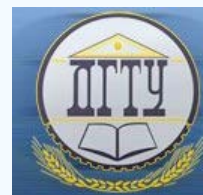


МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.78.015:620.1

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294>

Контактная разность потенциалов легированной стали после термической обработки



Л. П. Арефьева, А. Г. Сукиязов, Ю. В. Долгачев, Л. С. Шахова

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена актуальному вопросу разработки и применения неразрушающего метода контроля качества поверхностей стальных изделий (метод зонда Кельвина). Цель работы — установление величины контактной разности потенциалов (КРП) стали марки ХВГ после проведения термической обработки.

Материалы и методы. Объектом исследования явилась легированная инструментальная сталь марки ХВГ. Химический состав образцов уточнялся методом оптико-эмиссионного анализа. Для проведения статистической обработки в трех сериях исследовали по три образца. Были выбраны разные режимы термической обработки каждой серии: закалка с низким отпусканием, улучшение и нормализация. Торцы образцов шлифовались, затем один из них обрабатывался раствором азотной кислоты. Далее проводилось измерение контактной разности потенциалов, статистическая обработка данных.

Результаты исследования. Полученные данные показывают, что величина КРП образцов стали марки ХВГ после проведения термической обработки изменяется. С увеличением температуры отпуска величина контактной разности потенциалов шлифованной поверхности и твердость снижаются практически линейно. Воздействие кислоты приводит к значительному уменьшению и выравниванию величины контактной разности потенциалов для всех структур. Проведено сравнение контактной разности потенциалов сталей ХВГ и У10. Легирование стали элементами со значениями работы выхода электрона выше, чем у железа, вызывает снижение контактной разности потенциалов между эталоном и образцом. Характер изменения КРП при изменении состава стали сильно зависит от наличия легирующих элементов. Зависимость КРП от дисперсности структуры видна в обоих случаях, однако, для стали ХВГ она более ярко выражена.

Проведены расчеты работы выхода электрона структур мартенсита, троостита и сорбита, полученные в результате термообработки сталей ХВГ и У10.

Обсуждение и заключения. Экспериментально установлена зависимость величины контактной разности потенциалов от структуры, химического и фазового состава, рассчитана работа выхода электрона сталей марок ХВГ и У10. Данный метод более чувствителен к образцам легированной стали, чем к углеродистой. Следует заключить, что измерение контактной разности потенциалов можно использовать как неразрушающий экспресс-метод диагностики для контроля поверхностей, подвергающихся воздействию активных сред или повышенных температур.

Ключевые слова: контактная разность потенциалов, работа выхода электрона, легированная сталь, термическая обработка, метод зонда Кельвина, неразрушающий контроль.

Для цитирования: Контактная разность потенциалов легированной стали после термической обработки / Л. П. Арефьева, А. Г. Сукиязов, Ю. В. Долгачев, Л. С. Шахова // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 289–294. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294>

© Арефьева Л. П., Сукиязов А. Г., Долгачев Ю. В., Шахова Л. С., 2020



Contact potential difference of alloy steel after heat treatment

L. P. Aref'eva, A. G. Sukiyazov, Yu. V. Dolgachev, L. S. Shakhova

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

Introduction. The paper considers an actual issue of the development and application of a non-destructive method for controlling the quality of surfaces of steel products (Kelvin probe method). The work objective is to establish the magnitude of the contact potential difference (CPD) of steel 107WCR5 after heat treatment.

Materials and Methods. The object of study is alloy tool steel 107WCR5. The chemical composition of the samples was refined through the optical emission analysis method. To carry out the statistical processing, there were three samples in three series. We chose different heat treatment modes for each series, i.e., quenching with low tempering, strengthening and normalization. The end surfaces of the samples were polished and then one of them was treated with a solution of nitric acid. Further, the measurement of the contact potential difference and statistical data processing were carried out.

Results. The data obtained show that the CPD value of steel 107WCR5 samples changes after heat treatment. With an increase in tempering temperature, the contact potential difference of the polished surface and the hardness, decrease almost linearly. Exposure to acid causes a significant decrease and equalization of the contact potential difference for all structures. The contact potential difference of steels 107WCR5 and CT105 is compared. Alloying steel by the elements with the work function values of the electron higher than that of iron causes a decrease in the CPD between the standard and the sample. The CPD behavior under a change in the composition of the steel depends strongly on the presence of alloying elements. The dependence of CPD on the dispersion of the structure is seen in both cases; however, it is more pronounced for 107WCR5 steel. The electron work function of the martensite, troostite, and sorbitol structures obtained as a result of heat treatment of steels 107WCR5 and CT105 is calculated.

Discussion and Conclusions. The dependence of the contact potential difference on the structure, chemical and phase composition was experimentally established; the electron work function of steels 107WCR5 and CT105 was calculated. This technique is more sensitive to alloy steel samples than to carbon steel. It seems possible to conclude that the measurement of the contact potential difference can be used to control surfaces exposed to active media or elevated temperatures as a non-destructive express diagnostic method.

Keywords: contact potential difference, electron work function, alloy steel, heat treatment, Kelvin probe method, nondestructive testing.

For citation: L. P. Aref'eva, A. G. Sukiyazov, Yu. V. Dolgachev, et al. Contact potential difference of alloyed steel after heat treatment. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 289–294. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294>

Введение. В обзорной работе [1] подробно описано изменение понятия работы выхода электрона (РВЭ) и понимания ее природы, начиная с открытия в 1895 году Г. Герцем явления фотоэффекта и заканчивая рассмотрением теоретических методов расчета РВЭ. Вначале РВЭ определяли как работу, необходимую для удаления электрона из металла. За последние сто лет это фундаментальное свойство поверхности было измерено практически для всех химических элементов и многих проводящих сплавов. Первоначально РВЭ измеряли как энергию ионизации, хотя это является нестрогим определением, так как энергия ионизации зависит от присутствующих на поверхности примесей, для монокристалла РВЭ зависит от ориентации граней. На сегодняшний день разработаны надежные методы определения РВЭ поли- и монокристаллов [2]. Одним из таких методов является метод зонда Кельвина, который позволяет измерять контактную разность потенциалов поверхностей эталона и исследуемого образца на макроуровне и проводить картирование контактной разности потенциалов (КРП) на микро- и наноуровне [3]. В настоящее время метод зонда Кельвина широко применяется для неразрушающего контроля состояния и качества поверхности [3–7]. Например, в работе [7] предложен метод определения поверхностной энергии сплавов по величине КРП и твердости, получены значения РВЭ сталей марок 30ХГСА, Р18, ШХ15.

Контактная разность потенциалов — это разность между работами выхода электрона двух металлических поверхностей. Работа выхода электрона определяется как разность между электростатическими потенциалами внутри металла ϕ_i и вне металла в определенной точке ϕ_0 и энергией Ферми металла E_F :

$$\varphi = (\phi_i - \phi_0) - E_F = \Delta\phi - E_F = 4\pi P_s - E_F, \quad (1)$$

где P_s — дипольный момент двойного слоя, приходящийся на единицу площади поверхности. Дипольный момент двойного слоя зависит от химического состава поверхностных слоев, микрошероховатости поверхности, адсорбированных атомов, наличия и плотности дефектов, кристаллографической ориентации поверхности. Энергия Ферми чувствительна к состоянию объема металла, в том числе к его химическому составу.

Контактная разность потенциалов зависит от состояния объема и поверхности металла, и, следовательно, является структурно чувствительной величиной. Структуру и фазовый состав стали можно изменить с помощью термической обработки.

Целью настоящей работы являлось установление величины контактной разности потенциалов стали марки ХВГ после проведения термической обработки.

Материалы и методы. Объектом исследования была выбрана легированная инструментальная сталь марки ХВГ. Методом оптико-эмиссионного анализа был уточнен химический состав исследуемых образцов, который имеет следующие средние значения: 1% С, 1,1 %Cr, 1,4%W, 0,95% Mn, 0,25%Si, 0,35%Ni, 0,3%Mo, 0,3%Cu и менее 0,03% серы и фосфора.

Для достоверности экспериментальных данных и проведения статистической обработки количество образцов в сериях составляло по 3 единицы. Для установления влияния режимов термической обработки на КРП были выбраны три различных режима: закалка с низким отпуском, улучшение, нормализация. Температура закалки первой и второй серий образцов — 820°C. В качестве охлаждающей среды использовалось минеральное масло, что обеспечивало скорость охлаждения выше критической в соответствии с диаграммой распада аустенита стали марки ХВГ. Далее для первой группы образцов проводился низкий отпуск при температуре 180°C и дальнейшее охлаждение на воздухе. Для второй группы образцов — отпуск при температурах 600°C и 400°C. Для третьей группы — нормализация путем нагрева до 820°C и охлаждения на воздухе. Противоположные торцы образцов соответствовали разной технологии подготовки — сторона А после термообработки подвергалась шлифовке, сторона Б, дополнительно к шлифованию, протравливалась 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

В целях контроля получаемых структур после термической обработки проводились измерения твердости образцов методом Роквелла.

Измерение КРП проводили методом зонда Кельвина на лабораторном стенде, разработанном в научно-образовательном центре «Материалы» ДГТУ (рис. 1)¹. Электрод сравнения, принимаемый за эталон, был изготовлен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, не подвергался никаким внешним воздействиям (облучению, влиянию сильных электрических и магнитных полей, нагреву и охлаждению, взаимодействию с химическими реактивами и т.д.) и использовался во всех измерениях. Образец фиксировался на металлическом столе с помощью струбцины (рис. 1). Поверхность располагалась строго параллельно эталонному электроду. Между струбциной, образцом и металлическим столом обеспечивался электрический контакт.

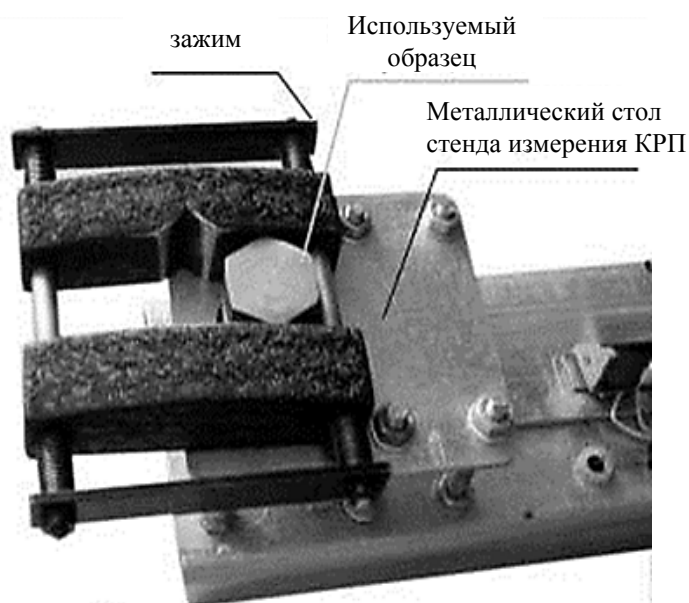


Рис. 1. Образец стали ХВГ, расположенный на металлическом столе измерительного стенда

Результаты исследования. Результаты измерений КРП имеют хорошую воспроизводимость. Статистическая обработка проводилась по методу Стьюдента. Полученные данные показывают, что величина КРП образцов стали марки ХВГ после проведения термической обработки изменяется (рис. 2). В результате нормализации получена структура сорбита (с межпластинчатым расстоянием ~0,4–0,2 мкм) с твердостью 22 HRC, которая имела минимальные значения КРП и твердости. Наибольшие значения твердости и КРП наблюдаются у структуры мартенсита отпуска с карбидами, полученного в результате закалки и низкого отпуска при 180°C [8–10]. С увеличением температуры отпуска величина КРП шлифованной поверхности, как и твердость, снижается почти линейно (рис. 2). После обработки поверхности стали ХВГ 4% раствором азотной кислоты по реакции ионного обмена образуется пленка, состоящая из нитратов железа, хрома и вольфрама.

¹ Стенд для измерения работы выхода электрона с поверхности металлических тел: пат. 177 659 Рос. Федерация МПК H01L 21/00 (2006/01) / А. Г. Суякизов, В. Б. Зеленцов, С. М. Айзикович, Б. И. Митрин. № 2017139300; заявл. 13.11.2017; опубл. 05.03.2018 Бюл. №7. 9с.

Воздействие кислоты приводит к значительному уменьшению средней величины КРП для всех полученных структур, то есть значения КРП становятся примерно одинаковыми (рис. 2).

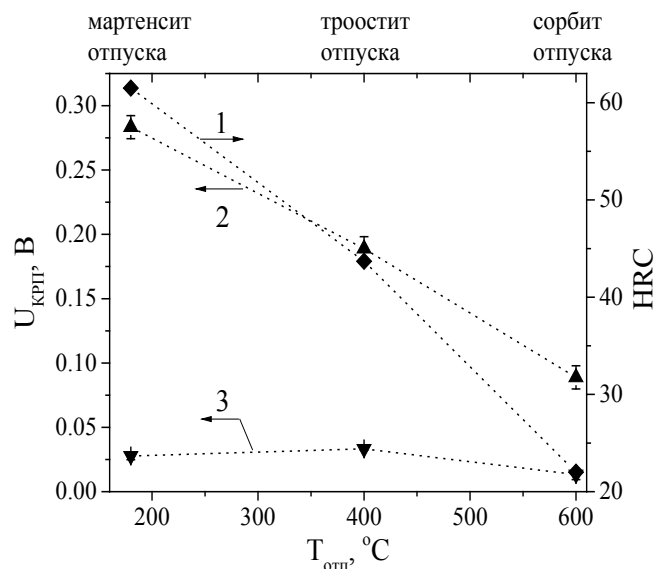


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на контактную разность потенциалов стали марки ХВГ: 1 — твердость; 2 — КРП шлифованной поверхности; 3 — КРП поверхности после травления

Как известно, легирующие элементы изменяют не только критические температуры фазовых превращений, но и большинство свойств стали [11–13]. Например, возрастает твердость материала. В связи с этим целесообразно проанализировать влияние легирования на контактную разность потенциалов стали, то есть на величину работы выхода электрона. Данные КРП стали марки ХВГ сравнивались с результатами измерения КРП углеродистой инструментальной стали У10 с таким же содержанием углерода и аналогичным структурным состоянием. Легирование стали элементами, имеющими значения работы выхода электрона выше, чем у железа, приводит к понижению КРП между эталоном и образцом (рис. 3). Исключение составляет структура мартенсита отпуска, у которого происходит (на 0,06 В) повышение величины КРП, по сравнению с величиной КРП мартенсита отпуска стали У10. Также у разных структур легированной стали наблюдаются более резкие отличия значений КРП, чем в случае углеродистой стали. Характер изменения КРП при изменении состава стали сильно зависит от наличия легирующих элементов. Зависимость КРП от дисперсности структуры видна в обоих случаях, однако, для стали ХВГ она более ярко выражена.

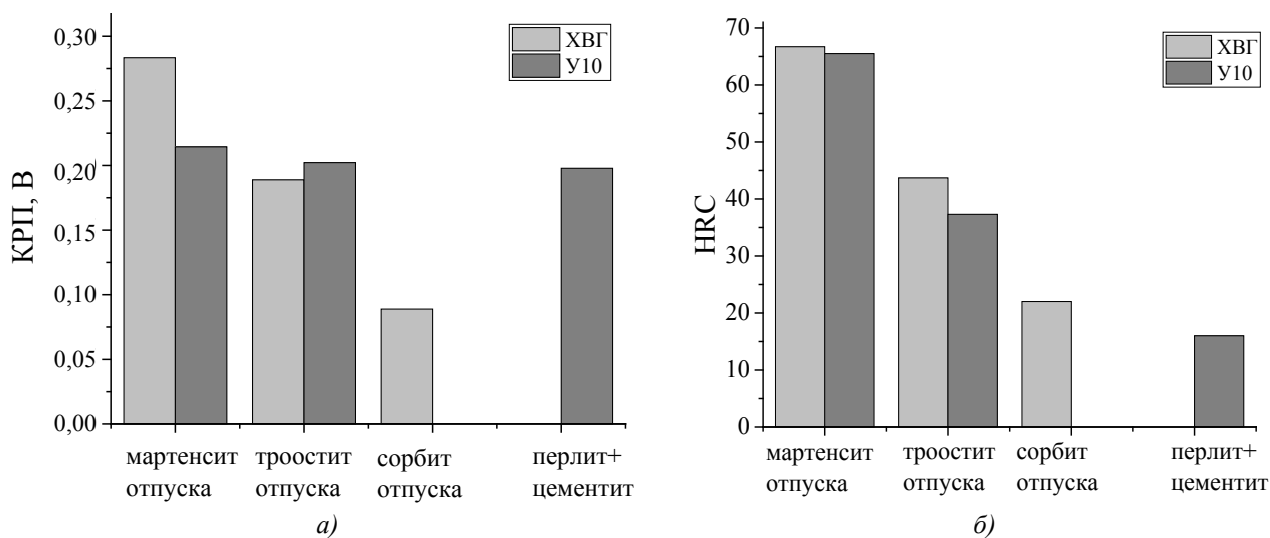


Рис. 3. Гистограмма значений КРП (а) и твердость HRC (б) для сталей ХВГ и У10

Согласно справочным данным [14], работа выхода электрона нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т принималась равной 3,67 эВ. Исходя из определения физической величины «контактной разности потенциалов», как разницы между работами выхода двух параллельных поверхностей разных металлов, образующих конденсатор, можно записать выражение для работы выхода электрона исследуемого образца в виде:

$$\varphi = \varphi_{\text{эт}} - eU_{\text{КРП}} \quad (2)$$

По выражению (2) проведена оценка величины работы выхода электрона структур мартенсита, троостита и сорбита, полученных в результате термообработки стали марок ХВГ и У10 (рис. 4). Так как величины КРП для всех исследованных структур положительны, то РВЭ этих структур меньше РВЭ эталонного образца. Зависимости величины РВЭ исследуемых образцов от структуры значительно отличаются. Для стали марки У10 изменение величины РВЭ не превышает сотые доли эВ, тогда как для стали марки ХВГ разница величин РВЭ структур сорбита и троостита доходит до 0,1 эВ, т.е. составляет 3% от значения РВЭ троостита. Работа выхода электрона мартенсита отпуска с карбидами стали ХВГ равна 3,45 эВ. Таким образом, можно заключить, что на величину РВЭ оказывают влияние следующие факторы — фазовый состав (разное структурное состояние, полученное при разных режимах термической обработки), химическое состояние (растворение элементов или образование химических соединений на поверхности образца) и дисперсность структуры. Под дисперсностью понимаем разницу в размерах пластинок продуктов отпуска (перлит, сорбит, троостит). Для легированной стали разница между структурами отпуска значительно отражается на величине РВЭ (рис. 4). В то же время для стали У10 эта разница на рис. 4 практически не видна.

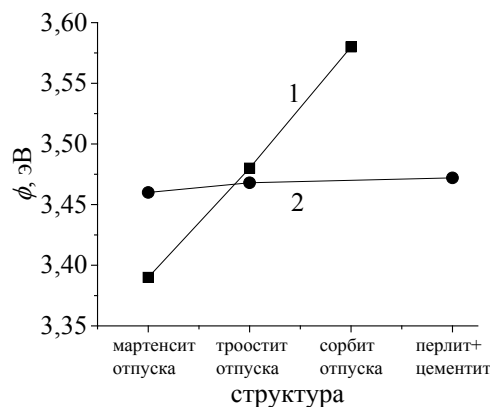


Рис. 4. Зависимость величины работы выхода электрона от фазового состава стали: 1 — сталь марки ХВГ; 2 — сталь марки У10

Обсуждение и заключения. Полученные зависимости показывают корреляцию изменения твердости и величины КРП. Так как КРП всех образцов положительна, то их РВЭ меньше РВЭ используемого эталона. Наибольшей величиной КРП обладает структура мартенсита отпуска. Установлено, что КРП понижается с увеличением температуры отпуска. Добавление легирующих элементов с более высокими значениями работы выхода электрона приводит к уменьшению КРП между исследуемыми образцами со структурами ферритно-цементитных смесей, вторичными карбидами и эталоном. Легирующие элементы значительно увеличивают изменение величин КРП при изменении структурного состояния сплава по сравнению с углеродистой сталью. Экспериментально установлена зависимость величины КРП от структуры, химического и фазового состава сталей. Проведена оценка величины работы выхода электрона стали марок У10 и ХВГ. Из полученных результатов видно, что данный метод более чувствителен к образцам легированной стали, чем к углеродистой. Таким образом можно заключить, что измерение КРП может использоваться как неразрушающий экспресс-метод диагностики при контроле поверхностей, подвергающихся воздействию активных сред или повышенных температур.

Библиографический список

1. Halas, S. 100 years of work function / S. Halas // Materials Science-Poland. — 2006. — Vol. 24, no. 4. — P. 951–968.
2. Вудраф, Д. Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф, Т. Делчар. — Москва : Мир, 1989. — 564 с.
3. Исследование локализации деформации методом зонда Кельвина / Н. А. Шипица, А. Л. Жарин, Д. И. Сарока, А. А. Дмитриевич // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7, № S1–1. — С. 218–221.
4. Контроль трущейся поверхности методами контактной разности потенциалов / А. Л. Жарин, О. К. Гусев, А. И. Свистун, А. К. Тявловский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2011. — № 5–2. — С. 286–295.
5. Контроль прожогов лопаток компрессора газотурбинного двигателя методом контактной разности потенциалов / И. В. Герасимов, В. С. Олешко, Д. П. Ткаченко, А. П. Кирпичников // Вестник Казанского технологического университета. — 2012. — Т. 15, №17. — С. 146–149.

6. Кукоз, В. Ф. Влияние контактной разности потенциалов на скорость фрикционной обработки поверхностей металлов / В. Ф. Кукоз, Ф. И. Кукоз / Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия : Технические науки. — 2004. — № 1. — С. 107–107.
7. Олешко, В. С. Оперативное определение поверхностной энергии металлических деталей авиационной техники / В. С. Олешко, И. С. Пиговкин // Наукоедение : [сайт]. — 2016. — Т. 8, № 3. — URL : <http://naukovedenie.ru/PDF/131EVN316.pdf>
8. Пустовойт, В. Н. Проблемы зарождения при мартенситном превращении в стали / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачёв // Вестник Донского государственного технического университета. — 2013. — Т. 13, № 1–2. — С. 5–24.
9. Пустовойт, В. Н. К вопросу о местах зарождения мартенсита / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2014. — № 23 (150). — С. 110–114.
10. Pustovoi, V. N. Structural identification of the phenomenon of “white zone” / V. N. Pustovoi, Yu. M. Dombrovskii, Yu. V. Dolgachev // Metal Science and Heat Treatment. — 2017. — Vol. 59, no. 1–2. — P. 3–7.
11. Попова, Л. Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: справочник термиста / Л. Е. Попова, А. А. Попов. — Москва : Металлургия. — 1991. — 503 с.
12. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. — Москва : Металлургия, — 1986. — 480 с.
13. Работа выхода электрона сплавов тугоплавких металлов / В. Б. Арзамасов, Э. Е. Смирнова, А. А. Строев [и др.] // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. — 2009. — №1 (7). — С. 102–104.
14. Рухляда, Н. Я. Исследование измерения работы выхода в процессе отжига нержавеющей стали, облученной ионами аргона / Н. Я. Рухляда, Р. К. Вишератин / Вопросы атомной науки и техники. Серия : Ядерно-реакторные константы. — 2014. — № 2. — С. 96–105.

Сдана в редакцию 29.06.2020

Запланирована в номер 30.07.2020

Об авторах:

Арефьева Людмила Павловна, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ResearcherID: [J-4075-2017](https://orcid.org/0000-0003-2431-6897), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2431-6897>, Ludmilochka529@mail.ru

Сукиязов Александр Гургенович, профессор кафедры «Радиоэлектроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ScopusID: [6506323992](https://orcid.org/0000-0002-6117-0068), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6117-0068>, pro_suk@mail.ru

Долгачев Юрий Вячеславович, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: [B-2328-2016](https://orcid.org/0000-0002-8558-1136), ScopusID: [55151183800](https://orcid.org/0000-0002-8558-1136), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8558-1136>, yuridol@mail.ru

Шахова Лилия Сергеевна, студент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9728-9909>, shahowa.lilya@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Л. П. Арефьева — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов и анализ результатов исследований, подготовка текста, формирование выводов. А. Г. Сукиязов — научное руководство, проведение экспериментальных исследований, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. Ю. В. Долгачев — анализ результатов исследования, подготовка текста, корректировка выводов. Л. С. Шахова — проведение пробоподготовки и экспериментальных исследований, доработка текста, оформление текста и графическое представление результатов исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.