выполнены для углеродистой стали ст45 на частоте 10 000 Гц с размерами исходного зерна 50 и 100 мкм для глубины закалки 0.3 см. Разница между кривыми на рисунке определяется тем, что для более крупного исходного зерна при одинаковой скорости нагрева температура гомогенизации должна быть выше.

С развитием современных транзисторных источников питания в практике индукционной термообработки заметно чаще стали использовать частоту тока выше звукового диапазона. На рис. 9 приведены результаты расчетов для закалки на частоте тока 60 000 Гц для углеродистой стали ст45 с размером исходного зерна 100 мкм. Расчеты проводились для глубины закалки 0.1, 0.15 и 0.2 см. Для последнего значения полученные кривые можно сравнить с результатами нагрева на частоте 10 000 Гц, представленными на рис. 5.

На рис. 10 приведены зависимости предельно достижимой твердости по Роквеллу, рассчитан-

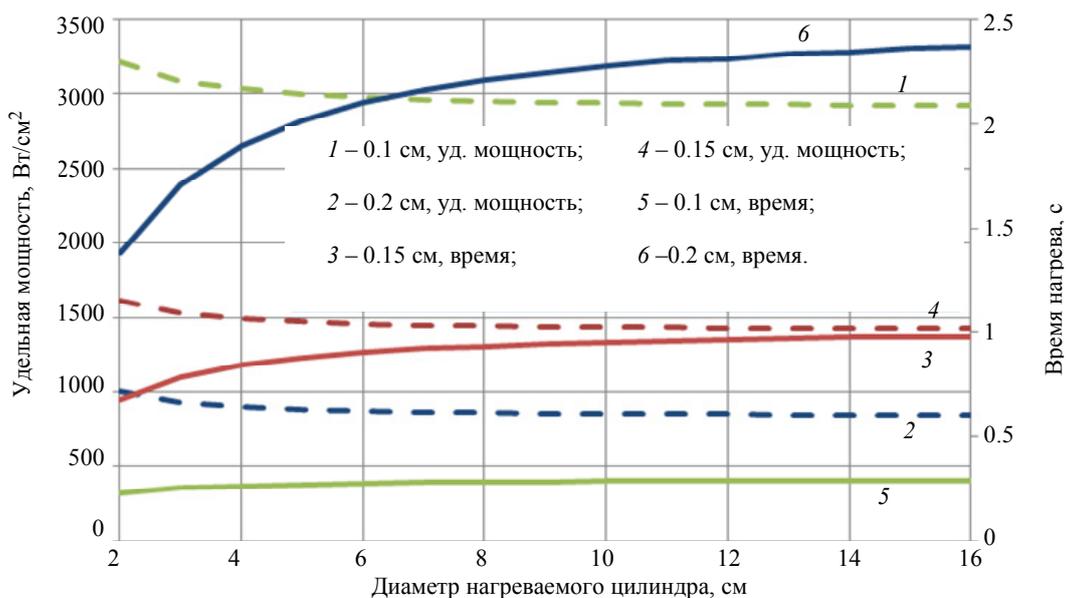


Рис. 9. Результаты расчетов для заковки на частоте тока 60 000 Гц для углеродистой стали ст45 с размером исходного зерна 100 мкм при глубине заковки 0.1, 0.15 и 0.2 см
 Fig. 9. Calculation results at a current frequency of 60 000 Hz for carbon steel St45 with an initial grain size of 100 microns at a quenching depth of 0.1, 0.15 and 0.2 cm

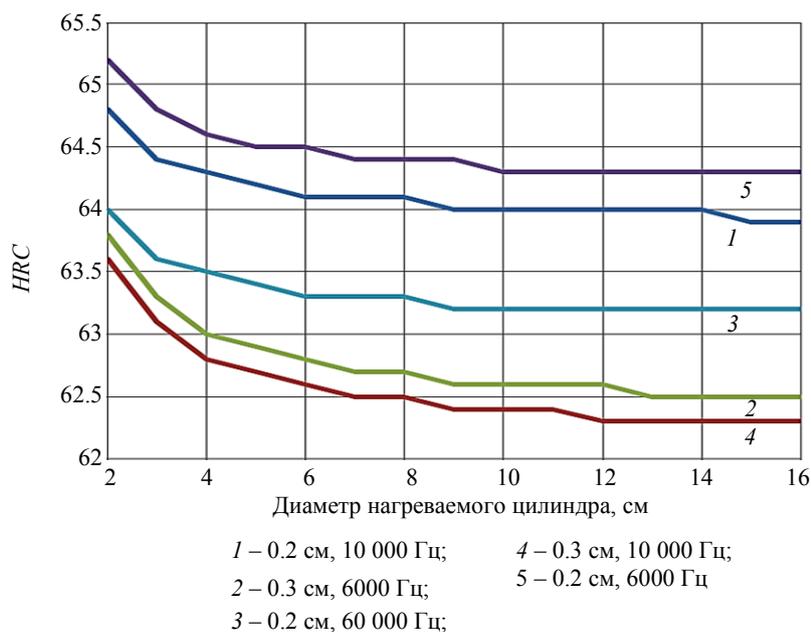


Рис. 10. Зависимости предельно достижимой твердости по Роквеллу для глубины заковки 0.2 и 0.3 см
 Fig. 10. Dependences of the maximum achievable Rockwell hardness for the quenching depth of 0.2 and 0.3 cm

ные на основании размера зерна аустенита на поверхности цилиндрической детали из стали ст45 после индукционного нагрева на частотах 6000, 10 000 и 60 000 Гц для глубин заковки 0.2 и 0.3 см. Таким образом, разработанная модель может использоваться для оптимизации выбора частоты тока для индукционной заковки на основе критерия предельно достижимой твердости.

Выводы и заключение. Разработанная модель имеет свои недостатки, хоть и основана на экспериментальных данных. К сожалению, в экспериментальных исследованиях Н. В. Зимина не уделялось внимание зависимости критической точки Ас1 от скорости нагрева. Такие данные есть в справочнике [12], но в нем не учитывается влияние исходного зерна на критические точки Ас1 и Ас3. Поэто-

му на данном этапе исследований было принято температуру A_{c1} оставить постоянной ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Существует также проблема с неоднозначностью задания температуры на глубине закалки. Как правило, глубина закалки задается либо по глубине измененной структуры, либо по 50 % мартенситной твердости. В первом случае в модели надо фиксировать температуру A_{c1} на глубине закалки. Во втором случае однозначного решения нет. Для индукционной закалки для 50 % твердости характерен мартенситно-троститный слой с вкраплениями феррита. Феррит может быть исходным, если во время нагрева слой не достиг температуры A_{c3} , а может быть вновь выделившимся из аустенита, если на глубинных слоях будет достаточно низкая скорость охлаждения в интервале температур $800\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Условие образования вновь выделившегося феррита зависит не только от режима нагрева, но и от режима охлаждения, что выходит за рамки данной модели. В связи с этим на глубине закалки фиксировалась температура $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, принятая в [4], [5]. Следует отметить, что Н. В. Зимин и Ф. В. Безменов в [13] использовали такое же значение для фиксации глубины закалки. Если в модели учитывать только исходный феррит, то следует на глубине закалки задавать температуру ниже A_{c3} , при которой еще не растворилось 10–15 % феррита.

Дальнейшее развитие этой статьи возможно в разных направлениях. Перспективно расширять экспериментальную базу и продолжить исследования, которые проводились во ВНИИТВЧ, с другими сталями, в первую очередь с хромистыми, например 40X.

Имеет смысл усовершенствовать разработанную модель, учитывая теплоперенос в осевом направлении и время задержки между концом

нагрева и началом охлаждения. Можно ориентироваться на разную архитектуру структурных превращений в поверхностном слое детали (к примеру, задавать глубину слоя гомогенизации) [14]. Интерес также представляет анализ сложных режимов нагрева, таких как нагрев с «импульсным» подогревом ниже и выше критической точки A_{c1} .

Однако, на взгляд авторов, наибольших результатов в этой области можно достичь, если обобщать не только результаты экспериментов, но и результаты, полученные с помощью разработанной модели. В свое время А. Д. Демичев по результатам модели проф. А. Е. Слухоцкого построил номограммы [15], однако в наш компьютерный век номограммы не столь удобны и информативны. Обобщение имеет смысл проводить с помощью искусственных нейронных сетей, которые позволяют «сжать информацию», предоставляя к ней очень быстрый доступ. Авторы использовали для исследования одномерную модель, но несмотря на это, в связи с сильной нелинейностью задачи нахождение решения в каждом отдельном случае требовало значительного времени, что не совместимо с работой на производстве. Только построение экспертной системы (электронные номограммы) на основе нейронных сетей позволит получать информацию о режимах индукционной закалки в реальном времени.

Следующим этапом возможен переход на другой уровень обобщений, как предложено в работе проф. А. Е. Слухоцкого [5]. На основе результатов о необходимой удельной мощности далее рассчитываются напряжение и ток закалочных индукторов. Нейронные сети можно применить и для этой задачи в случае простой геометрии индуктора и детали.

Список литературы

1. Лозинский М. Г. Поверхностная закалка стали при нагреве токами высокой частоты. Л., М.: Металлургиздат, 1940. 125 с.
2. Northrup E. Practical methods for heating by induction // Iron Age. 1933. Vol. 131. P. 310–311.
3. Osborn H. B. The Tocco process. Cleveland, Ohio: Crankshaft Co, 1944.
4. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
5. Слухоцкий А. Е. Индукторы / под ред. А. Н. Шамова. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1989. 69 с.
6. Зимин Н. В. О влиянии температуры, скорости нагрева и исходного состояния структуры углеродистых сталей на процессы образования в них аустенита // Металлообработка. 2006. № 1 (31).
7. Немков В. С., Демидович В. Б. Теория и расчет установок индукционного нагрева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
8. Демидович В. Б., Чмиленко Ф. В. Численные методы в теории индукционного нагрева, СПб.: Технолит, 2008. 220 с.
9. Безменов Ф. В., Зимин Н. В. Математические аналоги экспериментальных зависимостей процессов аустенизации и гомогенизации от некоторых характеристик сталей и технологических параметров термообработки // Металлообработка. 2006. № 4 (34). С. 30–36.
10. Безменов Ф. В., Зимин Н. В. Математические аналоги экспериментальных зависимостей результатов термической обработки сталей от исходного состояния структуры, размеров аустенитного зерна и

параметров нагрева и охлаждения // *Металлообработка*. 2006. № 5–6 (35–36). С. 59–63.

11. Зимин Н. В. Влияние интенсификации охлаждения после различных видов нагрева на прокаливаемость и закаливаемость углеродистых нелегированных сталей // *Металлообработка*. 2006. № 2 (32). С. 36–42.

12. Von J. Orlich, A. Rose, P. Wieast, Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. Band 3: Zeit – Temperatur – Austenitisierung – Schaubilder. Teil: Stahleisen, 1973.

13. Безменов Ф. В., Зимин Н. В. Анализ и оптимизация технологических параметров индукционной

поверхностной закалки цилиндрических деталей аналитическими методами решения электротепловых задач // *Металлообработка*. 2009. № 5 (53). С. 18–27.

14. Безменов Ф. В., Зимин Н. В. Контроль процесса аустенизации при индукционном нагреве под поверхностную закалку цилиндрических объектов // *Металлообработка*. 2010. № 6 (60). С. 18–27.

15. Демичев А. Д. Поверхностная закалка индукционным способом. Л.: Машиностроение, 1979. 80 с.

Информация об авторах

Чмиленко Федор Викторович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

Шанин Юрий Вячеславович – аспирант, кафедра электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

Хоршев Алексей Алексеевич – аспирант, кафедра электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

Бондарь Алексей Сергеевич – аспирант, кафедра электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

Чжан Ци – аспирант, кафедра электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

Бондаренко Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра электротехнологической и преобразовательной техники (ЭТПТ), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия.

Вклад авторов

Чмиленко Ф. В. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Шанин Ю. В. – расчет интерполянтов определения температур аустенизации и гомогенизации, аппроксимация экспериментальных данных о росте зерна аустенита, доработка текста.

Хоршев А. А. – аналитические расчеты для цилиндрических деталей из среднеуглеродистой стали, расчеты с использованием разработанного алгоритма.

Бондарь А. С. – разработка алгоритма, учитывающего экспериментальные данные, расчеты с использованием разработанного алгоритма.

Чжан Ци – расчет интерполянтов определения температур аустенизации и гомогенизации, аппроксимация экспериментальных данных о росте зерна аустенита.

Бондаренко Д. Н. – разработка алгоритма для одномерной области, итоговые выводы.

References

1. Lozinskij M. G. Poverhnostnaya zakalka stali pri nagreve tokami vysokoj chastoty. L., M.: Metallurgizdat, 1940. 125 s. (In Russ.).

2. Northrup E. Practical methods for heating by induction // *Iron Age*. 1933. Vol. 131. P. 310–311.

3. Osborn H. B. The Tocco process. Cleveland, Ohio: Crankyhaft Co, 1944.

4. Sluhockij A. E., Ryskin S. E. Induktory dlya indukcionnogo nagreva. L.: Energiya, 1974. 264 s. (In Russ.).

5. Sluhockij A. E. Induktory / pod red. A. N. SHamova. 5-e izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroenie, 1989. 69 s. (In Russ.).
 6. Zimin N. V. O vliyaniy temperatury, skorosti nagreva i iskhodnogo sostoyaniya struktury uglerodistykh stalej na processy obrazovaniya v nih austenita // Metalloobrabotka. 2006. № 1 (31). (In Russ.).
 7. Nemkov V. S., Demidovich V. B. Teoriya i raschet ustanovok indukcionnogo nagreva. L.: Energoatomizdat, 1988. 280 s. (In Russ.).
 8. Demidovich V. B., Chmilenko F. V. Chislennye metody v teorii indukcionnogo nagreva, SPb.: Tekhnolit, 2008. 220 s. (In Russ.).
 9. Bezmenov F. V., Zimin N. V. Matematicheskie analogi eksperimental'nykh zavisimostej processov austenizatsii i gomogenizatsii ot nekotorykh harakteristik stalej i tekhnologicheskikh parametrov termoobrabotki // Metalloobrabotka. 2006. № 4 (34). S. 30–36. (In Russ.).
 10. Bezmenov F. V., Zimin N. V. Matematicheskie analogi eksperimental'nykh zavisimostej rezul'tatov termicheskoy obrabotki stalej ot iskhodnogo sostoyaniya struktury, razmerov austenitnogo zerna i parametrov nagreva i ohlazhdeniya // Metalloobrabotka. 2006. № 5–6 (35–36). S. 59–63. (In Russ.).
 11. Zimin N. V. Vliyaniye intensifikatsii ohlazhdeniya posle razlichnykh vidov nagreva na prokalivaemost' i zakalivaemost' uglerodistykh nelegirovannykh stalej // Metalloobrabotka. 2006. № 2 (32). S. 36–42. (In Russ.).
 12. Von J. Orlich, A. Rose, P. Wieast, Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle. Band 3: Zeit – Temperatur – Austenitisierung – Schaubilder. Teil: Stahleisen, 1973.
 13. Bezmenov F. V., Zimin N. V. Analiz i optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov indukcionnoj poverhnostnoj zakalki cilindricheskikh detalej analiticheskimi metodami resheniya elektroteplovyykh zadach // Metalloobrabotka. 2009. № 5 (53). S. 18–27. (In Russ.).
 14. Bezmenov F. V., Zimin N. V. Kontrol' processa austenizatsii pri indukcionnom nagreve pod poverhnostnuyu zakalku cilindricheskikh ob'ektov // Metalloobrabotka. 2010. № 6 (60). S. 18–27. (In Russ.).
 15. Demichev A. D., Poverhnostnaya zakalka indukcionnym sposobom, L.: Mashinostroenie, 1979. 80 s. (In Russ.).
-

Information about the authors

Fedor V. Chmilenko, Dr Sci. (Eng.), Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University, Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

Yurii V. Shanin, postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

Alexey A. Khorshev, postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

Alexey S. Bondar, postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

Qi Zhang – postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University, Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

Dmitry N. Bondarenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University, Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Professor Popov str., 5F, Saint Petersburg, 197022, Russia.

Contribution of the authors

Chmilenko F. V. – scientific guidance; research concept; development of methodology; writing of the original paper; final conclusions.

Shanin Y. V. – calculation of interpolants for determining austenization and homogenization temperatures, approximation of experimental data on austenite grain growth, revision of the paper.

Khorshev A. A. – analytical calculations for cylindrical parts made of medium carbon steel, calculations using the developed algorithm.

Bondar A. S. – development of an algorithm that takes into account experimental data, calculations using the developed algorithm.

Qi Zhang – calculation of interpolants for determining austenization and homogenization temperatures, approximation of experimental data on the growth of austenite grains.

Bondarenko D. N. – development of an algorithm for a one-dimensional domain, final conclusions.

Статья поступила в редакцию 20.01.2022; принята к публикации после рецензирования 31.01.2022; опубликована онлайн 11.03.2022.

Submitted 20.10.2022; accepted 31.01.2022; published online 11.03.2022.
