

УДК 544.032.65

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-61-70>



Влияние лазерного микроструктурирования на структуру и свойства поверхностного слоя деталей из углеродистой стали марки У8А

И.В. Минаев¹✉

¹ Научно-производственное предприятие «Телар»
ул. Рязанская, д. 3К, г. Тула 300026, Российская Федерация

✉ e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Резюме

Целью работы являлось исследование влияния лазерного микроструктурирования на изменение микротвердости и структуры зоны лазерного воздействия листовой высокоуглеродистой стали марки У8А.

Методы. В качестве объектов исследования была выбрана листовая инструментальная высокоуглеродистая сталь марки У8А (толщина листа 10 мм), из которого с помощью непрерывного волоконного лазера, снабженного оптической головкой ЭИП1119 производства НТО «ИРЭ-Полус», вырезали образцы для исследования. После газолазерной резки проводили лазерное микроструктурирование поверхности проката Q-switch волоконным импульсным лазером по режиму: скорость 40 мм/с; мощность 100 Вт; частота 100 кГц, длительность импульса 100 нс, энергия импульса 1 мДж. Для изучения микроструктуры были изготовлены шлифы с последующим травлением поверхности 5%-ным раствором HNO₃ в спирте. Микроструктуру изучали на инвертированном, металлографическом микроскопе Nikon MA200 при разных увеличениях. Для измерения макротвердости использовалось следующее оборудование: твердомеры Роквелл ТР-150М (шкалы HRC, HRB и HRA), Супер-Роквелл ТРС 5009-01М (шкала HRN15 – при нагрузке 15 кгс). Микротвердость измеряли на твердомере KBW1-V при нагрузках: 10 Н, 1 Н и 0,25 Н.

Результаты. Установлено, что обработка лазером поверхности образцов привела к повышению твердости поверхностного слоя глубиной 0,029–0,045 мм приблизительно в два раза. Выявлено, что повышение твердости происходит за счет изменения структуры поверхностного слоя образцов в результате увеличения дисперсности зернистого перлита. В процессе лазерного воздействия происходит нагрев поверхности образцов и дальнейшее охлаждение на воздухе после отведения лазера, что соответствует классической термообработке – нормализации. Полученные значения твердости соответствуют структуре троостита.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов.

Ключевые слова: лазерное микроструктурирование; микротвердость; зона лазерного воздействия; микроструктура.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Минаев И.В. Влияние лазерного микроструктурирования на структуру и свойства поверхностного слоя деталей из углеродистой стали марки У8А // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 61–70. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-61-70>.

Поступила в редакцию 14.01.2025

Подписана в печать 17.02.2025

Опубликована 20.03.2025

© Минаев И.В., 2025

The effect of laser microstructuring on the structure and properties of the surface layer of U8A Carbon steel parts

Igor V. Minaev¹✉

¹ Scientific and Production Enterprise "Telar"
3K Ryazanskaya Str., Tula 300026, Russian Federation

✉ e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Abstract

The purpose of the work was to study the effect of laser microstructuring on changes in the microhardness and structure of the laser exposure zone of U8A high-carbon steel sheets.

Methods. High-carbon steel sheet U8A grade (sheet thickness 10 mm) was selected as the objects of the study, from which samples for the study were cut using a continuous fiber laser equipped with an EIP1119 optical head manufactured by NTO IRE-Polyus. After gas laser cutting, laser microstructuring of the rolled Q-switch surface was performed using a fiber pulsed laser according to the following mode: speed 40 mm/s; power 100 Watts; frequency 100 kHz, pulse duration 100 ns, pulse energy 1MJ. To study the microstructure, slits were made, followed by etching the surface with a 5% HNO₃ solution in alcohol. The microstructure was studied using a Nikon MA200 inverted metallographic microscope at different magnifications. The following equipment was used to measure the macrohardness: Rockwell TP-150M hardness meters (scales HRC, HRB and HRA), Super-Rockwell TRS 5009-01M (scale HRN15 – at a load of 15 kgf). Microhardness was measured on a KBW1-V hardness tester under loads: 10 N, 1 N and 0.25 N.

Results. It was found that laser treatment of the surface of the samples led to an approximately two-fold increase in the hardness of the surface layer with a depth of 0.029-0.045 mm. It is revealed that the increase in hardness occurs due to a change in the structure of the surface layer of the samples as a result of an increase in the dispersion of granular perlite. It is shown that during laser exposure, the surface of the samples is heated and further cooled in air after laser removal, which corresponds to classical heat treatment – normalization. The obtained hardness values correspond to the troostite structure.

Conclusion. The results obtained can be used in the creation of resource-saving material processing processes.

Keywords: laser microstructuring; microhardness; laser exposure zone; microstructure.

Conflict of interest: The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Minaev I.V. The effect of laser microstructuring on the structure and properties of the surface layer of U8A Carbon steel parts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(1):61–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-61-70>.

Received 14.01.2025

Accepted 17.02.2025

Published 20.03.2025

Введение

Лазерные технологии и системы лазерного воздействия представляют собой многообещающие подходы для изготовления и обработки разнообразных изделий, благодаря чему они нашли применение во многих отраслях промышленности [1]. Значимой задачей текущего этапа развития металлургии и термической обработки является изучение влияния лазерного излучения при лазерной резке металлических деталей и неразрушающем лазерном воздействии на поверхности металлов и

сплавов, что способствует изменению их микроструктуры и свойств [2].

Такие технологические процессы, как лазерная резка и микроструктурирование, характеризуются интенсивной скоростью нагрева (от 10^3 до 10^6 °/с) и быстрым охлаждением (10^6 °/с и выше) обрабатываемых поверхностей, обусловленными высокой скоростью потока квантов лазерного излучения ($\sim 3 \cdot 10^8$ м/с) [3].

Среди общих преимуществ лазерных методов обработки особо выделяются следующие свойства лазерного микроструктурирования [4]: высокоточная локальная

обработка, доступ к сложнодоступным участкам, химическая чистота, контролируемая толщина изменений, минимальная или совсем отсутствующая финальная доводка, возможность дистанционного мониторинга и автоматизация, низкая пористость получаемого покрытия [5], минимизированное деформирование изделия [6], высокая эффективность и долговечность сформированных слоев [7], а также значительное (в 2–5 раз) продление срока службы обработанных изделий [8].

Тем не менее на сегодняшний день имеется ограниченное количество исследований [9], посвящённых анализу изменения структуры [10] и свойств деталей машин [11] после применения данных технологий.

Целью работы являлось исследование влияния лазерного микроструктури-

рования на изменение микротвердости и структуры зоны лазерного воздействия листовой высокоуглеродистой стали марки У8А.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования была выбрана листовая инструментальная высокоуглеродистая сталь марки У8А (толщина листа 10 мм), из которой с помощью непрерывного волоконного лазера, снабженного оптической головкой ЭИП1119 производства НТО «ИРЭ-Полюс» вырезали образцы для исследования (рис. 1). Соосно с лазерным пучком в зону газолазерной резки подавали струю технологического кислорода. Резку листов осуществляли по режимам, приведенным в таблице 1.



Рис. 1. Эскиз образца после лазерного микроструктурирования с одновременным упрочнением поверхности

Fig. 1. Sketch of a sample after laser microstructuring with simultaneous surface hardening

Таблица 1. Режимы газолазерной резки листовой инструментальной стали марки У8А

Table 1. Modes of gas laser cutting of U8A grade sheet tool steel

Марка стали / толщина листа, мм / Steel grade / sheet thickness, mm	Номер режима / Mode number	Мощность излучения W , Вт / Radiation power W , W	Скорость резки V , мм/мин / Cutting speed V , mm/min	Давление вспомогательного газа P , атм / Auxiliary gas pressure P , atm	Фокусное расстояние F , мм / Focal length F , mm
У8А/10	6-1	1400	1000	0,8	+1 (301)
	6-2	1200	700	0,8	-1 (299)
	6-3	1200	700	0,8	0 (300)

После газолазерной резки проводили лазерное микроструктурирование поверхности проката (рис. 1) Q-switch волоконным импульсным лазером по режиму: скорость 40 мм/с, мощность 100 Вт, частота 100 кГц, длительность импульса 100 нс, энергия импульса 1 мДж.

Для изучения микроструктуры были изготовлены шлифы с последующим травлением поверхности 5%-ным раствором HNO_3 в спирте (рис. 1). Микроструктуру изучали на инвертированном, металлографическом микроскопе Nikon MA200 при разных увеличениях по схеме, приведенной на рисунке 2.

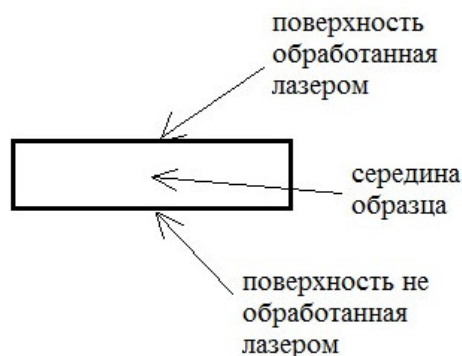


Рис. 2. Схема исследования зон шлифа после травления

Fig. 2. The study scheme of the slot zones after etching

Для измерения макротвердости использовалось следующее оборудование: твердомеры Роквелл ТР-150М (шкалы HRC, HRB и HRA), Супер-Роквелл ТРС 5009-01М (шкала HRN15 – при нагрузке 15 кгс). Микротвердость измеряли на твердомере KBW1-V при нагрузках: 10 Н, 1 Н и 0,25 Н.

Результаты и их обсуждение

На полученных микроснимках видно, что микроструктура основного металла представляет собой зернистый перлит (рис. 3).

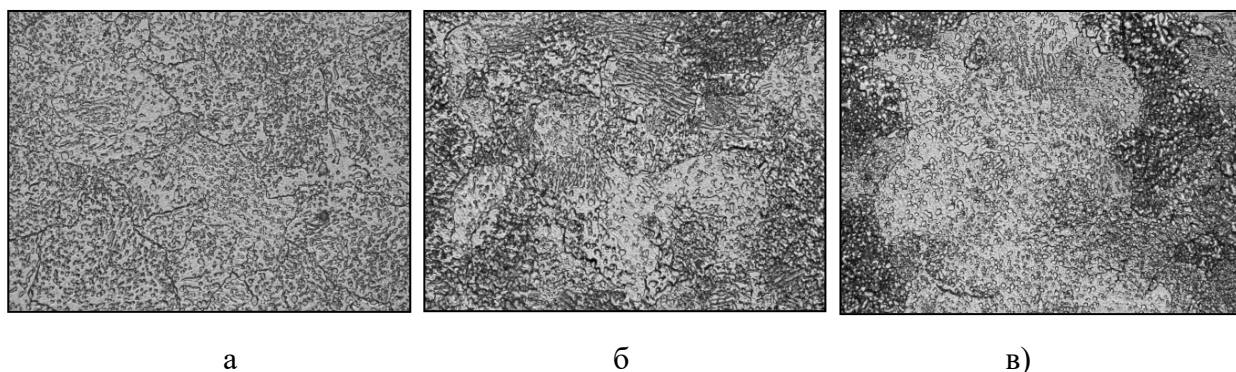


Рис. 3. Микроструктуры середины (основного металла) образцов после лазерного микроструктурирования, $\times 1000$: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3

Fig. 3. Microstructures of the middle (base metal) of the samples after laser microstructuring, $\times 1000$: а – sample 1; б – sample 2; в – sample 3

Со стороны поверхности, подвергнутой лазерному микроструктурированию, обнаружена зона с измененной структурой (зона лазерного воздействия). Глу-

бина данной зоны для образцов 1, 2 и 3 составила 0,045 мм, 0,032 мм и 0,029–0,041 мм соответственно (рис. 4).

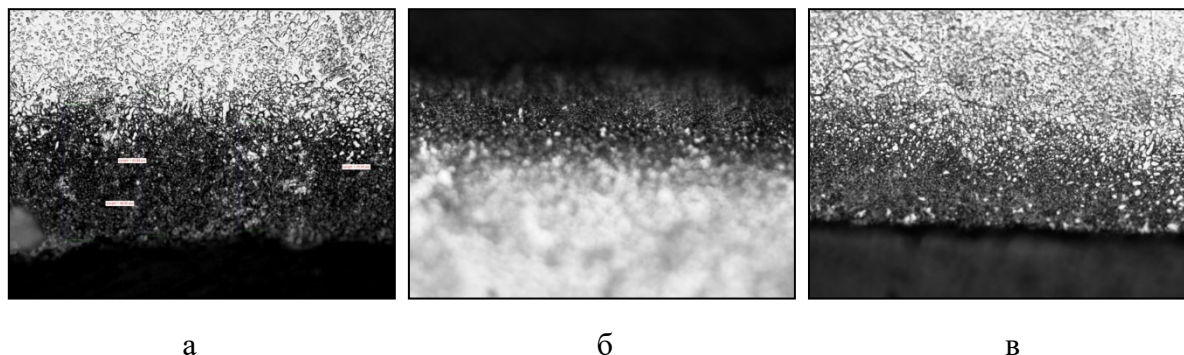


Рис. 4. Микроструктура зоны лазерного воздействия, $\times 1000$: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3
Fig. 4. Microstructure of the laser exposure zone, $\times 1000$: a – sample 1; б – sample 2; в – sample 3

Структура зоны лазерного воздействия (рис. 4) представляет собой высокодисперсную смесь, напоминающую по своей морфологии троостит или бейнит. Исходя из характера проводимой обработки над образцами, можно предположить, что нагрев с помощью лазерного луча до высоких температур и последующее охлаждение на воздухе соответствует обработке – нормализация. Данная обра-

ботка может привести к получению вышеописанных структур [12].

Далее исследовали структуру образцов со стороны, не подвергавшейся лазерной обработке (рис. 5). На полученных микроснимках не обнаружен структурный слой, отличающийся от структуры основного металла, что свидетельствует о достоверности полученных результатов со стороны лазерной обработки.

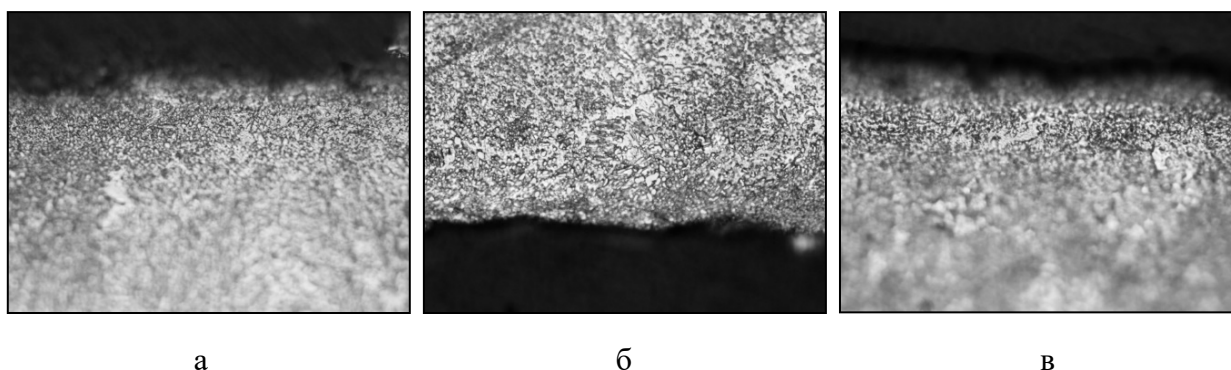


Рис. 5. Микроструктура необработанной (горячекатаной) поверхности, $\times 1000$: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3

Fig. 5. Microstructure of the untreated (hot-rolled) surface, $\times 1000$: а – sample 1; б – sample 2; в – sample 3

Далее на образцах было проведено измерение твердости по представленной ниже схеме (рис. 6). Результаты измерения макро- и микротвердости со стороны

подвергнутой лазерному микроструктурированию и для сравнения с необработанной стороны представлены в таблице 2.

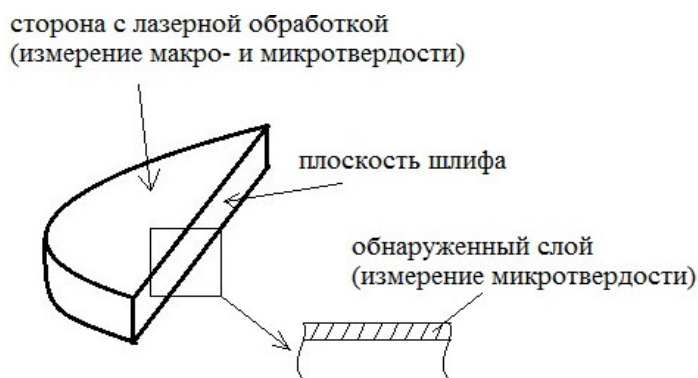


Рис. 6. Схема измерения макро- и микротвердости на образцах

Fig. 6. Scheme of measuring macro- and microhardness on samples

Таблица 2. Результаты измерения макро- и микротвердости стали марки У8А

Table 2. The results of measuring the of macro- and microhardness of steel grade U8A

Номер образца / Sample number	Твердость / Hardness					
	HRC	HRB	HRA	HRN15	Микротвердость, HV / Microhardness, HV	
					10 Н	1 Н
Обработанная лазером поверхность / Laser-treated surface						
1	0	84	50	54	297	412
2	0	83	51	58	280	483
3	0	84	49	53	282	464
Необработанная лазером поверхность / Non-laser treated surface						
1	0	82	51	56	218	313
2	0	84	50	56	231	315
3	0	81	50	57	215	313

После анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что наибольшие значения твердости наблюдаются при измерении микротвердости при нагрузке 1 Н. Данный результат подтверждает ранее полученные данные при изучении микроструктуры и свидетельствует

о том, что упрочненный слой имеет относительно небольшую глубину.

Для уточнения полученных результатов проводилось измерение микротвердости со стороны шлифа в пределах обнаруженного слоя с измененной структурой (зона лазерного воздействия) и в основном металле (табл. 3).

Таблица 3. Результаты измерения микротвердости со стороны шлифа стали марки У8А

Table 3. The results of measuring microhardness from the side of the U8A grade steel slot

Номер образца / Sample number	Микротвердость, HV / Microhardness, HV		
	1 Н		0,25 Н
	упрочненный слой / reinforced layer	основной металл / base metal	упрочненный слой / reinforced layer
1	379	213	330
2	360	186	351
3	395	180	382

Различие в значениях микротвердости, зафиксированной при испытании со стороны шлифа (см. табл. 3) и с поверхности, подвергнутой лазерной обработке (см. табл. 2), можно объяснить тем, что после применения лазера поверхность становится более шероховатой по сравнению с шлифованной [14]. Это объясняет различие в микротвердости на необработанной лазером поверхности при нагрузках 10 Н и 1 Н, при большей нагрузке измеряется интегральная твердость, охватывающая более глубокие слои материала. Стоит отметить, что результаты при нагрузке 10 Н (см. табл. 2) совпадают с результатами, полученными на основном металле (см. табл. 3) при нагрузке 1 Н.

Из литературных данных известно [14], что зернистый перлит имеет твердость 160–200 HV, сорбит 270–328 HV и троостит 337–420 HV. Из таблицы 3 видно, что значения микротвердости, полученные при нагрузках 1 Н и 0,25 Н, попадают в интервал, соответствующий структуре троостит. Это совпадает с ранее сделанным предположением, что выявленный структурный слой является трооститом.

Таким образом, на основании вышеприведенных результатов можно утверждать, что лазерное микроструктурирование [15] является эффективным инстру-

ментом повышения качественных характеристик [16] поверхностного слоя [17], позволяющим получать изделия из конструкционных сталей, по своим свойствам [18] не уступающие изделиям, изготовленным с применением традиционных технологий термической обработки [19].

Выводы

1. Установлено, что обработка лазером поверхности образцов привела к повышению твердости поверхностного слоя глубиной 0,029–0,045 мм приблизительно в два раза. Выявлено, что повышение твердости происходит за счет изменения структуры поверхностного слоя образцов в результате увеличения дисперсности зернистого перлита.

2. Показано, что в процессе лазерного воздействия происходит нагрев поверхности образцов и дальнейшее охлаждение на воздухе после отведения лазера, что соответствует классической термообработке – нормализации. Полученные значения твердости соответствуют структуре троостита.

3. На примере лазерного микроструктурирования стали марки У8А подтверждена возможность совмещения лазерной микрообработки проката заданной толщины с проведением поверхностного упрочнения.

Список литературы

1. Особенности газолазерной резки углеродистых сталей: монография / И.В. Минаев, С.Н. Кутепов, А.Н. Сергеев, Д.С. Клементьев, И. В. Голышев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. 170 с.
2. Поверхностное микроструктурирование горячекатаных углеродистых конструкционных сталей при комплексном воздействии лазерным излучением / И.В. Минаев, С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, Д.В. Журба, И.В. Голышев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 2. С. 8–21. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-8-21>.
3. Гладуш Г.Г., Смуров И.Ю. Физические основы лазерной обработки материалов. М.: Физматлит, 2017. 592 с.
4. Лазерное микроструктурирование поверхности стали / Л.Е. Афанасьева, С.А. Третьяков, А.И. Иванова, Р.М. Гречишкин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14, № 7(163). С. 297–302.

5. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / под ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.
6. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В.П. Вейко, В.Н. Смирнов, А.М. Чирков, Е.А. Шахно. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 103 с.
7. Лазерная очистка поверхностей металлов: физические процессы и применение / В.П. Вейко, Т.Ю. Мутин, В.Н. Смирнов, Е.А. Шахно, С.А. Батище // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 4. С. 30–36.
8. Гаврилов Д.И., Жданов А.В., Беляев И.В. Влияние лазерной модификации поверхности на физико-механические и трибологические свойства штамповой стали // Ползуновский вестник. 2022. № 4-2. С. 14–18.
9. Тескер Е.И., Асеева Е.Н., Соломатин А.В. Исследование процессов формирования поверхностных слоев при лазерной обработке деталей узлов трения из конструкционных сталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2018. № 3 (213). С. 121–124.
10. Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Спиридонова М.М. Влияние параметров лазерного микроструктурирования на особенности строения зоны лазерного воздействия деталей из стали марки 30ХГСА // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции. Курск: Университетская книга, 2024. С. 197–201.
11. Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Спиридонова М.М. Обеспечение качественных показателей поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА методом лазерного микроструктурирования // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 18–33. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-18-33>.
12. Ведерникова И.И., Полетаев В.А. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин лазерным модифицированием // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. Вып. 3. С. 1–3.
13. Али Е., Валеев И. А., Тая А. Методика исследования шероховатости и распределение значений микротвердости поверхности стали 40Х13 после лазерной обработки на примере инструмента скальпеля медицинского // Молодой исследователь 2024: сборник статей VI Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение, 2024. С. 2–32.
14. Новиков И.И. Теория термической обработки стали. 5-е изд. М.: ЛЕНАНД, 2021. 480 с.
15. Григорьянц А.Г., Казарян М.А. Лябин Н.А. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. М.: Физматлит, 2017. 416 с.
16. Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Спиридонова М.М. Формирование качественных показателей поверхностного слоя деталей машин методами лазерной обработки // Фундаментальные основы механики. 2024. № 14. С. 141–146.
17. Верещагин М.Н., Целуева С.Н., Целуев М.Ю. Модифицирование поверхностных слоев металлических деталей импульсной лазерной обработкой // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 99–109.
18. Лазерное термоупрочнение колес зубчатых, изготовленных из порошковых материалов / Д.А. Разин, И.С. Печников, К.А. Фролов, А.Б. Люхтер // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24, № 4. С. 323–330.
19. Индукционная и лазерная термическая обработка стальных изделий / М.В. Майсурадзе, М.А. Рыжков, О.Ю. Корниенко, С.И. Степанов. Екатеринбург: Изд-во Урал. федер. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. 92 с.

Reference

1. Minaev I.V., Kutepov S.N., Sergeev A.N., Klementyev D.S., Golyshev I. V. Features of carbon steel laser cutting. Tula: TulGU; 2024. 170 p. (In Russ.)
2. Minaev I.V., Kutepov S.N., Klementyev D.S., Zhurba D.V., Golyshev I.V. Surface microstructuring of hot-rolled carbon structural steels under complex laser radiation exposure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(2):8–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-8-21>.
3. Gladush G.G., Smurov I.Y. Physical foundations of laser processing of materials. Moscow: Fizmatlit; 2017. 592 p. (In Russ.)
4. Afanasyeva L.E., Tretyakov S.A., Ivanova A.I., Grechishkin R.M. Laser microstructuring of the steel surface. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2018;14(7):297–302. (In Russ.)
5. Suslov A.G., eds. Fundamental principles of technological support and reliability improvement of machine-building products. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022. 552 p. (In Russ.) (In Russ.)
6. Veiko V.P., Smirnov V.N., Chirkov A.M., Shakhno E.A. Laser cleaning in mechanical engineering and instrumentation. St. Petersburg: NIU ITMO; 2013. 103 p. (In Russ.)
7. Veiko V.P., Mutin T.Y., Smirnov V.N., Shakhno E.A., Batishche S.A. Laser cleaning of metal surfaces: physical processes and applications. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2008;51(4):30–36. (In Russ.)
6. Stepankin I.N., Vereshchagina L.S., Pozdnyakov E.P., Devoino O.G., Veremey P.V. The effect of laser modification on the performance characteristics of P6M5 steel. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo = Vestnik P.O. Sukhoi State Technical University*. 2015;(1):19–26. (In Russ.)
7. Afanasyeva L.E., Tretyakov S.A., Ivanova A.I., Grechishkin R.M. Laser microstructuring of the steel surface. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening technologies and coatings*. 2018;14(7):297–302. (In Russ.)
8. Gavrilov D.I., Zhdanov A.V., Belyaev I.V. The effect of laser surface modification on the physico-mechanical and tribological properties of stamped steel. *Polzunovskii vestnik = Polzunovsky bulletin*. 2022;(4-2):14–18. (In Russ.)
9. Tesker E.I., Aseeva E.N., Solomatin A.V. Investigation of surface layer formation processes during laser processing of friction components made of structural steels. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Volgograd State Technical University*. 2018;(3):121–124. (In Russ.)
10. Kutepov S.N., Klementyev D.S., Spiridonova M.M. The influence of laser microstructuring parameters on the structural features of the laser impact zone of 30KHGSA steel parts. In: *Sovremennoe perspektivnoe razvitie nauki, tekhniki i tekhnologii: sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsi = Modern perspective development of science, technology and technology: collection of scientific articles of the 2nd international scientific and technical conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2024. P. 197–201. (In Russ.)
11. Kutepov S.N., Klementyev D.S., Spiridonova M.M. Ensuring the quality of the surface layer of parts made of 30KhGSA grade steel by laser microstructuring. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):18–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-18-33>.

12. Vedernikova I.I., Poletaev V.A. Hardening of working surfaces of machine parts by laser modification. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2008;(3):1–3. (In Russ.)
13. Ali E., Valeev I. A., Taya A. A. Methodology for studying the roughness and distribution of microhardness values of 40X13 steel surface after laser treatment using the example of a medical scalpel instrument. In: *Molodoi issledovatel' 2024: sbornik statei VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Young Researcher 2024: collection of articles of the VI International Scientific and Practical Conference*. Penza: Nauka i Prosveshchenie; 2024. P. 29-32. (In Russ.)
14. Novikov I.I. Theory of heat treatment of steel. 5th ed. Moscow: LENAND; 2021. 480 p. (In Russ.)
15. Grigoryants A.G., Kazaryan M.A., Lyabin N.A. Laser precision micro-processing of materials. Moscow: Fizmatlit; 2017. 416 p. (In Russ.)
16. Kutepov S.N., Klementyev D.S., Spiridonova M.M. Formation of qualitative indicators of the surface layer of machine parts by laser processing methods. *Fundamental'nye osnovy mekhaniki = Fundamental principles of Mechanics*. 2024;(14):141–146. (In Russ.)
17. Vereshchagin M.N., Tseluyeva S.N., Tseluyev M.Y. Modification of surface layers of metal parts by pulsed laser treatment. *Lit'e i metallurgiya = Casting and Metallurgy*. 2020;(1):99–109. (In Russ.)
18. Razin D.A., Pechnikov I.S., Frolov K.A., Liuchter A.B. Laser thermal hardening of gear wheels made of powder materials. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering research*. 2023;24(4):323-330. (In Russ.)
19. Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Kornienko O.Yu., Stepanov S.I. Induction and laser heat treatment of steel products. Yekaterinburg: Izd-vo Ural Feder. un-ta im pervogo Prezidenta Rossii B.N. Yeltsina; 2022. 92 p. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

Минаев Игорь Васильевич, кандидат технических наук, генеральный директор, Научно-производственное предприятие «Телар», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Igor V. Minaev, Candidate of Sciences (Engineering), General Director, Sciences and Production Enterprise "Telar", Tula, Russian Federation, e-mail: ivminaev1960@yandex.ru