

**Численная модель индукционного нагрева под закалку
с учетом процесса аустенизации в углеродистых сталях****Ф. В. Чмиленко¹, И. И. Растворова², А. А. Сафронов³,
Ю. Ю. Перевалов¹, В. Е. Пармёнов¹✉**¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия³ Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук
(ИЭЭ РАН), Санкт-Петербург, Россия

✉parmenov.slava@yandex.ru

Аннотация. Разработан алгоритм и на его основе создана численная модель, которая для деталей цилиндрической формы при заданных частоте, диаметре детали и глубине закалки находит требуемую мощность и время нагрева с учетом достижения необходимых температур гомогенизации на поверхности и температуры аустенизации на глубине закалки. Необходимые температуры должны согласовываться со скоростью нагрева, которая значительно различается на поверхности и на глубине нагрева детали. Представлены результаты численного моделирования для тел цилиндрической формы из стали 45 с учетом разных критериев задания глубины закалки. Также приводится сравнение режимов закалки с учетом различной архитектуры закаленного слоя.

Ключевые слова: индукционный нагрев, поверхностная закалка, аустенизация, гомогенизация, численная модель, численное моделирование

Для цитирования: Численная модель индукционного нагрева под закалку с учетом процесса аустенизации в углеродистых сталях / Ф. В. Чмиленко, И. И. Растворова, А. А. Сафронов, Ю. Ю. Перевалов, В. Е. Пармёнов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 61–72. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-61-72.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

**Numerical Model of Induction Heating under Quenching Taking into Account
the Austenization Process in Carbon Steels****F. V. Chmilenko¹, I. I. Rastvorova², A. A. Safronov³, Yu. Yu. Perevalov¹, V. E. Parmenov¹✉**¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia² Saint Petersburg Mining University Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia³ Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences
(IEE RAS), Saint Petersburg, Russia

✉parmenov.slava@yandex.ru

Abstract. In the present work the task was to develop an algorithm and, on its basis, to create a numerical model, which for cylindrical-shaped parts at a given frequency, part diameter and quenching depth finds the

required power and heating time, taking into account the achievement of the required homogenization temperatures on the surface and the austenization temperature at the hardening depth. The required temperatures must be coordinated with the heating rate, which varies significantly on the surface of the part and the depth of hardening. The paper presents numerical modeling results for steel 45 cylindrical-shaped bodies taking into account different criteria for setting the hardening depth. A hardening modes comparison taking into account different hardening layer architecture is also presented.

Keywords: induction heating, surface hardening, austenization, homogenization, numerical model, numerical simulation

For citation: Numerical Model of Induction Heating under Quenching Taking into Account the Austenization Process in Carbon Steels / F. V. Chmilenko, I. I. Rastvorova, A. A. Safronov, Yu. Yu. Perevalov, V. E. Parmenov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 61–72. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-61-72.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Известно, что при индукционной поверхностной закалке на формирование закаленного слоя влияет большое количество разнообразных факторов, основные из них – температура и скорость нагрева, химический состав и исходная структура стали, ее теплофизические свойства, а также условия внешнего и внутреннего теплоотвода. На этапе нагрева в значительной степени качество термической обработки определяется точностью фиксации моментов аустенизации и гомогенизации структуры металла [1]. В свою очередь температуры аустенизации и гомогенизации зависят от скорости нагрева. Информацию об этих зависимостях можно получить из термокинетических диаграмм аустенизации (нагрева) [2].

Определение требуемой мощности и времени нагрева составляет одну из классических задач теории индукционного нагрева. Одним из первых обосновал и предложил методы расчета для поверхностной закалки А. Е. Слухоцкий. Его брошюра «Индукторы» [3], посвященная этой проблеме, начиная с середины 1950-х гг. выдержала 5 изданий. Тем не менее, разработанные аналитические методы достаточно приближенные, так как не учитывают металлургические особенности проблемы. К примеру, для расчетов, приведенных в [3], температуры в характерных точках берутся постоянными, на поверхности детали 900 °С, а на глубине закалки 750 °С.

Одна из первых моделей, определяющая мощность и время нагрева в соответствии с влиянием скорости нагрева на необходимую температуру нагрева, была предложена Н. В. Зиминым и Ф. В. Безменовым [4], [5]. Она основана на экспериментальных термокинетических диаграммах аустенизации (нагрева), полученных во «Всероссийском научно-исследовательском институте токов высокой частоты им. В. П. Вологодина»

(ВНИИТВЧ) Н. В. Зиминым [1]. Эта модель также обладает существенными недостатками, так как для электротеплового расчета использовались аналитические методы, плохо учитывающие нелинейные свойства нагреваемого материала.

Дальнейшее развитие модели Н. В. Зиминова и Ф. В. Безменова представлено в работах, проведенных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [6], [7]. Сопряженные нелинейные электромагнитная и тепловая задачи решались с помощью численной модели на основе метода конечных разностей. Определение требуемой мощности и времени было автоматизировано с помощью итерационного алгоритма. Тем не менее, разработанные модели не учитывают все особенности процесса. А именно, не учитывается то, что во время остывания до температур критических точек A_{c3} и A_{c1} в заготовке могут продолжаться фазовые превращения.

Данное исследование – это продолжение публикаций [6], [7], которое показывает, что для корректного определения требуемой мощности и времени нагрева при индукционной закалке необходимо моделировать также и начальную стадию охлаждения.

Термокинетические диаграммы аустенизации. Металловедение из-за сложности процессов и явлений, которое оно изучает, до сих пор отстает от других областей техники по степени обобщенности и использованию математического аппарата. Поэтому при построении численных моделей индукционного нагрева чуть ли не единственным источником информации о фазовых превращениях служат термокинетические диаграммы. Изотермические диаграммы менее распространены для процесса нагрева, чем для охлаждения, так как в случае нагрева они сильно зависят от скорости достижения температуры изотермической выдержки.

Главный недостаток термокинетических диаграмм, приведенных Н. В. Зиминым в [1], состоит в том, что в них содержится информация только о зависимости температуры гомогенизации и температуры критической точки A_{c3} от скорости нагрева, и отсутствует информация об изменении температуры критической точки A_{c1} . В связи с этим в данной статье использовались термокинетические диаграммы аустенизации из немецкого справочника [2]. На рис. 1 представлены зависимости температур начала фазовых превращений θ_{Ac1} , конца аустенизации θ_{Ac3} и полной технической гомогенизации θ_{Γ} от скорости нагрева для стали 45. Техническая гомогенизация отличается от понятия химической гомогенизации и соответствует нижнему уровню нагрева для достижения наибольшей возможной твердости.

Корректная работа с термокинетической диаграммой возможна только вдоль линии постоянной скорости, поэтому данная диаграмма не приспособлена для учета выдержки на температурах выше критических перед началом охлаждения. Однако на практике выдержка неизбежна. Для поверхности заготовки время выдержки составляет время, когда деталь уже не греется, а интенсивное душевое охлаждение еще не началось. Для зоны на глубине закалки дополнительно существует еще естественная выдержка, вызванная ограниченной скоростью теплоотвода. В связи с этим для корректного использования термокинетических диаграмм аустенизации авторы применили понятие эквивалентной скорости нагрева (рис. 2). Для ее расчета требуется максимальный перепад температур от 700 °С поделить на время, которое включает фазу нагрева t_H , задержку перед охлаждением t_3 и фазу охлаждения до конца необходимых фазовых превращений $t_{охл}$:

$$V_{\text{экв}} = \frac{\theta_{\text{max}} - 700}{t_H + t_3 + t_{\text{охл}}}.$$

В то время как классическая скорость нагрева вычисляется как отношение максимального перепада температур от 700 °С ко времени нагрева t_H :

$$V_H = \frac{\theta_{\text{max}} - 700}{t_H}.$$

Для поверхности детали расчет скорости прерывается при снижении температуры до минимальной температуры гомогенизации $\theta_{\Gamma \text{ min}}$ (рис. 1).

А для точки на глубине закалки – при снижении температуры либо до минимальной температуры начала аустенизации $\theta_{Ac1 \text{ min}}$, либо до минимальной температуры в районе конца аустенизации $\theta_{Ac3 \text{ min}}$, в зависимости от того по какому критерию задается глубина закалки.

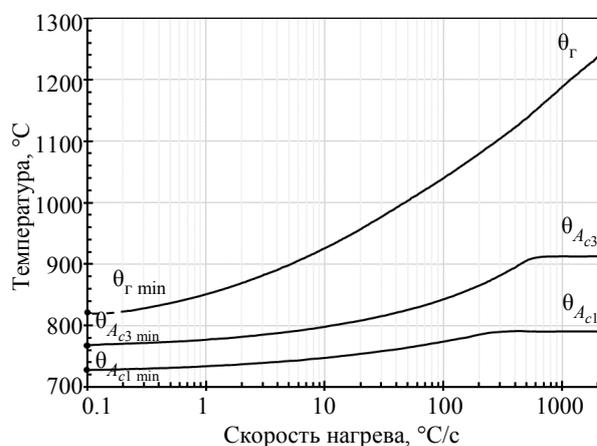


Рис. 1. Зависимости температур начала фазовых превращений θ_{Ac1} , конца аустенизации θ_{Ac3} и полной технической гомогенизации θ_{Γ} от скорости нагрева для стали 45 [2]
 Fig. 1. Phase transformation beginning θ_{Ac1} , austenitization ending θ_{Ac3} and complete technical homogenization θ_{Γ} temperatures dependences as a heating rate function for steel 45 [2]

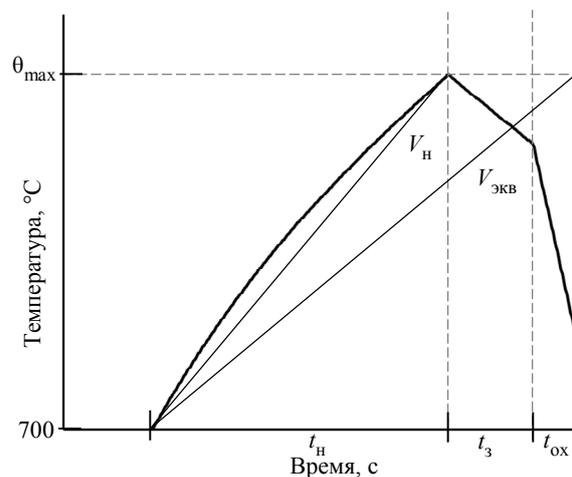


Рис. 2. Понятие эквивалентной скорости нагрева $V_{\text{экв}}$ в сравнении со скоростью нагрева V_H
 Fig. 2. Equivalent heating rate $V_{\text{экв}}$ concept compared to heating rate V_H

Архитектура структурных превращений в поверхностном слое. При индукционной поверхностной закалке температура гомогенизации θ_{Γ} – это минимальная температура, до которой необходимо нагреть поверхность. Незначитель-

ный перегрев возможен, но при дальнейшем нагреве поверхности растет зерно аустенита, что впоследствии приводит к снижению твердости и ухудшению механических характеристик закаленного слоя. Информацию о предельной температуре, которую допускается получить на поверхности детали, можно брать из термокинетических диаграмм аустенизации [2].

Приемлемый перегрев поверхности дает возможность получить полностью гомогенизированный слой. Управляя толщиной этого слоя, можно влиять на архитектуру структурных превращений. Примерная схема аустенизации сечения при поверхностном нагреве под закалку цилиндрической детали приведена на рис. 3, где x_r – глубина, на которой должны завершиться процессы гомогенизации; x_a – предпочтительная заданная глубина закалки, где должны завершиться процессы аустенизации; x_c – предельная наибольшая по отношению к x_a глубина закалки.

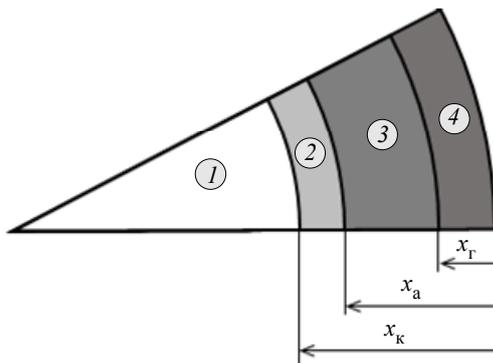


Рис. 3. Схема аустенизации сечения при поверхностном нагреве под закалку цилиндрической детали: 1 – сырой материал; 2 – переходный слой; 3 – ядро аустенизации; 4 – гомогенизированный поверхностный слой
Fig. 3. Scheme of section austenitization at surface heating for cylindrical part hardening: 1 – raw material; 2 – transition layer; 3 – austenitization core; 4 – homogenized surface layer

Проблема задания глубины закаленного слоя. Как правило, глубина закаленного слоя принимается равной расстоянию от поверхности до той зоны, где в структуре имеется 50 % мартенсита. Однако при поверхностной закалке невозможно получить так называемую полумартенситную структуру (50 % мартенсита + 50 % троостита) [8]. Этому препятствует появление в закаленном слое феррита. Он может быть двух типов: «исходный» феррит, не претерпевший превращений при нагреве (не успевший раствориться в аустените вследствие недостаточного нагрева), и «выделившийся» феррит из аустенита вследствие недоста-

точного быстрого его последующего переохлаждения в интервале 800...700 °С.

В связи с вышеизложенным для индукционной поверхностной закалки определение глубины закаленного слоя имеет смысл проводить не по структуре, а по твердости и в качестве критерия оценки принять полумартенситную твердость. При этом структура на границе закаленного слоя, как правило, для стали 45 состоит из отпущенного мартенсита (~60 %), троостита (~25–30 %) и феррита (10–15 %).

Появление феррита в структуре закаленного слоя усложняет моделирование процесса индукционной закалки, так как невозможно заранее определить до какой температуры необходимо нагреть деталь на глубине закаленного слоя. Чтобы оценить, есть ли условия для формирования «выделившегося» феррита, необходимо провести предварительный расчет с нагревом на глубине закалки до температуры θ_{Ac3} . После этого на этапе охлаждения скорость, с которой остывает деталь на глубине закалки в интервале 800...700 °С необходимо сравнить с критической скоростью охлаждения, достаточной для образования феррита. Значение критической скорости образования феррита можно получить из термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита [9], но фактическое ее значение, скорее всего, должно быть больше, так как распад из неравновесного состояния начинается практически сразу после нагрева. Если предварительное моделирование показало, что для формирования «выделившегося» феррита нет условий, то при моделировании нагрева на глубине закалки следует зафиксировать температуру с учетом заданного количества (в процентах) не успевшего раствориться в аустените феррита (меньше, чем θ_{Ac3}).

Альтернативный подход задания глубины закаленного слоя основан на технологическом регламенте, который обычно содержит требования закалить поверхностный слой детали для заданной глубины, по возможности не затрагивая при этом ее внутренние слои [10]. Тогда необходимым условием для моделирования служит фиксация на заданной глубине закалки x_k температуры начала процесса аустенизации θ_{Ac1} . В данной статье отдается предпочтение этому способу задания закаленного слоя.

Алгоритм поиска удельной мощности и времени нагрева с учетом фазовых превращений. Блок-схема итерационного поиска поверх-

ностной удельной мощности $P_{уд}$ и времени нагрева t_H под закалку с учетом фазовых превращений для заданной глубины закалки без учета гомогенизированного слоя приведена на рис. 4.

Алгоритм итерационного поиска состоит из следующих этапов:

1. Ввод основных данных для расчета: марка стали, диаметр детали, частота тока, глубина закалки, коэффициент теплоотдачи и время задержки после окончания нагрева и до начала охлаждения. Ввод предполагаемых температуры нагрева поверхности $\theta_{п}$ и $P_{уд}$. Чем ближе предполагаемые значения к искомым, тем меньше итераций потребуется алгоритму.

2. Выполняется электротепловой расчет с попыткой нагрева поверхности до $\theta_{Г\ min}$.

3. Если $P_{уд}$ оказалась недостаточной для достижения $\theta_{Г\ min}$, она увеличивается на 10% и электротепловой расчет п. 2 выполняется заново. При достижении $\theta_{Г\ min}$ на поверхности алгоритм идет дальше.

4. Выполняется электротепловой расчет нагрева с температуры, полученной в п. 2 до $\theta_{п}$. Здесь же моделируется задержка перед охлаждением и стадия интенсивного охлаждения.

5. Вычисляется эквивалентная скорость нагрева поверхности $V_{п.\ экв}$.

6. По термокинетической диаграмме определяется температура гомогенизации $\theta_{Г}$, соответствующая скорости $V_{п.\ экв}$.

7. Проводится проверка равенства $\theta_{п}$ и определенной $\theta_{Г}$. Если ошибка равенства больше заданной, то $\theta_{п}$ принимает значение $\theta_{Г}$ и электротепловой расчет п. 4 выполняется заново. При успешной проверке равенства алгоритм идет дальше.

8. Вычисляется эквивалентная скорость нагрева на глубине закалки $V_{Г.з.\ экв}$.

9. По термокинетической диаграмме определяется температура аустенизации $\theta_{Ас1}$, соответствующая скорости $V_{Г.з.\ экв}$.

10. Проводится проверка равенства $\theta_{Г.з.\ max}$ и определенной $\theta_{Ас1}$. Если ошибка равенства больше заданной, то $P_{уд}$ корректируется методом секущих и электротепловой расчет п. 2 выполняется заново. При успешной проверке равенства работа алгоритма завершается.

11. Рассчитываются и сохраняются основные и вспомогательные результаты: $P_{уд}$, t_H , $\theta_{Г}$ и $V_{п.\ экв}$

для поверхности детали; $\theta_{Ас1}$ и $V_{Г.з.\ экв}$ для глубины закалки.

Дополнительные особенности алгоритма:

– если необходимо задать гомогенизированный слой, то вместо температуры и скорости нагрева на поверхности необходимо контролировать скорость нагрева и температуру на заданной глубине x_G ;

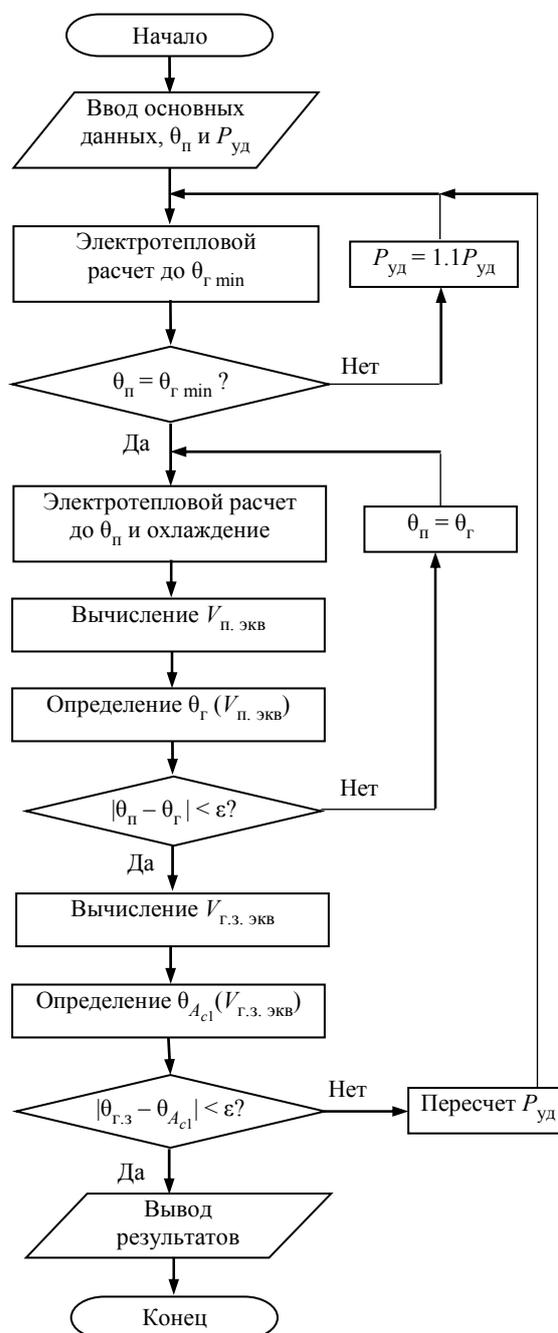
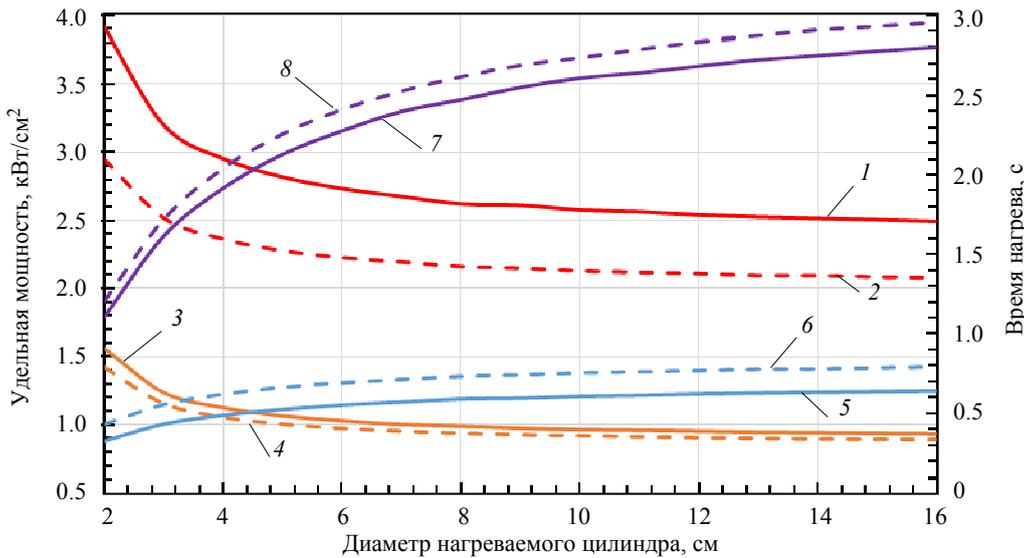


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска удельной мощности и времени нагрева с учетом фазовых превращений для заданной глубины закалки
Fig. 4. Block diagram of algorithm for finding specific power and heating time taking into account phase transformations for a given hardening depth



Удельная мощность: Время нагрева:
 1 – 0.2 см, $t_3 = 0.1$ с; 2 – 0.2 см, $t_3 = 0.4$ с; 5 – 0.2 см, $t_3 = 0.1$ с; 6 – 0.2 см, $t_3 = 0.4$ с;
 3 – 0.3 см, $t_3 = 0.1$ с; 4 – 0.3 см, $t_3 = 0.4$ с; 7 – 0.3 см, $t_3 = 0.1$ с; 8 – 0.3 см, $t_3 = 0.4$ с

Рис. 5. Зависимости $P_{уд}$ и t_n от диаметра нагреваемого цилиндра на частоте тока 10 000 Гц для глубины закалки 0.2 и 0.3 см при задержке охлаждения 0.1 и 0.4 с.

Fig. 5. Dependencies $P_{уд}$ and t_n on heated cylinder diameter at 10 000 Hz current frequency for 0.2 and 0.3 cm hardening depths with 0.1 and 0.4 s cooling delays. The hardening depth is fixed by the t_{Ac1} level

– в п. 10 приведенного алгоритма температура начала процесса аустенизации θ_{Ac1} может быть легко заменена на любую другую температуру, что изменит критерий задания глубины закаленного слоя;

– чтобы иметь возможность контролировать условия появления «выделившегося» феррита, алгоритм следует модифицировать и добавить определение скорости охлаждения для глубины закалки в интервалах 800...700 °С и 700...500 °С. Для этого в п. 4 процесс охлаждения следует моделировать до достижения на глубине закалки температуры 500 °С;

– в [6], [7] показано, что электротепловые модели, основанные на расчете по первой гармонике, дают большую погрешность при моделировании нагрева под закалку, поэтому электротепловой расчет следует проводить во временной области согласно численной модели, описанной в [11].

Результаты моделирования. Все результаты получены для цилиндрических деталей из стали 45 при частоте тока 10 000 Гц. Простая геометрическая форма, среднеуглеродистая сталь и данная частота тока были выбраны с целью облегчить последующую валидацию и калибровку разработанной модели.

Для моделирования охлаждения водяным душем использовался эквивалентный коэффициент теплоотдачи, равный 40 000 Вт/(м² · К) [12].

На рис. 5 и 6 показаны результаты численных расчетов без слоя гомогенизации, когда глубина закаленного слоя задавалась с помощью фиксации на глубине x_k (рис. 3) температуры начала процесса аустенизации θ_{Ac1} . Результаты получены для заданных глубин закалки 0.2 и 0.3 см. На рис. 5 приведены результаты численных расчетов удельной поверхностной мощности $P_{уд}$ и времени нагрева t_n при задержке охлаждения t_3 , равной 0.1 и 0.4 с. На рис. 6 приведены результаты расчетов температуры гомогенизации t_f и эквивалентной скорости нагрева $V_{п. экв}$ для поверхности детали, а также температуры начала аустенизации θ_{Ac1} и эквивалентной скорости нагрева $V_{г.з. экв}$ на заданных глубинах закалки с учетом задержки охлаждения 0.1 с.

Результаты расчетов на рис. 5 показывают, что увеличение времени задержки перед интенсивным душевым охлаждением снижает требуемую удельную поверхностную мощность, пропорционально увеличивая время нагрева с сохранением глубины закалки. Данный эффект наблюдается на малых глубинах закалки до 0.3 см. Результаты расчетов на рис. 6 показывают, что температура гомогенизации в большей степени зависит от глу-

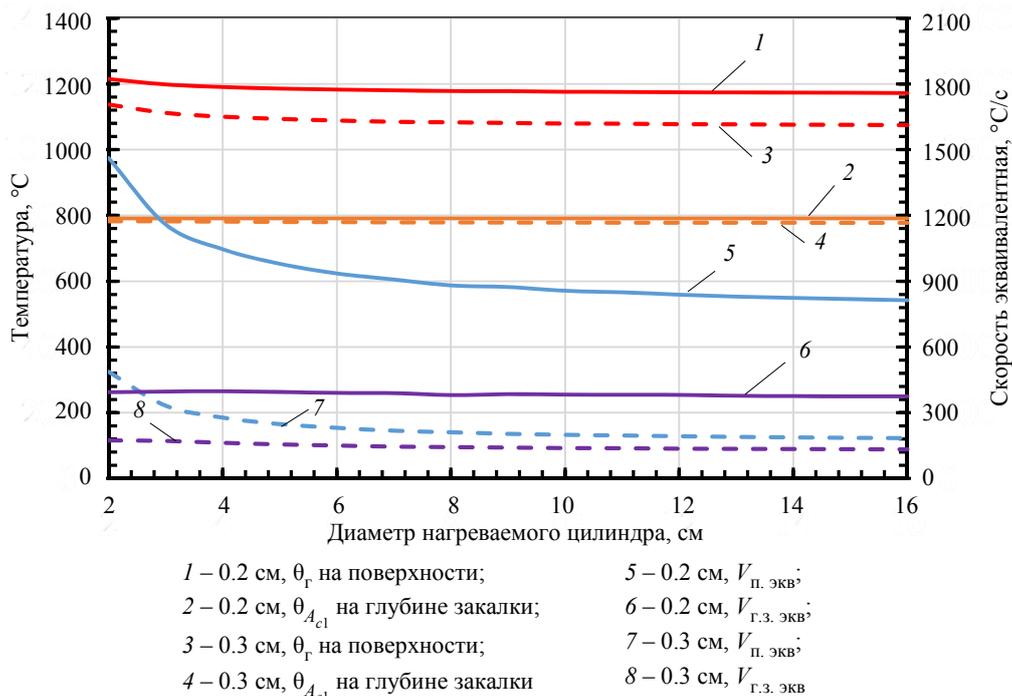


Рис. 6. Зависимости θ_r и $V_{п. экв}$ для поверхности, а также θ_{Ac1} и $V_{г.з. экв}$ для глубины закалки от диаметра нагреваемого цилиндра на частоте тока 10 000 Гц для глубины закалки 0.2 и 0.3 см при задержке охлаждения 0.1 с. Глубина закалки фиксируется уровнем θ_{Ac1}

Fig. 6. Dependencies θ_r and $V_{п. экв}$ for surface, and θ_{Ac1} and $V_{г.з. экв}$ for hardening depth on heated cylinder diameter at 10 000 Hz current frequency for 0.2 and 0.3 cm hardening depths with 0.1 s cooling delay. The hardening depth is fixed by the θ_{Ac1} level

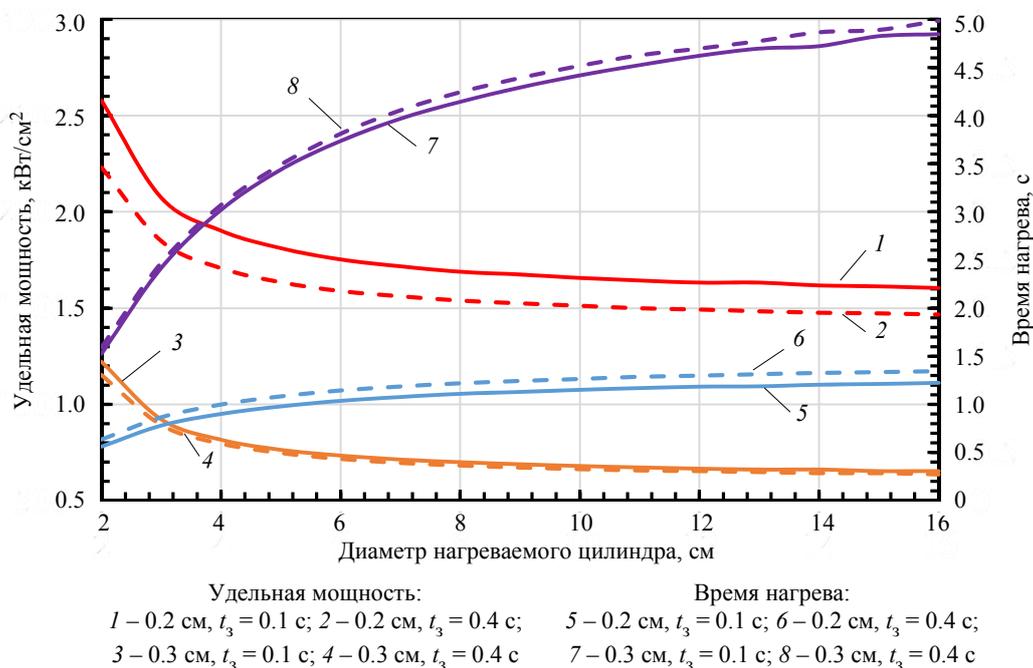


Рис. 7. Зависимости $P_{уд}$ и t_n от диаметра нагреваемого цилиндра на частоте тока 10 000 Гц для глубины закалки 0.2 и 0.3 см при задержке охлаждения 0.1 и 0.4 с. Глубина закалки фиксируется уровнем θ_{Ac3}

Fig. 7. Dependencies $P_{уд}$ and t_n on heated cylinder diameter at 10 000 Hz current frequency for 0.2 and 0.3 cm hardening depths with 0.1 and 0.4 s cooling delays. The hardening depth is fixed by the θ_{Ac3} level

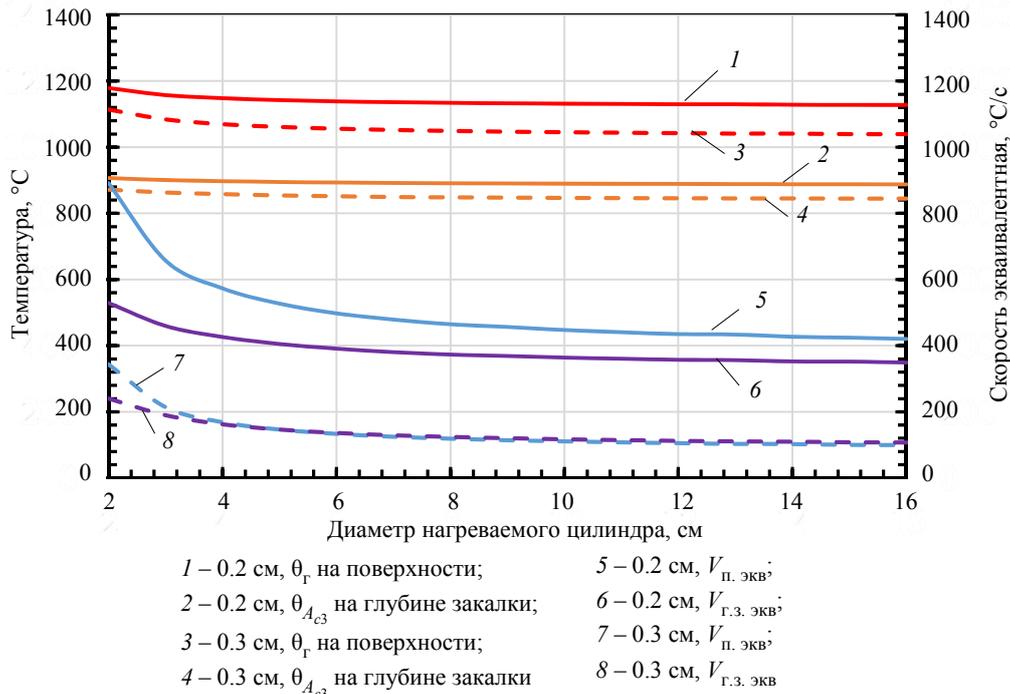


Рис. 8. Зависимости θ_{Γ} и $V_{п. экв}$ для поверхности, а также $\theta_{A_{c3}}$ и $V_{г.з. экв}$ для глубины закалки от диаметра нагреваемого цилиндра на частоте тока 10 000 Гц для глубины закалки 0.2 и 0.3 см при задержке охлаждения 0.1 с. Глубина закалки фиксируется уровнем $\theta_{A_{c3}}$

Fig. 8. Dependencies θ_{Γ} and $V_{п. экв}$ for surface, and $\theta_{A_{c3}}$ and $V_{г.з. экв}$ for hardening depth on heated cylinder diameter at 10 000 Hz current frequency for 0.2 and 0.3 cm hardening depths with 0.1 s cooling delay. The hardening depth is fixed by the $\theta_{A_{c3}}$ level

бины закалки, в то время как зависимости от диаметра детали при прочих равных условиях не наблюдается. Также отсутствует существенная зависимость температуры начала фазовых превращений $\theta_{A_{c1}}$ на глубине закалки как от диаметра детали, так и от глубины закаленного слоя.

На рис. 7 и 8 приведены результаты расчетов, аналогичные показанным на рис. 5 и 6, но в этих расчетах глубина закаленного слоя задавалась с помощью фиксации на заданной глубине температуры конца процесса аустенизации $\theta_{A_{c3}}$. Заданная таким образом глубина закаленного слоя соответствует x_a (см. рис. 3). Однако она будет меньше глубины полумартенситной твердости, так как в данном расчете не учитывается наличие в структуре «исходного» феррита.

Результаты расчетов на рис. 7 и 8 показывают схожие зависимости. В сравнении с рис. 5 из рис. 7 видно, что фиксация глубины закалки уровнем $\theta_{A_{c3}}$ вместо $\theta_{A_{c1}}$ значительно снижает требуемую удельную поверхностную мощность с пропорциональным увеличением времени нагрева при прочих равных условиях. В сравнении с рис. 6 из рис. 8 видно, что температура $\theta_{A_{c3}}$, за-

фиксированная как граница глубины закалки, имеет более выраженную зависимость от глубины закаленного слоя, нежели температура $\theta_{A_{c1}}$, зафиксированная как граница глубины закалки.

На рис. 9 и 10 показаны результаты численных расчетов с учетом слоя гомогенизации, когда глубина закаленного слоя задавалась с помощью фиксации на глубине x_k (см. рис. 3) температуры начала процесса аустенизации $\theta_{A_{c1}}$. Результаты получены для заданной глубины закалки 0.3 см. На рис. 9 приведены результаты численных расчетов удельной поверхностной мощности $P_{уд}$ и времени нагрева t_H при задержке охлаждения t_z , равной 0.1 и 0.4 с, и при слое гомогенизации x_{Γ} 0.1 и 0.05 см. На рис. 10 приведены результаты расчетов температуры гомогенизации θ_{Γ} и эквивалентной скорости нагрева $V_{\Gamma. экв}$ на глубине гомогенизированного слоя x_{Γ} , а также температуры начала аустенизации $\theta_{A_{c1}}$ и эквивалентной скорости нагрева $V_{г.з. экв}$ на глубине закалки 0.3 см, с учетом задержки охлаждения 0.1 с и при заданном слое гомогенизации x_{Γ} 0.1 и 0.05 см.

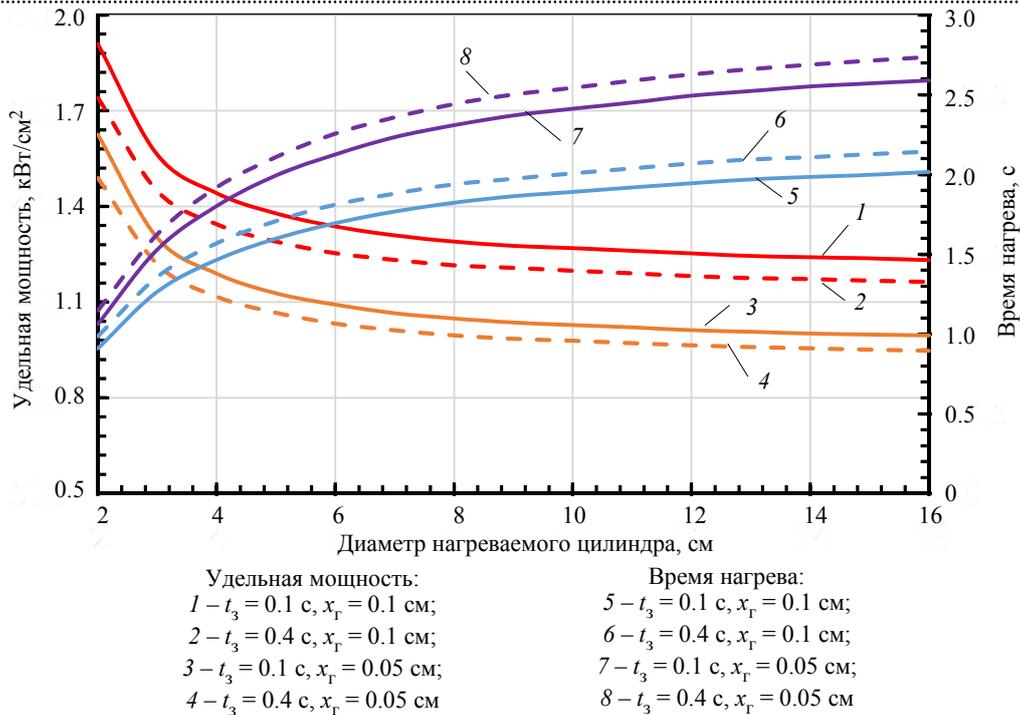


Рис. 9. Зависимости $P_{уд}$ и t_n от диаметра нагреваемого цилиндра на частоте тока 10 000 Гц для глубины закалки 0.3 см при задержке охлаждения 0.1 и 0.4 с и с учетом слоя гомогенизации 0.1 и 0.05 см. Глубина закалки фиксируется уровнем θ_{Ac1}

Fig. 9. Dependencies $P_{уд}$ and t_n on heated cylinder diameter at 10 000 Hz current frequency for 0.3 cm hardening depths with 0.1 and 0.4 s cooling delays and considering a 0.1 and 0.05 cm homogenization layer. The hardening depth is fixed by the θ_{Ac1} level

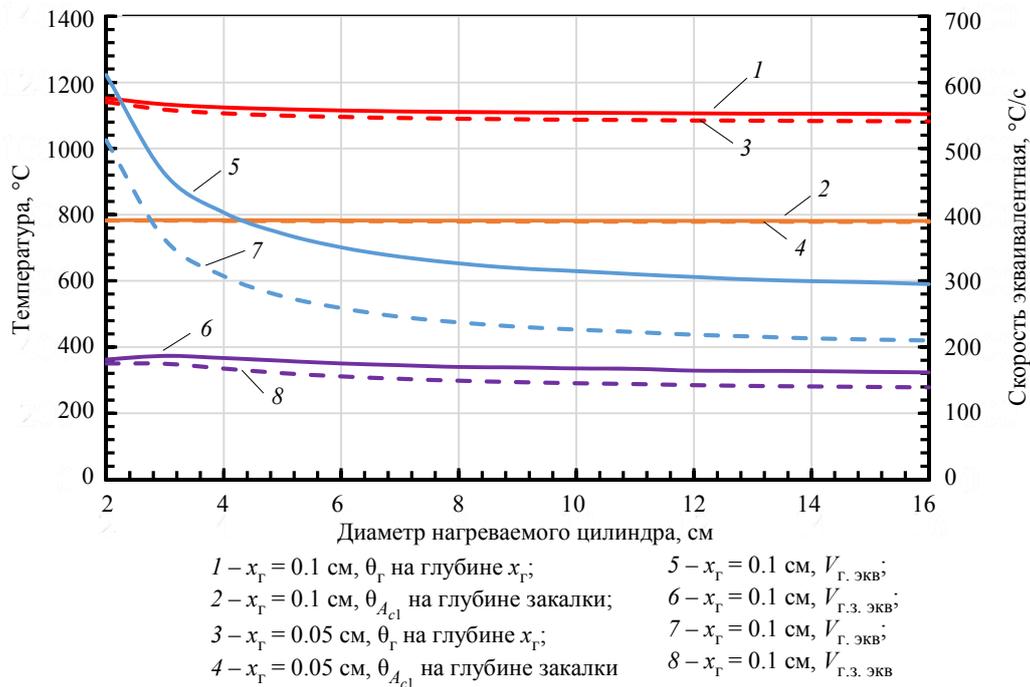


Рис. 10. Зависимости θ_r и $V_{Г.з. экв}$ для глубины гомогенизированного слоя, а также θ_{Ac1} и $V_{Г.з. экв}$ для глубины закалки от диаметра нагреваемого цилиндра на частоте тока 10 000 Гц для глубины закалки 0.3 см при задержке охлаждения 0.1 с и с учетом слоя гомогенизации 0.1 и 0.05 см. Глубина закалки фиксируется уровнем θ_{Ac1}

Fig. 10. Dependencies θ_r and $V_{Г.з. экв}$ for homogenized layer depth, and θ_{Ac1} and $V_{Г.з. экв}$ for hardening depth on heated cylinder diameter at 10 000 Hz current frequency for 0.3 cm hardening depths with 0.1 s cooling delay and considering a 0.1 and 0.05 cm homogenization layer. The hardening depth is fixed by the θ_{Ac1} level

Результаты расчетов на рис. 9 и 10 показывают влияние гомогенизированного слоя на требуемые поверхностные удельные мощности и время нагрева по сравнению с результатами расчетов на рис. 5 и 6 без слоя гомогенизации. Из рис. 9 видна прямая зависимость требуемой поверхностной удельной мощности от величины слоя гомогенизации, а также сохранившаяся обратная зависимость требуемой поверхностной удельной мощности от задержки перед охлаждением. При $x_r = 0.05$ см, перегрев поверхности относительно температуры гомогенизации составляет 6°C при любых диаметрах нагреваемого цилиндра, а при $x_r = 0.1$ см перегрев увеличивается, но не превышает 36°C .

Выводы и заключение. Разработанная численная модель позволяет находить оптимальные параметры термообработки (время нагрева и удельную поверхностную мощность) с учетом влияния скорости нагрева на процесс аустенизации в стали, также предоставляя дополнительную информацию о технологическом процессе. Приведенный алгоритм можно легко приспособить

для анализа индукционного нагрева других углеродистых сталей, для которых доступна термодинамическая диаграмма аустенизации. Дальнейшее повышение точности разработанной модели может быть достигнуто на основе валидации (по результатам металлографического анализа опытных образцов) и внесения для каждой используемой стали своих поправочных коэффициентов. Поэтому на данном этапе приведенные результаты следует оценивать как приближенные, что не мешает использовать полученную модель для качественного анализа технологических параметров при различной архитектуре закаленного слоя.

Предложенная модель может быть основой программного обеспечения, цель которого – с помощью решения обратных задач служить инструментом для проектирования архитектуры закаленного слоя. Методики и приемы, позволяющие эффективно использовать такие модели для анализа применения имеющегося в наличии закалочного оборудования или для оценки целесообразности приобретения нового оборудования предложены Н. В. Зиминым и Ф. В. Безменовым в [10].

Список литературы

1. Зимин Н. В. О влиянии температуры, скорости нагрева и исходного состояния структуры углеродистых сталей на процессы образования в них аустенита // *Металлообработка*. 2006. № 1 (31). С. 41–47.
2. Orlich J., Wiest A. R. P. Atlas zur Warmebehandlung der Stahle. Vol. 3. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M. B. H., 1973. 264 p.
3. Слухоцкий А. Е. Индукторы / под ред. А. Н. Шамова. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1989. 69 с.
4. 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.
5. 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.
6. Моделирование и оптимизация технологических параметров индукционной поверхностной закалки с учетом обобщений экспериментальных исследований / Ф. В. Чмиленко, А. А. Хоршев, Ю. В. Ша-

нин, А. С. Бондарь // *Изв. Академии электротехнических наук РФ*. 2021. № 3 (25). С. 54–62.

7. 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 // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2022. Т. 15, № 2. С. 67–78.

8. Зимин Н. В. Структура и свойства закаленного слоя при охлаждении интенсивным душем после поверхностного нагрева // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1978. № 1. С. 22–27.

9. Wever F., Rose A. et al Atlas zur Warmebehandlung der Stahle. Vol. 1. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M. B. H., 1961. 372 p.

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

11. Демидович В. Б., Чмиленко Ф. В. Численные методы в теории индукционного нагрева. СПб.: ООО «Технолит», 2008. 220 с.

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

Информация об авторах

Чмиленко Фёдор Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: tchfv@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6223-9250>

Растворова Ирина Ивановна – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой электронных систем, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: Rastvorova_I@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1196-7463>

Сафронов Алексей Анатольевич – д-р техн. наук, профессор, зав. отделением плазменных устройств и технологий, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, 191181, Россия.

E-mail: 9932553@mail.ru

Перевалов Юрий Юрьевич – канд. техн. наук, доцент электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: yuyperevalov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8703-7815>

Пармёнов Вячеслав Евгеньевич – аспирант, ассистент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: parmenov.slava@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0004-3149-4418>

Вклад авторов:

Чмиленко Ф. В. – научное руководство; введение понятия эквивалентной скорости; проведение вычислительных экспериментов; написание исходного текста; итоговые выводы.

Растворова И. И. – концепция исследования; постановка задачи; написание исходного текста; итоговые выводы.

Сафронов А. А. – доработка модели для переменных температур; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Перевалов Ю. Ю. – идея научного исследования; разработка алгоритма; итоговые выводы.

Парменов В. Е. – анализ результатов; иллюстрирование и инфографика; доработка исходного текста; перевод.

References

1. Zimin N. V. O vlijanii temperatury, skorosti nagreva i ishodnogo sostojanija struktury uglerodistykh stalej na processy obrazovanija v nih austenita // Metalloobrabotka. 2006. № 1 (31). S. 41–47. (In Russ.).

2. Orlich J., Wiest A. R. P. Atlas zur Warmebehandlung der Stahle. Vol. 3. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M. B. H., 1973. 264 p.

3. Sluhockij A. E. Induktory / pod red. A. N. Shamova. 5-e izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroenie, 1989. 69 s. (In Russ.).

4. Bezmenov F. V., Zimin N. V. Matematicheskie analogi jeksperimental'nyh zavisimostej processov austenizacii i gomogenizacii ot nekotoryh harakteristik stalej i tehnologicheskikh parametrov termoobrabotki // Metalloobrabotka. 2006. № 4 (34). S. 30–36. (In Russ.).

5. Bezmenov F. V., Zimin N. V. Matematicheskie analogi jeksperimental'nyh zavisimostej rezul'tatov termicheskoj obrabotki stalej ot ishodnogo sostojanija struktury, razmerov austenitnogo zerna i parametrov nagreva i ohlazhdenija // Metalloobrabotka. 2006. № 5–6 (35–36). S. 59–63. (In Russ.).

6. Modelirovanie i optimizacija tehnologicheskikh parametrov indukcionnoj poverhnostnoj zakalki s uchetom obobshhenij jeksperimental'nyh issledovanij / F. V. Chmi-lenko, A. A. Horshev, Ju. V. Shanin, A. S. Bondar' // Izv. Akademii jelektrotehnicheskikh nauk RF. 2021. № 3 (25). S. 54–62. (In Russ.).

7. Modelirovanie tehnologicheskikh parametrov indukcionnoj poverhnostnoj zakalki na osnove obobshhenij jeksperimental'nyh issledovanij / F. V. Chmi-

lenko, Ju. V. Shanin, A. A. Horshev, A. S. Bondar', Chzhan Ci, D. N. Bondarenko // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2022. T. 15, № 2. S. 67–78. (In Russ.).

8. Zimin N. V. Struktura i svoystva zakalennogo sloja pri ohlazhdenii intensivnym dushem posle poverhnostnogo nagreva // Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov. 1978. № 1. S. 22–27. (In Russ.).

9. Wever F., Rose A. et al Atlas zur Warmebehandlung der Stahle. Vol. 1. Dusseldorf: Verlag Stahleisen M. B. H., 1961. 372 p.

10. Bezmenov F. V., Zimin N. V. Kontrol' processa austenizacii pri indukcionnom nagreve pod poverhnostnuju zakalku cilindricheskih ob#ektov // Metalloobrabotka. 2010. № 6 (60). S. 18–27. (In Russ.).

11. Demidovich V. B., Chmilenko F. V Chislennye metody v teorii indukcionnogo nagreva. SPb.: OOO «TehnoLit», 2008. 220 s. (In Russ.).

12. Zimin N. V. Vlijanie intensivkacii ohlazhdenija posle razlichnyh vidov nagreva na prokalivaemost' i zakalivaemost' uglerodistyh nelegirovannyh stalej // Metalloobrabotka. 2006. № 2 (32). S. 36–42. (In Russ.).

Information about the authors

Fedor V. Chmilenko – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: tchfv@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6223-9250>

Irina I. Rastvorova – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department of Electronic Systems, Saint Petersburg Mining University Empress Catherine II, 21st Line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: Rastvorova_II@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1196-7463>

Alexey A. Safronov – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Plasma Devices and Technologies, Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences (IEE RAS), Dvortzovaya Emb., 18, St. Petersburg, 191181, Russia.

E-mail: 9932553@mail.ru

Yuriy Yu. Perevalov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: yyperevalov@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8703-7815>

Vyacheslav E. Parmenov – postgraduate student, Assistant of the Department of Electrical Technology and Converter Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: parmenov.slava@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0004-3149-4418>

Author contribution statement:

Chmilenko F. V. – scientific guidance; equivalent speed concept introduction; conducting computational experiments; writing the source text; final conclusions.

Rastvorova I. I. – research concept; problem statement; writing the source text; final conclusions.

Safronov A. A. – model for variable temperatures revision; methodology development; writing the source text; final conclusions.

Perevalov Yu. Yu. – scientific research idea; algorithm development; final conclusions.

Parmenov V. E. – analysis of the results; illustration and infographics; source text revision; translation.

Статья поступила в редакцию 10.12.2024; принята к публикации после рецензирования 16.12.2024; опубликована онлайн 28.02.2025.

Submitted 10.12.2024; accepted 16.12.2024; published online 28.02.2025.
