

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669-1

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.013

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА МОДЕЛЬНОГО ЦЕМЕНТИРОВАННОГО СЛОЯ ПО ГЛУБИНЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ 10880****Константин Дмитриевич Суринский<sup>1†</sup>, Сергей Александрович Нефедов<sup>2</sup>,  
Екатерина Александровна Носова<sup>3</sup>, Александр Владимирович Покоев<sup>4</sup>**<sup>1,2,3,4</sup> Самарский университет, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия<sup>1</sup> surinskykd@gmail.com<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1763-0247><sup>2</sup> nef2705@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5686-5239><sup>3</sup> eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

**Аннотация.** Многочисленные эксперименты по цементации проводятся, как правило, в рамках конкретной технологической задачи. В работе была поставлена задача проведения модельного эксперимента в рамках создания универсальной физической модели цементированного слоя. Проведена цементация электротехнической стали 10880 с исходным содержанием углерода не более 0,022 масс. % в твердом карбюризаторе при 930 °С с последующей закалкой в воду и медленным охлаждением. Был получен слой цементации глубиной до 800 мкм по данным оптической металлографии поперечного шлифа. Количественный рентгенофазовый анализ проводился с использованием двух различных характеристических излучений (Ag и Co), чтобы избежать наложения дифракционных линий в многофазном образце. Использован хорошо апробированный метод гомологических пар с присущими поставленной задаче ограничениями. В рамках методики сравнивались интегральные интенсивности линий (111) аустенита и (110) феррита. Анализ поперечного шлифа и рентгенофазовый анализ при последовательном удалении слоев 50-150 мкм закаленного материала показали, что фазовый состав характеризуется преобладанием доли мартенсита в приповерхностном слое, убыванием доли аустенита с ростом глубины. Абсолютный максимум доли аустенита наблюдается на глубине 100 мкм, локальный максимум на глубине 240 мкм. Объемная доля феррита с ростом глубины повышается. Кроме того, на образцах с медленным охлаждением значительна доля цементита, который в закаленных образцах не наблюдается. Доля цементита характеризуется абсолютным максимумом на глубине около 120 мкм.

**Ключевые слова:** цементация, сталь 10880, твердый карбюризатор, послойный рентгенофазовый анализ, мартенсит, аустенит, цементит.

**Для цитирования:** Суринский К.Д., Нефедов С.А., Носова Е.А., [Покоев А.В.] Исследование фазового состава модельного цементированного слоя по глубине образцов из электротехнической стали 10880 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 2. С. 262–268. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.013.

Original article

**STUDY OF THE PHASE COMPOSITION OF A MODEL CEMENTED LAYER OVER THE DEPTH OF SAMPLES FROM ELECTRICAL STEEL 10880****Konstantin D. Surinsky<sup>1†</sup>, Sergey A. Nefedov<sup>2</sup>, Ekaterina A. Nosova<sup>3</sup>, Alexander V. Pokoev<sup>4</sup>**<sup>1,2,3,4</sup> Samara University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russia<sup>1</sup> surinskykd@gmail.com<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1763-0247><sup>2</sup> nef2705@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5686-5239><sup>3</sup> eanosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5490-3235>

**Abstract.** Numerous carburization experiments are carried out within specific technological problem. In this paper the task was set as a model experiment within creation of universal physical carburized shift model. 10880 steel

with initial carbon part not more than 0.002 wt. % was carburized using solid carburizer at 930 °C with quenching into water and with slow cooling. Carburized shift up to 800 µm is stated by transversal section optic metallography. Quantitative X-ray phase analysis was carried out using two different monochromatic radiations (Co and Ag) in order to avoid diffraction lines superposition in multiphase sample. Well tested homologous pair method with specific limitations was applied for quantitative X-ray phase analysis. Within technique mentioned (111) austenite and (110) ferrite lines full intensities were compared. Transversal section optical and X-ray phase analyses after step removing of 50-150 µm of quenched material surface layers show that phase composition is as follows: martensite prevalence in surface shift, general decreasing of austenite share with depth. Austenite part absolute maximum is observed at about 100 µm and local maximum at 240 µm depth. Ferrite volume share increases while depth goes up. Moreover, in slow cooled samples cementite volume share is significant, while in quenched samples it wasn't observed at all. Cementite volume share describes absolute maximum at the depth about 120 µm.

**Keywords:** carburization, 10880 steel, solid carburizer, shift by shift X-ray phase analysis, martensite, austenite, cementite.

**For citation:** Surinsky, K. D., Nefedov, S. A., Nosova, E. A. & Pokoev, A. V. (2023). Study of the phase composition of a model cemented layer over the depth of samples from electrical steel 10880. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(2), 262–268. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.013.

## Введение

Цементация сталей с последующей термообработкой – распространенная процедура для получения высокой твердости на поверхности изделий в сочетании с вязкой сердцевиной.

Важнейшими параметрами, определяющими свойства полученного цементированного слоя, являются глубина цементации, распределение углерода, фазовый состав цементированного слоя, параметры кристаллической решетки металлической матрицы. Известно, что фазовый состав цементированного слоя является результатом протекания следующих процессов: диффузия углерода в железе при высокой температуре; растворение углерода в железе с образованием твердого раствора внедрения; полиморфные (ОЦК–ГЦК–ОЦТ) превращения металлической матрицы при нагреве и охлаждении [1].

В ряде работ последнего времени так или иначе затрагивались вопросы фазового состава цементированных слоев в сталях. Так, влияние остаточного аустенита и карбидов на прочностные свойства хромоникелевых сталей мартенситного класса исследовалось в [5], точки полиморфного превращения и относительная доля аустенита в стали 19ХГНМА – в [6], фазовый состав специальной стали ВКС10–У–Ш детально рассматривался в [7] – по результатам комплексного фазового анализа: рентгеновского исследования изолятов в рамках физико-химического фазового анализа (ФХФА) и дифракции обратно рассеянных электронов в РЭМ. Авторы [4] провели исследование слоя

цементации с последовательным удалением слоев толщиной 25 мкм по глубине на низкоуглеродистых сталях 20 и 20Х. Однако, приведенные в [4] выводы не могут считаться полученными в рамках методики количественного фазового анализа из-за наличия в образцах текстуры прокатки. Цементация в твердом карбюризаторе быстрорежущей стали, согласно [10], обеспечивает формирование слоя повышенной твердости 2,1-2,3 мм. Глубина упрочненного слоя хромоникелевой стали после жидкостной цементации [13] составляет 2 мм по прямому измерению на поперечных шлифах. В [14] предложена технология двухстадийной газовой цементации, дающей немонотонный концентрационный профиль в приповерхностном слое материала. Причем авторы проводят расчет профиля на основе эмпирического выражения для коэффициента диффузии из [15].

Эти и многие другие работы проводятся, как правило, в рамках решения конкретной прикладной технологической задачи на сталях с подобранными под задачу параметрами. Поэтому остается актуальной задача создания универсальной модели цементированного слоя, построенной на модельном эксперименте. Применяемые в настоящее время методы оценки параметров цементированного слоя это, в основном, разрушающие микроскопические исследования металлографических шлифов. Однако такие методы неприменимы при единичном производстве или трудоёмки при контроле цементированного слоя в ответственных деталях. Поэтому представляется перспективным и актуальным разработка неразрушающих мето-

дов анализа параметров цементированного слоя. Необходимое условие разработки такого метода – наличие экспериментальных данных по структуре и фазовому составу цементированных слоев модельных сплавов, на основе которых возможно разработать теоретическую основу рентгеновского (или иного неразрушающего) метода диагностики.

Целью данной работы можно назвать создание цементированного слоя на модельном сплаве и анализ его структуры по глубине такого слоя методами оптической металлографии и рентгеновского фазового анализа.

## Методика и материалы

В качестве модельного материала для создания цементированного слоя была выбрана электротехническая сталь 10880 с содержанием углерода не выше 0,035 вес. % (по ГОСТ 11036-75 [2]). Исходное состояние – горячекатаный пруток диаметром 40 мм. Предварительно проведенный оптико-эмиссионный анализ стали показал химический состав, представленный в таблице 1.

**Таблица 1.** Химический состав исходных образцов

**Table 1.** Chemical composition of initial samples

Содержание элементов, масс. %									
	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
0,022	0,22	0,22	0,008	0,017	0,13	0,021	0,126	0,025	0,11

Металлографический анализ микроструктуры, проведенный до цементации, выявил равноосные зерна феррита характерного размера ~ 10 мкм с выделениями третичного цементита. Цементация проводилась в твердом карбюризаторе, с использованием печи СШОЛ шахтного типа при температуре  $930 \pm 3$  °С. Образцы помещались в печь в специально изготовленных контейнерах из нержавеющей стали цилиндрической формы диаметром 80 мм и высотой 20 мм. В качестве источника углерода использовался березовый активированный уголь, активатора –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с массовой долей 10 %. Выдержка в печи составляла 120 минут без учета выхода на рабочую температуру цементации за 40 минут. После этого контейнеры с образцами охлаждались двумя способами: закалка в воду и охлаждение с печью до четырех часов. Поперечные шлифы исследовались в металлографическом микроскопе Olympus GX51 после травления состава: 3 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Рентгеновские исследования проводились на дифрактометре ДРОН-2 с использованием нефилтрованного кобальтового (Co) и серебряного (Ag) излучений.

Для проведения количественного РФА привлекались методики [7-9]. Обе основаны на хорошо апробированной методике гомологических пар. Методика ASTM [9] содержит в расчетных формулах сложно определяемые экспериментальные параметры. Достоинство методики [7] в том, что константы и большинство

параметров представлены эмпирическими коэффициентами, что значительно упрощает вычисления. Однако, обе методики адекватно работают в условиях двухфазной смеси (феррит + аустенит), но фазовый состав слоя цементации значительно сложнее. В частности, это проявляется в сложности разрешения налегающих друг на друга рентгеновских линий.

## Результаты и обсуждение

Анализ поперечных шлифов показал глубину цементированного слоя около 800 мкм (рис.1). В приповерхностном слое образцов после закалки (рис.1) наблюдаются зерна мартенсита характерной игольчатой формы, глубже – равноосные зерна остаточного аустенита средним размером 100-150 мкм, далее по глубине слоя наблюдается структура распада аустенита с выделением перлита на границах зерен. Преобладание мартенсита на поверхности обусловлено максимальной скоростью охлаждения при закалке в приповерхностной зоне. Для образцов, охлажденных с печью структура цементированного слоя вблизи поверхности – перлит с выделениями цементита, далее наблюдается перлит, а затем и ферритно-перлитная смесь.

По данным предварительного рентгеновского анализа параметр решетки исходного феррита составил  $a = 2,867$  Å, что хорошо согласуется с данными [3] для содержания углерода в твердом растворе на уровне порядка 0,01 вес. %.

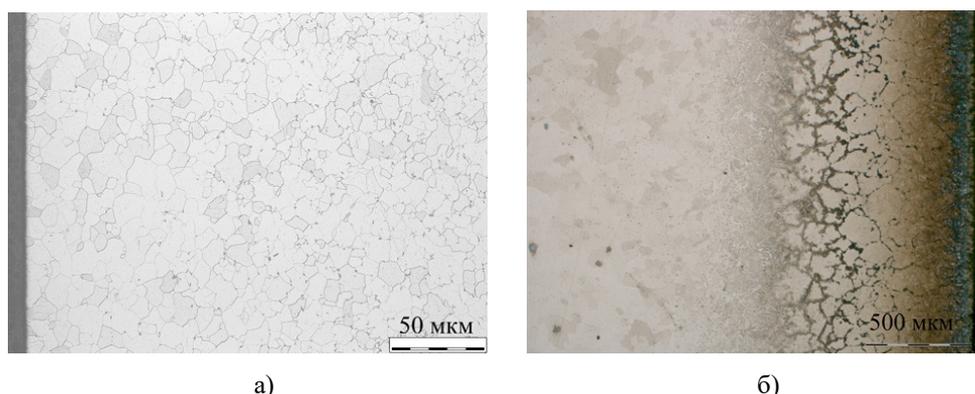


Рис.1. Микроструктура образца до (а) и после цементации (б)

Fig.1. Sample microstructure before (a) and after cementation (b)

В рамках описываемого эксперимента оценивалось распределение структур по глубине цементированного слоя образцов с режимом охлаждения «закалка в воду»: цементита, остаточного аустенита и феррита методом гомологических пар [7-9]. Для оценки относительной доли цементита определялось отношение интенсивностей линий (121)  $Fe_3C$  и (110)  $\alpha$ -Fe (ОЦК). Доля остаточного аустенита оценивалась по соотношению интенсивностей линий (200)  $\gamma$ -Fe (ГЦК) и (200)  $\alpha$ -Fe (ОЦК).

Соотношение объемных долей аустенита и феррита, несмотря на присутствие карбидных фаз [11] считается вычисленным корректно. При этом авторы [11] воспользовались предложенной в [12] формулой (1).

$$V_{\alpha} = 1/[1 + 1,45(I_{111\gamma}/I_{110\alpha})], \quad (1)$$

где  $V_{\alpha}$  – объемная доля феррита,  $I_{111\gamma}$  и  $I_{110\alpha}$  – интегральные интенсивности линий аустенита и феррита соответственно. Следует заметить, что в [7] предложена аналогичная формула, однако с эмпирическим коэффициентом 1,30 против 1,45 в (1). Это может говорить о надежности использованного для анализа фазовых соотношений метода расчета. Однако, поскольку задачу пришлось решать в условиях снятия слоев материала, то есть на глубинах, где аустенит в значительной степени распадается, и присутствуют интенсивные линии цементита, формула для двухфазной смеси (1) не совсем корректна в нашем случае.

В настоящей работе пришлось решать сложную компромиссную задачу: коротковолновое Ag-излучение лучше выявляло линии карбидных фаз, но создавало условия для наложения линий, относящихся к модификациям

железа. Для этого пришлось дополнительно использовать более длинноволновое Со-излучение. Поэтому выводы, приведенные ниже, сделаны на основании методики, которую можно назвать «полуколичественной», поскольку соотношения фаз получены из соотношений интенсивности основных рентгеновских линий. Съемка дифрактограмм проводилась на обоих излучениях после механического удаления слоев толщиной 50÷150 мкм.

Результаты рентгенофазового анализа представлены на рисунках 2 и 3. Структура цементированных слоев многофазна, количественное соотношение фаз существенно зависит от глубины залегания, а распределение концентрации углерода неоднородно по фазам.

Наиболее ярко выражено различие дифрактограмм образцов со слоем цементации 800 мкм при различной скорости охлаждения (рис.3). Так, на образце после закалки (дифрактограмма I) видна интенсивная линия (111)  $\gamma$ -Fe (ГЦК), а линия (110)  $\alpha$ -Fe (ОЦК) уширена и имеет асимметричный профиль (размытие в область малых углов), что указывает на наличие мартенсита (тетрагонально-искаженного ОЦК Fe). В то время как на образце с медленным охлаждением (дифрактограмма II) отчетливо видна линия (121)  $Fe_3C$ .

Результаты послойного рентгенофазового анализа представлены в виде соотношения и суммы интенсивностей наиболее сильных линий фаз, присутствующих в образце (рис.3). Соотношение интенсивностей линий дает представление об относительном содержании в образце цементита (Ц), феррита (Ф) и остаточного аустенита ( $A_{ост}$ ), а также о распределении этих фаз по глубине.

На приведенных кривых рис.3 видны характерные участки: ~40 мкм – зона относитель-

но малых содержаний цементита и аустенита, обусловленная, по-видимому, наличием слоя мартенсита, в котором растворена большая часть углерода. Данное предположение подтверждается результатами оптической металлографии. В зоне максимальной скорости охлаждения слоя при закалке (у поверхности образца) отчетливо виден слой игольчатых кристаллов мартенсита (рис.1). Далее обе ( $\text{Ц}/\Phi$  и  $A_{\text{ост}}/\Phi$ ) кривые возрастают, однако имеют некоторое смещение по горизонтали друг относительно друга, что объясняется различным механизмом распада аустенита по глубине слоя в зависимости от скорости охлаждения.

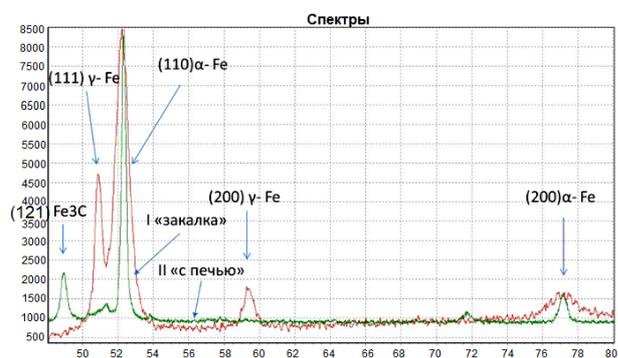


Рис.2. Сравнение рентгенограмм образцов с закалкой и медленным охлаждением, излучение  $\text{CoK}\alpha$

Fig.2. Comparison of X-ray patterns of specimens with quenching and slow cooling,  $\text{CoK}\alpha$  radiation

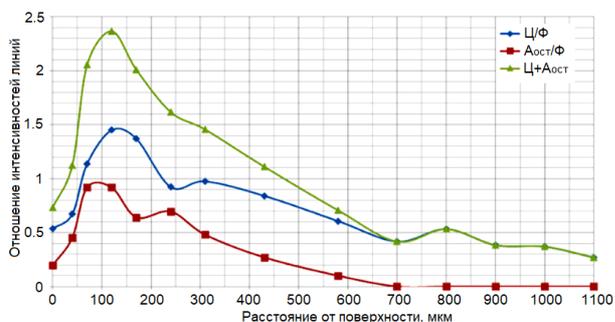


Рис.3. Результаты послойного РФА закаленного с глубиной цементации 800 мкм

Fig.3. The results of layer-by-layer XRF hardened with a depth of cementation of 800  $\mu\text{m}$

В точке с глубиной  $\sim 240$  мкм наблюдается локальный минимум на кривой распределения цементита ( $\text{Ц}/\Phi$ ) с одновременным максимумом на кривой аустенита ( $A_{\text{ост}}/\Phi$ ), что говорит о менее полном распаде последнего в данном слое. Этот вывод дополнительно подтверждается отсутствием перегиба в данной точке на суммарной кривой ( $\text{Ц}+A_{\text{ост}}$ ). Сравнение резуль-

татов анализа, проведенного на различных излучениях, показывает сходный характер распределения остаточного аустенита по глубине слоя.

## Выводы

1. Методом цементации стали 11880 в твердом карбюризаторе при температуре  $930^\circ\text{C}$  продолжительностью 120 мин. с последующей закалкой в воду и охлаждением с печью были получены модельные образцы с глубиной слоя цементации 800 мкм.

2. Анализ дифрактограмм образцов, прошедших различные способы охлаждения с цементационного нагрева, показал, что ускоренное охлаждение цементационного ящика с образцом в воде приводит к появлению интенсивной линии (111)  $\gamma\text{-Fe}$  (ГЦК), при этом линия (110)  $\alpha\text{-Fe}$  (ОЦК) уширена и имеет асимметричный профиль, что указывает на наличие мартенсита. В образце с медленным охлаждением отчетлива видна линия (121)  $\text{Fe}_3\text{C}$ , которая отсутствует на дифрактограмме образца, прошедшего ускоренное охлаждение.

3. Сравнительный рентгенофазовый анализ методом гомологических пар в излучениях  $\text{CoK}\alpha$  и  $\text{AgK}\alpha$  показал достижение максимальных значений доли аустенита на глубине около 100 мкм с последующим снижением до нуля на глубине около 700 мкм. Максимальное содержание цементита наблюдается на глубине около 120 мкм, затем его доля снижается. На глубине 240 мкм наблюдаются локальный максимум доли аустенита и локальный минимум доли цементита.

## Список литературы

1. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
2. ГОСТ 11036–75 Сталь сортовая электро-техническая нелегированная, Технические условия Межгосударственный стандарт.
3. Волков В.В., Покоев А.В. Математическое моделирование формы рентгеновской линии образца при диффузии из постоянного источника в полуограниченное поликристаллическое тело // В сб. материалов IX Международного семинара «Физико-математическое моделирование систем», 30 ноября – 1 декабря 2012 г., Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», Часть 1, 2012. С. 29–36.

4. Лукин А.А., Тарханов А.К., Лукин О.А. Исследование структуры и фазового состава поверхностного слоя при цементации // Научный Вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2013. № 7. С. 128–133.

5. Громов В.И., Кротов В.Н., Курпякова В.А., Седов О.В. и др. Влияние остаточного аустенита на структуру и свойства диффузионного слоя стали мартенситного класса после вакуумной цементации // Авиационные материалы и технологии. 2016. Т. 45, № 4. С. 3–8.

6. Петрова О.Н., Беликов С.В., Слукин Ю.В. Влияние термической обработки на структуру и свойства цементованного слоя лап буровых трехшарошечных долот // В сб. трудов VII всероссийской научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Челябинск, 2021. С. 156–160.

7. Бекренев А.Н., Константинов М.П. Рентгеновское определение количества остаточного аустенита в сталях // Заводская лаборатория. 1984. Т. 50, № 5. С. 42.

8. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 134 с.

9. Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation. An ASTM Standard, Designation E975-13, 2013.

10. Рыжавина Л.В., Чуднова О.В. Цементация в твердом карбюризаторе // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 176–177.

11. Саврай Р.А., Скорынина П.А., Макаров А.В., Осинцева А.Л. Особенности структуры и свойства поверхности метастабильной аустенитной стали, подвергнутой жидкостной цементации при пониженной температуре // ФММ. 2020. Т. 121, № 1. С. 72–78.

12. Коршунов Л.Г., Сагарадзе В.В., Черненко Н.Л., Шабашов В.А. Структурные превращения карбидной фазы в стали Гадфильда, инициированные фрикционным воздействием // ФММ. 2015. Т. 116, № 8. С. 867–873.

13. Семенов С.В., Баулин А.П., Семенова Л.М., Климов А.И. Термоциклическая цементация высоконагруженных зубчатых колес ответственного назначения // Известия ВолгГТУ. 2005. № 3. С. 40–44.

14. Венедиктов А.Н., Корешкова Е.В., Кулемина А.А. Моделирование диффузионного

насыщения аустенита углеродом с учетом температуры в процессе цементации // Инженерный вестник Дона. 2019. Т. 57, № 6. С. 17.

15. Гилукьянов Е.Л., Кисленков В.В., Провоторов С.П. Вычисление профиля концентрации углерода при цементации сталей в контролируемой атмосфере природного газа // МИТОМ. 1981. № 8. С. 9–11.

### Информация об авторах

К. Д. Суринский – аспирант кафедры «Технология металлов и авиационное материаловедение» Самарского национального исследовательского университета.

С. А. Нефедов – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика твердого тела и неравновесных систем» Самарского национального исследовательского университета.

Е. А. Носова – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология металлов и авиационное материаловедение» Самарского национального исследовательского университета.

А. В. Покоев – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика твердого тела и неравновесных систем» Самарского национального исследовательского университета.

### References

1. Gulyayev, A. P. (1986). Metallovedeniye. M.: Metallurgiya. P. 544. (In Russ.).

2. GOST 11036–75 Stal' sortovaya elektrotekhnicheskaya nelegirovannaya, Tekhnicheskiye usloviya Mezhsudarstvennyy standart. (In Russ.).

3. Volkov, V. V. & Pokoyev, A. V. (2012). Matematicheskoye modelirovaniye formy rentgenovskoy linii obraztsa pri diffuzii iz postoyannogo istochnika v poluogranichennoye polikristallicheskoye telo. V sb. materialov IX Mezhdunarodno-go seminara «Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye sistem», 30 noyabrya – 1 dekabrya 2012, Voronezh: FGBOU VPO «Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet», Chast' 1, 29–36. (In Russ.).

4. Lukin, A. A., Tarkhanov, A. K. & Lukin, O. A. (2013). Issledovaniye struktury i fazovogo sostava poverkhnostnogo sloya pri tsementatsii. Nauchnyy Vestnik Voronezhskogo gosudarstven-

nogo arkhitekturnostroitel'nogo universiteta. *Seriya: Fiziko-khimicheskiye problemy i vysokiye tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya*, 7, 128–133. (In Russ.).

5. Gromov, V. I., Krotov, V. N., Kurpyakova, V. A. & Sedov, O. V. et al. (2016). Vliyaniye ostatochnogo austenita na strukturu i svoystva diffuzionnogo sloya stali martensitnogo klassa posle vakuumnoy tsementatsii. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, 4(45), 3–8. (In Russ.).

6. Petrova, O. N., Belikov, S. V. & Slukin, Yu. V. (2021). Vliyaniye termicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva tsementovannogo sloya lap burovnykh trekhsharoshechnykh dolot. *V sb. trudov VII vserossiyskoy nauchnotekhnicheskoy konferentsii «Prom-Inzhiniring», Chelyabinsk*, 156–160. (In Russ.).

7. Bekrenev, A. N. & Konstantinov, M. P. (1984). Rentgenovskoye opredeleniye kolichestva ostatochnogo austenita v stalyakh. *Zavodskaya laboratoriya*, 5(50), 42. (In Russ.).

8. Mirkin, L. I. (1979). Rentgenostrukturnyy kontrol' mashinostroitel'nykh materialov. M.: Mashinostroyeniye. P. 134. (In Russ.).

9. (2013). Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation. An ASTM Standard, Designation E975-13.

10. Ryzhavina, L. V. & Chudnova, O. V. (2012). Tsementatsiya v tverdom karbyurizatore. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 6, 176. (In Russ.).

11. Savray, R. A., Skorynina, P. A., Makarov, A. V. & Osintseva, A. L. (2020). Osobennosti struktury i svoystva poverkhnosti metastabil'noy austenitnoy stali, podvergnutoy zhidkostnoy tsementatsii pri ponizhennoy temperature. *FMM*, 1(121), 72. (In Russ.).

12. Korshunov, L. G., Sagaradze, V. V., Chernenko, N. L. & Shabashov, V. A. (2015).

Strukturnyye prevrashcheniya karbidnoy fazy v stali Gadfil'da, initsirovannyye friktsionnym vozdeystviyem. *FMM*, 8(116), 867. (In Russ.).

13. Semenov, S. V., Baulin, A. P., Semenova, L. M. & Klimov, A. I. (2005). Termotsiklicheskaya tsementatsiya vysokonagruzhennykh zubchatykh koles otvetstvennogo naznacheniya. *Izvestiya VolgGTU*, 3, 40. (In Russ.).

14. Venediktov, A. N., Koreshkova, E. V. & Kulemina, A. A. (2019). Modelirovaniye diffuzionnogo nasyshcheniya austenita uglerodom s uchetom temperatury v protsesse tsementatsii. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 6(57), 17. (In Russ.).

15. Giluk'yanov, E. L., Kislakov, V. V. & Provotorov, S. P. (1981). Vychisleniye profilya kontsentratsii ugleroda pri tsementatsii staley v kontroliruyemoy atmosfere prirodnogo gaza. *MITOM*, 8, 9. (In Russ.).

#### Information about the authors

*K. D. Surinsky – Postgraduate of the Department of Metal Technology and Aviation Material Science, Samara National Research University.*

*S. A. Nefedov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of the Department of Solid State Physics and Non-equilibrium Systems, Samara National Research University.*

*E. A. Nosova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Material Science, Samara National Research University.*

*A. V. Pokoev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Solid State Physics and Non-equilibrium Systems, Samara National Research University.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; одобрена после рецензирования 15.04.2023; принята к публикации 29.05.2023.

The article was received by the editorial board on 30 Mar. 23; approved after reviewing 15 Apr. 23; accepted for publication 29 May 23.