

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 669.1:66.04

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-65-71>

Оригинальное эмпирическое исследование

Объёмные изменения и структурные напряжения в стали после закалки в магнитном поле

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

yuridol@mail.ru

EDN: JGDGMF

Аннотация

Введение. Как известно, закалка стали сопровождается объёмными изменениями, вызванными разностью удельных объёмов превращающихся фаз. Возникающие объёмные изменения приводят к структурным напряжениям в стали. Присутствие напряжений в закаленном изделии сказывается отрицательно на сопротивлении хрупкому разрушению, что обуславливает, например, снижение безопасности при эксплуатации стальных конструкций. В связи с этим важным является совершенствование методов термической обработки (ТО) стали, которые позволяют снизить закалочные напряжения. Наложение постоянного магнитного поля в процессе фазового превращения оказывает влияние на кинетику перехода и образующиеся продукты превращения. Для этого перспективного метода ТО недостаточно данных об объёмных изменениях при закалке. Цель работы — исследование особенностей влияния постоянного магнитного поля на объёмные изменения и структурные напряжения при закалке стали.

Материалы и методы. Исследования проводились на техническом железе и углеродистых сталях 35, 45, У8, У10, У12. Магнитные поля напряженностью 1,4 и 1,6 МА/м создавались в межполюсном зазоре электромагнита ФЛ-1 конструкции МГУ. Количественная оценка объёмных изменений после обычной и магнитной закалки выполнялась путём измерения удельных объёмов методом гидростатического взвешивания.

Результаты исследования. Получены концентрационные зависимости изменения удельных объёмов углеродистых сталей при закалке в магнитном поле от температур 800 и 1 000 °С, на которых отмечалось отсутствие изменений объёмного эффекта мартенситного превращения в техническом железе и стали У10 при закалке от 800 °С, а также наличие разных по знаку изменений объёмного эффекта в сталях с содержанием углерода: от 0 до 1 % — уменьшение удельного объёма, от 1,0 до 1,2 % — увеличение удельного объёма. Расчётные данные показывают, что после закалки без поля уровень структурных напряжений возрастает с увеличением содержания углерода в аустените и повышением температуры нагрева под закалку. Влияние магнитного поля сводится к уменьшению структурных напряжений в низко- и среднеуглеродистых сталях и к их увеличению — в высокоуглеродистых. При низких температурах отпуска уровень структурных напряжений после закалки в магнитном поле для среднеуглеродистой стали 45 ниже, а для стали У12 — выше, чем после закалки без поля.

Обсуждение и заключение. Полученные данные для низко- и среднеуглеродистых сталей объясняются большей степенью распада мартенсита *in situ nascendi* при охлаждении в магнитном поле и увеличением количества мартенситной фазы в высокоуглеродистых сплавах железа. Изменение объёмного эффекта, вызванное приростом под действием магнитного поля количества мартенситной фазы, превалирует над изменением объёмного эффекта, обусловленного ее распадом в процессе закалочного охлаждения. Величина и знак наблюдаемых эффектов определяются содержанием углерода в исходном аустените, причем существует узкий диапазон концентраций, для которых магнитная закалка не оказывает практически никакого воздействия на уровень структурных напряжений. Действие магнитного поля во время отпуска несколько замедляет снижение остаточных напряжений в температурном интервале распада мартенсита. Структурные напряжения после термической

обработки в магнитном поле без учёта температурного градиента по сечению в основном определяются эффектами, полученными при закалке в магнитном поле. Усиление явлений распада мартенсита вызывает снижение, а увеличение полноты мартенситного превращения — повышение уровня структурных напряжений.

Ключевые слова: закалка, сталь, объёмные изменения, структурные напряжения, магнитное поле, отпуск

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания по содержанию статьи, сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ, профессора Ю.М. Домбровского и доцента С.А. Гришину, за помощь в получении и обсуждении результатов.

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Объёмные изменения и структурные напряжения в стали после закалки в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):65–71. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-65-71>

Original Empirical Research

Volumetric Changes and Structural Stresses after Quenching in a Magnetic Field

Viktor N. Pustovoit^{id}, Yuri V. Dolgachev^{id}✉

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ yuridol@mail.ru

Abstract

Introduction. As is well known, the process of steel hardening is accompanied by volumetric changes due to the difference in specific volumes of transforming phases. These volume changes result in structural stresses within the steel. The presence of these stresses in a hardened product negatively affects its resistance to brittle fracture, leading, for example, to decreased safety during operation of steel structures. In this regard, it is essential to improve heat treatment (HT) methods that reduce quenching stresses. One promising method involves applying a permanent magnetic field during phase transformation, which affects the kinetics of transition and resulting transformation products. However, there is a lack of data on volumetric changes during quenching for this method. The aim of this work is to investigate the effects of permanent magnetic fields on volumetric changes and structural stresses during steel hardening.

Materials and Methods. The research was conducted on technical iron and carbon steel 35, 45, U8, U10, U12. Magnetic fields with strengths of 1.4 and 1.6 MA/m were generated in an interpolar gap of the FL-1 electromagnet, designed by Moscow State University. Volumetric changes after conventional and magnetic quenching were quantitatively assessed by measuring the specific volumes using hydrostatic weighing method.

Results. Concentration dependencies of changes in specific volumes of carbon steels during quenching in a magnetic field at temperatures of 800 and 1 000°C were obtained. There were no changes in the volume effect of martensitic transformation in iron and U10 steel when quenching at temperatures higher than 800°C. Different changes in the volume effect were observed in steels with carbon content: from 0 to 1% — reduction in specific volume; from 1.0% to 1.2% — increase in specific volume. Calculation data showed that after quenching without a field, the level of structural stresses increased with an increase in the carbon content in austenite and an increase in the heating temperature for quenching. The influence of the magnetic field was reduced to a decrease in structural stresses in low- and medium-carbon steels and their increase in high-carbon steels. At low tempering temperatures, the level of structural stresses after quenching in a magnetic field was lower for medium-carbon 45 steel, and higher for U12 steel, than after quenching without a field.

Discussion and Conclusion. The data obtained for low- and medium-carbon steels can be explained by the increased degree of martensite decomposition “in statu nascendi” upon cooling in a magnetic field and an increase in the amount of martensite phase in high-carbon iron alloys. The change in the volume effect caused by the increase in the amount of martensite phase under the influence of a magnetic field prevailed over the change in the volume effect caused by its decomposition during the quenching cooling process. The magnitude and sign of the observed effects were determined by the carbon content in the original austenite, and there was a narrow range of concentrations for which magnetic hardening had virtually no effect on the level of structural stresses. The effect of a magnetic field during tempering somewhat slowed down the reduction of residual stresses in the temperature range of martensite decomposition. Structural stresses after heat treatment in a magnetic field, without taking into account the temperature gradient across the cross-section, were mainly determined by the effects obtained during quenching in a magnetic field. The intensification of the phenomena of martensite decomposition caused a decrease, and an increase in the completeness of the martensite transformation, an increase in the level of structural stresses.

Keywords: hardening, steel, volumetric changes, structural stresses, magnetic field, tempering

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board of the journal for their valuable comments, the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals at DSTU, Professor Yu.M. Dombrovsky and Associate Professor S.A. Grishin, for their help in obtaining and discussing the results.

For citation. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. Volumetric Changes and Structural Stresses after Quenching in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):65–71. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-65-71>

Введение. Известно, что закалка стали сопровождается объёмными изменениями [1], вызванными разностью удельных объёмов превращающихся фаз. Возникающие объёмные изменения [2] приводят к структурным напряжениям в стали [3]. Присутствие напряжений в закаленном изделии [4] сказывается отрицательно на сопротивлении хрупкому разрушению, что, например, обуславливает снижение безопасности при эксплуатации стальных конструкций [5].

Наложение постоянного магнитного поля в процессе фазового превращения оказывает влияние на кинетику перехода и образующиеся продукты превращения. В работах [6, 7] приведены результаты исследований изменений в тонкой структуре и фазовом составе сталей при закалке в магнитном поле. При этом показано, что при воздействии магнитного поля происходит мультипликативное зарождение кристаллов мартенсита и увеличивается темп превращения, а также повышается температура M_n до M_d с образованием мартенсита напряжения в интервале сверхпластичности превращения [8, 9]. Это приводит к увеличению объёмной доли α -мартенсита вследствие ранней активизации отпускного этапа свежесформованной α -фазы, снижению объёмной доли $A_{ост.}$ в инструментальных сталях, значительному утонению в мультиплетном профиле рентгеновского рефлекса {211}. Совокупность указанных обстоятельств приводит к изменениям в фазовом составе сталей, а также в структуре и свойствах продуктов превращения после закалки в магнитном поле.

Актуальной является разработка методов термической обработки (ТО), позволяющих снизить закалочные напряжения. Приведённые выше данные о перспективной технологии ТО с участием внешнего магнитного поля указывают на то, что структурные изменения, происходящие под действием магнитного поля в процессе закалочного превращения, могут сказываться на объёмном и напряжённом состоянии стали. Однако детального исследования влияния магнитного поля на изменения в напряжённом состоянии закаленных сталей ранее не проводилось. В связи с вышесказанным целью настоящей работы является исследование объёмных изменений и структурных напряжений, возникающих от действия постоянным магнитным полем при закалке стали.

Материалы и методы. Исследования проводились на техническом железе и углеродистых сталях 35, 45, У8, У10, У12. Магнитные поля напряженностью $H = 1,4$ и $1,6$ МА/м создавались в межполюсном зазоре электромагнита ФЛ-1 конструкции МГУ.

Объёмные изменения после обычной закалки и с наложением магнитного поля оценивались количественно путём измерения удельного объёма гидростатическим взвешиванием. На первом этапе образцы взвешивались в воздушной среде (P_B). Далее образцы, подвешенные на тонкую капроновую нить $8\phi \div 18_{\text{мм}}$, взвешивались в дистиллированной воде (P_J). Величина удельного объёма с учётом плотности дистиллированной воды δ_J и воздуха δ_B определялась следующим выражением:

$$v_0 = \frac{P_B - P_J}{P_B(\delta_J - \delta_B)} + \frac{1}{\delta_B}. \quad (1)$$

Результаты исследования. График, представленный на рис. 1, демонстрирует влияние магнитного поля на объёмные изменения при мартенситном превращении в углеродистых сталях, при этом за нулевую отметку принято значение удельного объёма, имеющее место при обычной закалке. Можно отметить, что знак изменения удельного объёма и его величина находятся в корреляции с температурой нагрева под закалку и содержанием углерода в стали.

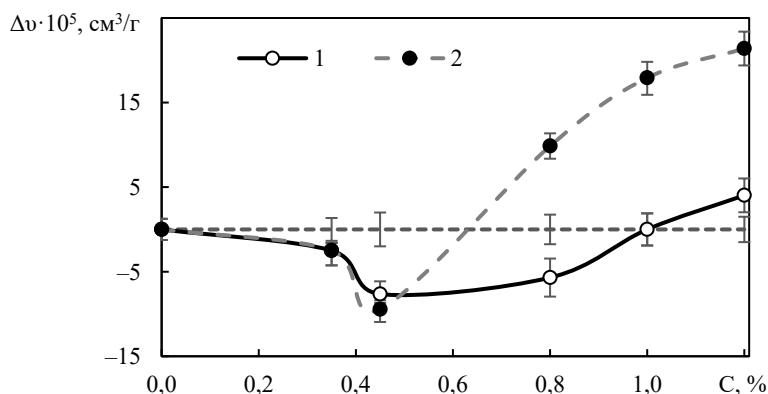


Рис. 1. Относительные изменения в удельных объёмах сталей при закалке во внешнем магнитном поле $H = 1,6$ МА/м: 1 — от 800 °C; 2 — от 1000 °C

На рис. 1, отображающем зависимость изменения удельного объёма от содержания углерода, можно отметить следующие отличительные особенности: нулевой объёмный эффект превращения в чистом железе и стали У10 при закалке от 800 °С, отличия по знаку в изменении объёмных эффектов в сталях с содержанием углерода 0 ÷ 1,0 и 1,0 ÷ 1,2 % С. При закалке с наложением магнитного поля в сталях с 0 ÷ 1,0 % С наблюдается уменьшение, а в сталях с 1,0 ÷ 1,2 % С — увеличение удельного объёма. Максимальная величина изменений в удельном объёме наблюдается при содержании 0,5 и 1,2 % углерода. С увеличением температуры закалки наблюдаются изменения в величинах эффектов от действия поля, а также смещение точки, имевшей нулевое объёмное изменение, к более низкоуглеродистым сталям.

Возникновению структурных напряжений в сплаве способствуют объёмные изменения в процессе фазовой трансформации, а также их неоднородность распределения по микрообъёмам [10, 11]. Структурные напряжения могут быть вычислены по методике расчёта, представленной в работе [12], которая позволяет определить напряжения тангенциального, осевого и радиального направления в сплошном цилиндре, если принять, что в анализируемом сечении отсутствует температурный градиент. Действие магнитного поля при закалке на структурные напряжения можно оценить с помощью выражения для вычисления тангенциальной составляющей напряжений на поверхности:

$$\sigma_{\tau} = -\frac{E \cdot l}{2(1-\mu)}, \quad (2)$$

где l — относительное значение структурной деформации на этапе превращения; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона.

При оценке l были использованы объёмные характеристики фаз и данные измерения удельных объёмов образцов такого малого размера, что можно пренебречь перепадом температуры между сердцевиной и поверхностью. Данные таблицы 1 показывают, что для случая обычной закалки структурные напряжения растут с концентрацией углерода в исходной фазе и с температурой закалки.

Таблица 1

Структурные напряжения (σ_{τ}) при различных режимах закалки

Сталь	σ_{τ} , МПа, при температуре закалки, °С*		Сталь	σ_{τ} , МПа, при температуре закалки, °С*	
	800	1 000		800	1 000
45	$\frac{-600,9}{-549,6}$	$\frac{-621,2}{-564,5}$	У10	$\frac{-795,4}{-795,4}$	$\frac{-923,2}{-1028,7}$
У8	$\frac{-774,9}{-766,6}$	$\frac{-903,8}{-939,4}$	У12	$\frac{-798,6}{-819,7}$	$\frac{-888,3}{-1007,0}$

*Числитель — закалка без магнитного поля; знаменатель — в поле $H = 1,6$ МА/м.

Результаты расчёта структурных напряжений, вызванных превращениями при часовом отпуске закаленных от 1 000 °С углеродистых сталей, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Структурные напряжения после закалки и отпуска

Сталь	Напряженность магнитного поля*, МА/м	σ_{τ} , МПа, при температуре отпуска, °С (с учётом предела текучести аустенита)					
		20	100	150	200	250	300
45	0/0	-421,1	-254,1	-205,3	-163,7	-140,8	-122,2
	0/1,4	-421,2	-273,0	-215,4	-162,9	-140,7	-122,2
	1,6/0	-364,5	-226,1	-196,7	-164,8	-141,1	-122,1
	1,6/1,4	-364,5	-234,4	-200,4	-165,4	-141,7	-122,1
У12	0/0	-688,3	-527,8	-490,7	-536,4	-527,0	-484,2
	0/1,4	-688,3	-584,6	-536,5	-573,7	-531,4	-484,2
	1,6/0	-807,0	-691,7	-634,6	-627,8	-530,7	-484,1
	1,6/1,4	-807,0	-741,6	-670,1	-671,3	-532,7	-484,1

*Числитель — при закалке, знаменатель — при отпуске.

Обсуждение и заключение. Наблюдаемые на рис. 1 эффекты для сталей с низким и средним содержанием углерода обусловлены протеканием отпускных процессов непосредственно при закалочном охлаждении в магнитном поле, а для сталей с высоким содержанием углерода — увеличением объёмной доли α -фазы. Анализ результатов теоретических расчётов [1] показывает, что для стали 45 после закалки в магнитном поле изменение $\Delta v = -9 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$ вызвано снижением содержания на $0,04 \div 0,05 \text{ \% C}$ в мартенсите. Наблюдающееся для стали с содержанием углерода $1,2 \text{ \%}$ изменение $\Delta v = 22 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$ обусловлено увеличением объёмной доли α -фазы на $4\text{--}5 \text{ \%}$, если принять, что содержание углерода в мартенсите при закалке в магнитном поле не изменяется по сравнению с обычной закалкой.

Сравнение данных графика на рис. 1 и результатов исследования тонкой структуры мартенсита обычной и магнитной закалки [6, 7] позволяет прийти к выводу, что изменение объёмного эффекта, вызванное приростом под действием магнитного поля количества мартенситной фазы превалирует над изменением объёмного эффекта, обусловленного ее распадом в процессе закалочного охлаждения.

Эффект от действия поля проявляется в понижении структурных напряжений в сталях с низким и средним содержанием углерода и их повышении в сталях с высокой концентрацией углерода (данные таблицы 1). Например, после закалки в магнитном поле сталей с $0,45 \text{ \%}$ и $1,2 \text{ \% C}$ с температуры $1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ уровень структурных напряжений в первом случае падает на $10 \text{ \%}$, а во втором случае возрастает на $13 \text{ \%}$. Сравнивая полученные результаты с данными рентгеноструктурных исследований [6, 7], можно отметить, что знак и величина эффектов обусловлены концентрацией углерода в исходной γ -фазе. Характерно, что есть концентрации, для которых закалка в магнитном поле незначительно изменяет значения структурных напряжений. Объяснить указанные эффекты от действия магнитным полем для сталей с низким и средним содержанием углерода можно усилением отпускных процессов непосредственно при образовании мартенсита в процессе закалки, а для сталей с высоким содержанием углерода — увеличением объёмной доли мартенсита.

Формирование остаточных напряжений в процессе закалки стали [13, 14] начинается, как известно, при $T_{\text{упр}}$ — температуре перехода материала из пластичного состояния в упругое. Поэтому структурные напряжения, возникающие при закалке [15, 16], складываются из напряжений, обусловленных изменением удельного объёма сплава при охлаждении от температуры $T_{\text{упр}}$ до M_n . Расчёт последних по формуле (2) показывает, что при охлаждении сплава до температуры M_n на поверхности сплошного цилиндра возникают растягивающие напряжения, превосходящие для всех исследуемых сплавов предел текучести аустенита (200 МПа). В связи с этим после закалки напряжения на поверхности сплошного цилиндра будут меньше приведенных в таблице 1 на величину предела текучести аустенита.

По данным таблицы 2 видно, что при низких температурах отпуска уровень структурных напряжений после закалки в магнитном поле для среднеуглеродистой стали 45 ниже, а для стали У12 — выше, чем после закалки без поля. Действие магнитного поля во время отпуска несколько замедляет снижение остаточных напряжений в температурном интервале распада мартенсита.

Таким образом, величина структурных напряжений после термической обработки в магнитном поле при отсутствии температурного градиента по сечению в значительной мере определяется эффектами, полученными при закалке в магнитном поле. Усиление явлений распада мартенсита вызывает снижение, а увеличение полноты мартенситного превращения — повышение уровня структурных напряжений.

Список литературы / References

1. Юрьев С.Ф. *Удельные объёмы фаз в мартенситном превращении аустенита*. Москва: Металлургиздат; 1950. 48 с.
2. Yurev SF. *Specific Volumes of Phases in the Martensitic Transformation of Austenite*. Moscow: Metallurgizdat; 1950. 48 p. (In Russ.)
3. Габелая Д.И., Кабаков З.К., Машченко М.А. Расчет изменения удельных объемов сплавов системы Fe — C в зависимости от содержания углерода и температуры. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2019;62(8):627–631. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-8-627-631>
4. Gabelaya DI, Kabakov ZK, Mashchenko MA. Calculation of Changes in Specific Volumes of Fe – C System Alloys Depending on Carbon Content and Temperatures. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(8):627–631. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-8-627-631>
5. Villa M, Niessen F, Somers MAJ. In Situ Investigation of the Evolution of Lattice Strain and Stresses in Austenite and Martensite During Quenching and Tempering of Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018;49:28–40. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4387-0>
6. He BB, Liu L, Huang MX. Room-Temperature Quenching and Partitioning Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018;49:3167–3172. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4718-9>

5. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023;7(3):44–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54>
- Vernezi NL. Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(3):44–54. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54>
6. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Структурное состояние мартенсита и остаточного аустенита в углеродистых сталях после закалки в магнитном поле. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;(12(810)):10–14. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.12.10-14>
- Pustovoyt VN, Dolgachev YuV. Structural State of Martensite and Retained Austenite in Carbon Steels after Quenching in Magnetic Field. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2022;(12(810)):10–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.12.10-14> (In Russ.)
7. Pustovoyt VN, Dolgachev YuV, Egorov MS, Mozgovoy AV. Quantitative Structural-Phase Analysis of Changes in Steel after Quenching in Magnetic Field. *Metallurgist*. 2023;66(9–10):1241–1247. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01437-z>
8. Долгачев Ю.В., Пустовойт В.Н. Зарождение мартенсита напряжения в состоянии предмартенситной неустойчивости решетки. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):58–65. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65>
- Dolgachev YV, Pustovoyt VN, Vernigorov YM. Stress Martensite Nucleation in a State of Premartensitic Lattice Instability. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):58–65. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65>
9. Padmanabhan KA, Balasivanandha Prabu S, Mulyukov RR, Nazarov Ayrat, Imayev RM, Ghosh Chowdhury S. Environmental Superplasticity. In: *Superplasticity. Engineering Materials*. Berlin: Springer; 2018. P. 219–233. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31957-0_6
10. Krauss G. *Steels: processing, structure, and performance*. ASM International. 2015. 704 p
11. XiaoLei Wu, Ping Jiang, Liu Chen, Fuping Yuan, Yuntian T Zhu. Extraordinary Strain Hardening by Gradient Structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences. U.S.A.* 2014;111(20):7197–201. <https://doi.org/10.1073/pnas.1324069111>
12. Беленов Ф.С. Кинетика закалки и определение временных закалочных напряжений. *Журнал теоретической физики*. 1952;22(1):111–120.
- Belenov FS. Kinetics of Quenching and Determination of Temporary Quenching Stresses. *Zhurnal teoreticheskoi fiziki*. 1952;22(1):111–120. (In Russ.)
13. Самойлович Ю.А. Временные и остаточные напряжения в прокатных валках при электрозакалке. *Сталь*. 2015;(1):51–56.
- Samoilovich YuA. Temporary and Residual Stresses in Rolling Rolls during Electric Tempering. *Stal'*. 2015;(1):51–56. (In Russ.)
14. Allain SYP, Gaudez S, Geandier G, Hell JC, Goune M, Danoix F, et al. Internal Stresses and Carbon Enrichment in Austenite of Quenching and Partitioning Steels from High Energy X-ray Diffraction Experiments. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;710:245–250. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.105>
15. Dossett JL, Totten GE. Heat Treating of Irons and Steels. Vol. 4D. ASM International; 2014. 588 p. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04d.9781627081689>
16. Навин Р.И., Динеш Бабу П., Маримусу П., Фалке С.С. Распределение остаточных сжимающих напряжений в стальных зубчатых колесах после индукционной закалки: влияние параметров на искажения, твердость и фазовый состав. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2021;(8(794)):48–55.
- Navin RI, Dinesh Babu P, Marimuthu P, Phalke SS. Distribution of Residual Compressive Stresses in Induction Hardened Steel Gears: Effect of Parameters on Distortion, Hardness and Phase Composition. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2021;(8(794)):48–55. (In Russ.)

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячеславович Долгачев, доктор технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), uridol@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: разработка концепции, научное руководство, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, написание черновика рукописи.

Ю.В. Долгачев: проведение исследования, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, рецензирование и редактирование рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor N. Pustovoyt, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), pustovoyt45@gmail.com

Yuri V. Dolgachev, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (344003, Russian Federation, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), [SPIN-code](#), [ORCID](#), yuridol@mail.ru

Claimed Contributorship:

VN Pustovoyt: concept development, academic advising, methodology development, administrative management of the research project, provision of resources, writing a draft of the manuscript.

YuV Dolgachev: research, formal analysis, validation of results, visualization, review and editing of the manuscript.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 30.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 25.12.2024

Принята к публикации / Accepted 09.01.2025