

Оригинальная статья

УДК 620.19

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-74-79

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЛИКВАЦИЮ УГЛЕРОДА
В ОТЛИВКАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ЛИТЬЕМ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ**

© 2022 г. А. И. Аугсткалн, М. А. Гурьев, С. Г. Иванов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Россия, 656038, Барнаул, пр. Ленина, 46)

Аннотация. Науглероживание поверхностей стальных отливок, полученных литьем по газифицируемым моделям, является одной из основных и наиболее значимых проблем применения данного способа литья. В работе проведены эксперименты по снижению ликвации углерода в отливках из стали 20ГЛ с толщиной стенки 15 мм путем проведения термической обработки (нормализации) по двум режимам, а также проведена оценка влияния модификатора FIL-1 (Россия) на структуру отливок. Рассмотрены структуры до термической обработки и после нее. Установлено, что до термообработки образцы из стали 20ГЛ без модификатора имеют наибольший науглероженный слой (до 2 мм), тогда как в образцах с модификатором этот показатель не превышает 0,8 мм. Установлен оптимальный режим термообработки для модифицированных образцов (нормализация при температуре 950 °С и выдержка в течение 1 ч), приводящий к распределению углерода из науглероженной поверхности образцов по всему их сечению, измельчению структуры и переход ее в равновесное состояние.

Ключевые слова: сталь, отливка, термообработка, ликвация, углерод, микроструктура, модифицирование, литье по газифицируемым моделям

Благодарности: исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ.

Для цитирования: Аугсткалн А.И., Гурьев М.А., Иванов С.Г. Влияние термообработки на ликвацию углерода в отливках, полученных литьем по газифицируемым моделям // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 74 – 79. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-74-79](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-74-79)

Original article

**THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON CARBON LIQUATION IN CASTINGS
OBTAINED BY CASTING GASIFIED MODELS**

© 2022 A. I. Augstkaln, M. A. Guryev, S. G. Ivanov

Polzunov Altai State Technical University (Lenin Avenue, 46Russia, 656038, Barnaul, Russian Federation)

Abstract. Carburization of the surfaces of steel castings obtained by casting according to gasified models is one of the main and most significant problems of using this casting method. In the work, experiments were carried out to reduce carbon liquation in castings made of 20GL steel with a wall thickness of 15 mm by carrying out heat treatment (normalization) in two modes, and the influence of the FIL-1 modifier (Russia) on the structure of castings was evaluated. The structures were examined before and after heat treatment. It was found that before the heat treatment, samples made of 20GL steel without a modifier have the largest carbonized layer (up to 2 mm), whereas in samples with a modifier this indicator does not exceed 0.8 mm. The optimal heat treatment mode for modified samples was established (normalization at a temperature of 950 °C and holding for 1 hour), leading to the distribution of carbon from the carbonized surface of the samples over their entire cross section, refining of the structure and its transition to an equilibrium state.

Keywords: steel, casting, heat treatment, liquation, carbon, microstructure, modification, casting according to gasified models

Acknowledgements: The research was carried out at the Center for Collective Use of AltSTU.

For citation: Augstkaln A.I., Guryev M.A., Ivanov S.G. The effect of heat treatment on carbon liquation in castings obtained by casting gasified models. *Bulletin of Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 74 – 79. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-74-79](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-74-79)

Введение

Технология литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) лишь на первый взгляд является простой и обладает широкими возможностями. Достаточно сказать, что с момента получения простого (в некоторых случаях и сложного) чертежа отливки до момента полного ее изготовления требуется 24 ч. Преимущества ЛГМ: изготовление отливок без уклонов (или с отрицательными уклонами); возможность проведения сложного модифицирования, микролегирования и поверхностного упрочнения литых изделий без значительных затрат с внесением модифицирующих или легирующих материалов в пенополистирол; нанесение упрочняющих составов непосредственно на поверхность модели [1 – 3]. Все эти процессы можно автоматизировать с высокой степенью и с минимальными затратами.

Однако образующиеся продукты деструкции газифицируемой модели (газы и твердые частицы) в процессе заполнения формы металлом оказывают влияние на химический состав стали и на формирование физико-механических свойств отливок. В результате сложных процессов взаимодействия в системе модель – металл – форма происходит науглероживание поверхности и тела отливки, что сильно ограничивает применение ЛГМ для получения отливок из низкоуглеродистых и углеродистых сталей. При этом толщина науглероженного слоя изменяется неравномерно и зависит от положения отливки в форме, от материала модели и ее насыпной плотности, давления в форме и его распределения по опоке-контейнеру, температуры заливаемого расплава, скорости заливки и так далее [4, 5].

Можно выделить основные способы снижения ликвации углерода в поверхностной зоне отливки и по ее сечению:

- изготовление сложной литниковой системы [6, 7];
- удаление модели из формы выжиганием непосредственно перед заливкой формы [8, 9];
- использование различных модификаторов для расплава стали или чугуна с целью понижения температуры расплава перед заливкой и снижению тем самым способности быстро растворять углерод в процессе деструкции модели;

– применение различных режимов термической обработки [10].

Целью настоящей работы является изучение влияния температуры нормализации на снижение ликвации углерода на литых образцах толщиной 15 мм из стали 20ГЛ (ГОСТ 977 – 88), а также оценка влияния модифицирования на структуру литых заготовок.

Получение образцов

Для получения моделей образцов использовали пенополистирол повышенной активности марки Н-4S (Нидерланды) с содержанием пентана 7,02 % и диаметром гранул в исходном состоянии 0,3 – 0,6 мм. Насыпная плотность после предварительного вспенивания 20 кг/м³. Модели образцов получали спеканием гранул в пресс-форме в автоклаве ГК-100-3М при давлении пара 0,2 МПа. Крепление моделей к литниковой системе из того же материала осуществляли пайкой. Перед формовкой модельные кусты обрабатывали огнеупорным покрытием FRD-S (Россия) окунанием, вязкость краски 16 с по вискозиметру ВЗФ-6. Сушку блоков до постоянной массы осуществляли при температуре 45 – 50 °С.

Формовку осуществляли в вакуумируемых опоках-контейнерах размерами 1000×1000×1000 мм. В качестве формовочного материала использовали кварцевый песок марки 2К2О203 (ГОСТ 2138 – 91). В работе применяли водокольцевой насос ВВН1-12 (Россия) производительностью 12 м³/мин, а для стабилизации процесса вакуумирования – ресивер объемом 1 м³.

Получение расплава стали осуществляли в индукционной плавильной печи с набивным тиглем (нейтральная футеровка) емкостью 500 кг. Форму заливали равномерной непрерывной струей из поворотного ковша емкостью 250 кг. Температура металла на начало заливки составляла 1570 – 1590 °С. Химический состав стали определяли с помощью эмиссионного спектрометра «АРГОН-5СФ».

После заливки в течение 3 мин форма находилась под вакуумом. Через 30 минут после заливки форму выбивали и очищали в дробебетном аппарате Q320 (Китай).

Все полученные образцы были распределены на следующие группы:

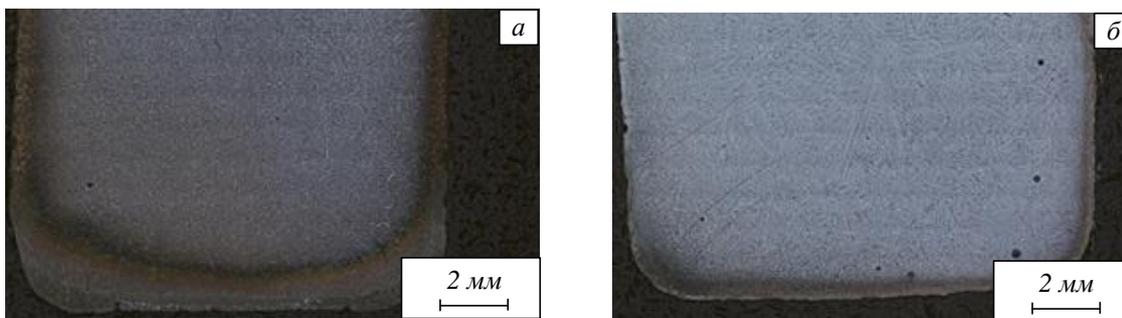


Рис. 1. Макроструктура образцов без модификатора (а) и с модификатором (б)
 Fig. 1. Macrostructure of samples without a modifier (a) and with modifier (b)

1 – без термической обработки; 2 – термообработка по режиму 1 (нагрев до 880 °С, выдержка в течение 2 ч, охлаждение на воздухе); 3 – термообработка по режиму 2 (нагрев до 950 °С, выдержка в течение 1 ч, охлаждение на воздухе). При этом половина полученных образцов в процессе подготовки расплава была обработана флюсо-модифицирующим комплексом FIL-1 (Россия).

Методы и принципы исследования

Металлографические исследования проводили с использованием методов оптической микроскопии. Применяли программно-аппаратный комплекс ThixometPro® (включает программное обеспечение Thixomet® и инвертированный оптический микроскоп CarlZeissAxioObserver Z1m) [11, 12].

Вырезку образцов для исследования микроструктуры проводили с помощью прецизионного отрезного станка MICRACUT–201 без перегрева исследуемой плоскости. Место вырезки выбирали таким образом, чтобы можно было оценить величину науглероживания как на боковой поверхности, так и в верхней части образца.

Полученные образцы запрессовывали в бакелитовый компаунд с помощью автоматического программируемого пресса METAPRESS, после чего осуществляли шлифовку на автоматическом шлифовально-полировальном станке DIGIPREP по методикам, описанным в работах [13 – 15].

При подготовке проб использовали набор дисков шлифовальной бумаги с различной зернистостью. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости применяли воду. Полировку осуществляли на полировочных кругах с периодической подачей алмазной суспензии зернистостью 9, 6, 3, 1 мкм. Для травления поверхности шлифов использовался 4 %-ый раствор азотной кислоты в этиловом спирте, а также пересыщенный раствор щелочного пикрата натрия.

Обсуждение основных результатов

На рис. 1 представлены панорамные изображения микроструктуры стальных образцов в литом состоянии с внесенным в расплав модификатором и без него.

На представленных изображениях хорошо видно, что модификатор оказывает влияние на структуру образца, а также влияет и на распределение углерода по сечению. В образце без модификатора толщина науглероженного слоя наибольшая и достигает 2 мм, тогда как в образце с модификатором она не превышает 0,8 мм, а в некоторых частях отливки и полностью отсутствует.

В образце без модификатора на глубине 700 – 800 мкм структура практически полностью состоит из перлита (рис. 2).

После проведения нормализации по режиму 1 (рекомендован ГОСТ) структура образцов представлена на рис. 3. Видно, что для образцов как без модификатора, так и с модификатором нормализация с температуры 880 °С не оказала значительного влияния на науглероженный слой. Однако становится хорошо заметно, что структура образца при применении модификатора значительно мельче, чем без него.

Структура образцов, прошедших нормализацию по режиму 2, представлена на рис. 4.

На представленных изображениях (рис. 4) хорошо видно, что у обоих образцов науглероженного у поверхности слоя практически нет. Структура образца с модификатором равновесная, перлит и феррит распределены равномерно (рис. 4, б). Нет и как такового обезуглероженного слоя, свойственного отливкам и другим изделиям после термической обработки в камерных печах без защитной атмосферы. В образцах без модификатора (рис. 4, а) также прошли значительные изменения: количество перлита в поверхностной зоне уменьшилось. Заметно также, что структура не стала полностью равновесной: феррит и перлит распределены неравномерно.

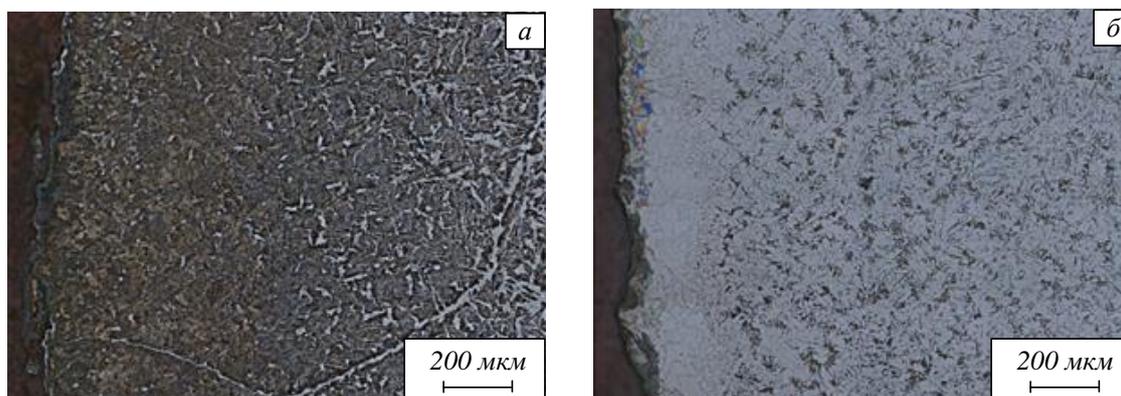


Рис. 2. Структура боковой поверхности без модификатора (а) и с модификатором (б) до термообработки
Fig. 2. The structure of the lateral surface without a modifier (a) and with modifier (b) before heat treatment

Выводы

Образцы стали 20ГЛ без модификатора обладают наибольшим науглероженным слоем, который достигает 2 мм, тогда как в образцах с модификатором FIL-1 толщина слоя не превышает 0,8 мм.

Нормализация при температуре 880 °С и выдержка в течение 2 ч являются не эффективными, так как не наблюдается перераспределения углерода в поверхностных слоях отливок, то есть нет снижения ликвации углерода.

Нормализация при температуре 950 °С и выдержка в течение 1 ч приводит к перераспределению углерода из науглероженной поверхности образцов по всему их сечению, измельчению структуры и переходу ее в равновесное состояние. Однако для образцов без модификатора время выдержки при такой температуре необходимо увеличивать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Минск: Беларусь, 1981. 205 с.
2. Гурьев М.А. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием на основе бора // Ползуновский альманах. 2009. № 2. С. 46–47.
3. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Черных Е.В. Поверхностное легирование деталей в процессе их производства методом литья по газифицируемым моделям // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т. 12. № 4. С. 429–431.
4. Гурьев М.А. Повышение износостойкости деталей машин и инструмента поверхностным легированием при производстве литых изделий: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2010. 191 с.
5. Кондратьев С.Ю., Хайдоров А.Д. Науглероживание стальных отливок, получаемых литьем по газифицируемым моделям // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 4 (207). С. 117–126.
6. Морозов В.А. Изготовление стальных отливок литьем по газифицируемым моделям //



Рис. 3. Структура образцов боковой поверхности без модификатора (а) и с модификатором (б) после нормализации по режиму I
Fig. 3. The structure of the samples of the lateral surface without a modifier (a) and with modifier (b) after normalization according to mode I

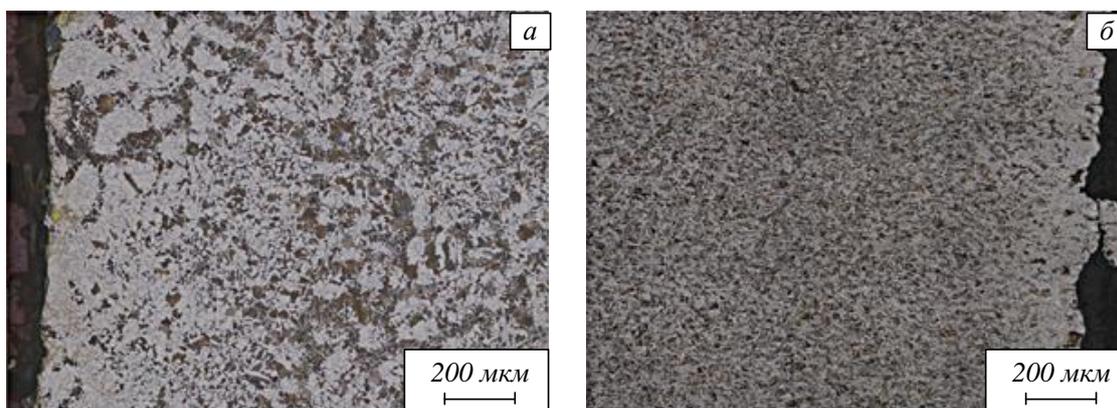


Рис. 4. Структура образцов боковой поверхности без модификатора (а) и с модификатором после нормализации по режиму 2

Fig. 4. The structure of the samples of the lateral surface without a modifier (a) and with modifier (b) after normalization according to mode 2

- Литейное производство. 2015. № 5. С. 29–31.
7. Морозов В.А. Некоторые вопросы технологии литья стали по газифицируемым моделям // Литейное производство. 2016. № 1. С. 32–35.
 8. Шуляк В.С. Литье по газифицируемым моделям. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 408 с.
 9. Озеров В.А., Шуляк В.С., Плотников Г.А. Литье по моделям из пенополистирола. М.: Машиностроение, 1970. 183 с.
 10. Ерболатов А.Е., Гурьев М.А., Иванов С.Г., Аугсткалин А.И. Особенности структуры тонких образцов из стали 20ГЛ, полученных литьем по газифицируемым моделям // Ползуновский вестник. 2022. № 2. С. 139–144. doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.019
 11. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial Application of Thixomet // *Metallography. Microstructure and Analysis*. 2016. No. 5. P. 294–301. doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6
 12. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloys microstructure // *Microscopy and Microanalysis*. 2015. Vol. 21. No. 3. P. 457–458. doi.org/10.1017/S1431927615003086
 13. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А., Романенко В.В. Особенности методики подготовки образцов для автоматического анализа карбидной фазы стали Х12Ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "ThixometPro" // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 165–168. doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.031
 14. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы // Ползуновский вестник. 2020. № 3. С. 102–105. doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.018
 15. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V., Lyubochko D.A., Chigintsev L.S. Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis // *Microscopy and Microanalysis*. 2015. Vol. 21. No. 3. P. 1755–1756. doi.org/10.1007/s13632-015-0095-1

REFERENCES

1. Voroshnin L.G. *Borating of industrial steels and cast iron*. Minsk: Belarus', 1981, 205 p. (In Russ.).
2. Gur'ev M.A. Hardening of cast parts by surface alloying based on boron. *Polzunovskii al'manakh*. 2009, no. 2, pp. 46–47. (In Russ.).
3. Gur'ev M.A., Ivanov S.G., Chernykh E.V. Surface alloying of parts in the process of their production by casting according to gasified models. *Fundamental problems of modern materials science*. 2015, vol. 12, no. 4, pp. 429–431. (In Russ.).
4. Gur'ev M.A. *Increasing the wear resistance of machine parts and tools by surface alloying in the production of cast products*: dis. ... candidate of Technical Sciences. Barnaul: diss. ... kand. tekhn. nauk. Barnaul, 2010, 191 p. (In Russ.).
5. Kondrat'ev S.Yu., Khaidorov A.D. Carburization of steel castings obtained by casting according to gasified models. *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Poly-*

- technical University*. 2014, no. 4 (207), pp. 117–126. (In Russ.).
6. Morozov V.A. Production of steel castings by casting according to gasified models. *Foundry production*. 2015, no. 5, pp. 29–31. (In Russ.).
 7. Morozov V.A. Some questions of the technology of casting steel according to gasified models. *Foundry production*. 2016, no. 1, pp. 32–35. (In Russ.).
 8. Shulyak B.C. *Casting on gasified models*. SPb.: NPO «Professional», 2007, 408 p. (In Russ.).
 9. Ozerov V.A., Shulyak V.S., Plotnikov G.A. *Casting on models made of expanded polystyrene*. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 183 p. (In Russ.).
 10. Erbolatov A.E., Gur'ev M.A., Ivanov S.G., Augstkaln A.I. Structural features of thin 20GL steel samples obtained by casting using gasified models. *Polzunovskii vestnik*. 2022, no. 2, pp. 139–144. (In Russ.). doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.02.019
 11. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial Application of Thixomet. *Metallography. Microstructure and Analysis*. 2016, no. 5, pp. 294–301. doi.org/10.1007/s13632-016-0289-6
 12. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloys microstructure. *Microscopy and Microanalysis*. 2015, vol. 21, no. 3, pp. 457–458. doi.org/10.1017/S1431927615003086
 13. Ivanov S.G., Gur'ev A.M., Zemlyakov S.A., Gur'ev M.A., Roma-nenko V.V. Features of the method of sample preparation for automatic analysis of the carbide phase of steel X12F1 after cementation in vacuum using the software package "ThixometPro". *Polzunovskii vestnik*. 2020, no. 2, pp. 165–168. (In Russ.). doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.031
 14. Ivanov S.G., Gur'ev A.M., Zemlyakov S.A., Gur'ev M.A. Methodology of sample preparation of high-alloy steel samples for automatic analysis of the carbide phase. *Polzunovskii vestnik*. 2020, no. 3, pp. 102–105. (In Russ.). doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.018
 15. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V., Lyubochko D.A., Chigintsev L.S. Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis. *Microscopy and Microanalysis*. 2015, vol. 21, no. 3, pp. 1755–1756. doi.org/10.1d0o1i:

71/OS.1041371/9S21746311590207965155100
9551

Сведения об авторах

Артур Игоревич Аугсткалн, аспирант кафедры «Физика», Алтайский государственный университет им. И.И. Ползунова
E-mail: augstkaln-a@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7659-3987

Михаил Алексеевич Гурьев, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787

Сергей Геннадьевич Иванов, д.т.н., заведующий лабораторией микроскопии, заведующий кафедрой «Машиностроительные технологии и оборудование», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249

Information about the authors

Artur I. Augstkaln, post-graduate student of the Department of Physics, Polzunov Altai State Technical University
E-mail: augstkaln-a@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7659-3987

Mikhail A. Guryev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment», Polzunov Altai State Technical University
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787

Sergey G. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Microscopy Laboratory, Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Polzunov Altai State Technical University
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.08.2022

После доработки 02.09.2022

Принята к публикации 05.09.2022

Received 30.08.2022

Revised 02.09.2022

Accepted 05.09.2022