**Оригинальная статья / Original article**

УДК 621.785:539.531:544.032.65
https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-18-33

CC BY 4.0

# Обеспечение качественных показателей поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА методом лазерного микроструктурирования

**С.Н. Кутепов[1]✉, Д.С. Клементьев[1], М.М. Спиридонова[1]**

[1]Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого
пр-т Ленина, д. 125, г. Тула 300026, Российская Федерация

✉ e-mail: kutepovsn@yandex.ru

## Резюме

***Целью*** *работы являлось изучение влияния режимов лазерного микроструктурирования на формирование качественных показателей (протяженность зоны лазерного воздействия, микротвердость) поверхностного слоя деталей, изготовленных из листовой горячекатаной стали марки 30ХГСА.*

***Методы.*** *В качестве объекта исследования была выбрана конструкционная среднелегированная сталь марки 30ХГСА в горячекатаном состоянии (лист толщиной 6 мм). Для исследования изменения структуры, строения и микротвердости зоны лазерного воздействия методом лазерной резки были изготовлены специальные образцы. После лазерной резки одну из сторон образца подвергли механическому фрезерованию с целью удаления слоя с измененной структурой получаемого в ходе лазерного раскроя материала. Далее с использованием непрерывного волоконного лазера проводили лазерное микроструктурирование поверхностей образцов. Для изучения влияния лазерного микроструктурирования на изменения структуры и качества поверхностного слоя проводили металлографические и дюрометрические исследования.*

***Результаты.*** *Рассмотрены особенности изменения микроструктуры зоны лазерного воздействия в зависимости от вида лазерной обработки. Показано, что вне зависимости от вида лазерной обработки на термоупрочненной поверхности образуется «белый слой», толщина которого зависит от параметров лазерного излучения: мощности, скорости, диаметра пятна, фокусного расстояния. Выявлено, что при использовании в качестве предварительной механической обработки поверхности кромки реза операции фрезерования в подавляющем большинстве случаев белый слой не образуется.*

***Заключение.*** *Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов с использованием высококонцентрированных потоков энергии.*

***Ключевые слова:*** *лазерная резка; лазерное микроструктурирование; зона лазерного воздействия; белый слой; микротвердость.*

***Финансирование:*** *Работа выполнена за счет средств внутреннего гранта в области научно-исследовательской деятельности ТГПУ им. Л.Н. Толстого по научному проекту «Формирование качественных характеристик на рабочих поверхностях деталей машин из конструкционных легированных сталей методом лазерного микроструктурирования» (договор № 6 НИР/24/07 от 11.07.2024 г.).*

***Конфликт интересов:*** *Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

***Для цитирования:*** 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

*Поступила в редакцию 18.09.2024* *Подписана в печать 17.10.2024* *Опубликована 13.12.2024*

© Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Спиридонова М.М., 2024

# Ensuring the quality indicators of the surface layer of parts made of 30KhGSA steel by laser microstructuring

**Sergey N. Kutepov[1]✉, Denis S. Klementyev[1], Maria M. Spiridonova[1]**

[1] Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125 Lenin Ave., Tula 300026, Russian Federation

✉ e-mail: kutepovsn@yandex.ru

## Abstract

***The purpose*** *of the work was to study the influence of laser microstructuring modes on the formation of qualitative indicators (the length of the laser exposure zone, microhardness) of the surface layer of parts made of hot-rolled sheet steel grade 30KhGSA.*

***Methods.*** *The structural medium-alloy steel of the 30KhGSA grade in the hot-rolled state (sheet 6 mm thick) was chosen as the object of research. Special samples were produced by laser cutting to study changes in the structure, structure and microhardness of the laser exposure zone. After laser cutting, one of the sides of the sample was subjected to mechanical milling in order to remove a layer with a modified structure of the material obtained during laser cutting. Next, laser microstructuring of the sample surfaces was performed using a continuous fiber laser. Metallographic and durometric studies were carried out to study the effect of laser microstructuring on changes in the structure and quality of the surface layer.*

***Results.*** *The peculiarities of changing the microstructure of the laser exposure zone depending on the type of laser treatment are considered. It is shown that, regardless of the type of laser treatment, a "white layer" is formed on the heat-strengthened surface, the thickness of which depends on the parameters of laser radiation: power, speed, spot diameter, focal length. It has been revealed that when milling operations are used as a preliminary mechanical treatment of the cutting edge surface, in the vast majority of cases a white layer is not formed.*

***Conclusion.*** *The results obtained can be used to create resource-saving material processing processes using highly concentrated energy flows.*

***Keywords:*** *laser cutting; laser microstructuring; laser exposure zone; white layer; microhardness.*

***Financing:*** *The work was carried out at the expense of an internal grant in the field of research activities of the Tolstoy TSPU for the scientific project: "Formation of qualitative characteristics on the working surfaces of machine parts made of structural alloy steels by laser microstructuring" (contract No. 6 NIR/24/07 dated 07/11/2024).*

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

***For citation*****:** Kutepov S.N., Klementyev D.S., Spiridonova M.M. Ensuring the quality indicators of the surface layer of parts made of 30KhGSA 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

*Received 18.09.2024* *Accepted 17.10.2024* *Published 13.12.2024*

***

## Введение

В процессе работы деталей в наиболее жестких эксплуатационных условиях находится их поверхностный слой, который подвергается воздействию различных нагрузок. От качества поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей во многом зависят качественные показатели изделия в целом [1]. Сочетание поверхностного слоя и остального объема материала, имеющих разные свойства, дает основания считать, что рабочая поверхность фактически представляет собой композит [1], одним из компонентов которого является поверхностный слой [2], включающий продукты окисления, нитриды, образующиеся после обработки или в результате трения, а также микродобавки легирующих элементов для получения заданных свойств.

Хорошо известно, что физико-химические свойства поверхности (механические, химические, оптические и др.) в значительной мере определяются ее микрогеометрией [3]. Практически нет ни одного эксплуатационного свойства деталей машин, которое в той или иной мере не зависело бы от шероховатости поверхности [4]. С этим связано стремление для деталей, испытывающих действие знакопеременных нагрузок, получать на финишных операциях их изготовления как можно более чистые рабочие поверхности [5].

Существуют три основные группы методов структурирования поверхностей, позволяющих изменить значения шероховатости [4]: 1) механические методы, включающие в себя финишную обработку резанием и пластическое деформирование поверхностного слоя детали давлением; 2) химические методы, основанные на обработке поверхности травлением; 3) термические методы – структурирование микрорельефа поверхности термическим воздействием.

Сравнительно новым методом формирования микрорельефа поверхности, который исследуется и применяется во всем мире в самых различных областях промышленности, является лазерная микрообработка [6]. Перспективно микроструктурирование поверхностей трения [7] и создание микрорельефа с заданным уровнем шероховатости [8]. Однако в большинстве работ рассматривается задача оптимизации конкретной поверхности для решения определенной проблемы. При этом решение каждой иной задачи требует проведения полного цикла трудоемких исследований [9]. Более перспективно установить универсальные закономерности формирования различных регулярных рельефов под действием лазерного излучения [10], что позволило бы значительно сократить период экспериментального формирования определенной микрогеометрии.

В связи с этим актуальной задачей для создания новых и совершенствования существующих технологий поверхностной структурирующей обработки является получение новых экспериментальных данных о формировании микроструктуры в процессе структурно-фазовых превращений в конструкционных легированных сталях в зависимости от исходных матричных структур, в том числе и близких к равновесным, а также формирующегося в процессе данной обработки микрорельефа. Необходимо также и установление корреляционных связей физико-механических и эксплуатационных свойств со структурным состоянием поверхностных слоев материалов после комбинированного термического упрочнения. Подобные исследования актуальны, т. к. позволяют расширить имеющие представления о взаимодействии лазерного излучения с железоуглеродистыми сплавами и разработать энергосберегающие режимы обработки, позволяющие получать поверхности, обладающие высокой износостойкостью и вместе с тем малой шероховатостью.

*Целью работы* являлось изучение влияния режимов лазерного микроструктурирования на формирование качественных показателей (протяженность зоны лазерного воздействия, микротвердость) поверхностного слоя деталей, изготовленных из листовой горячекатаной стали марки 30ХГСА.

## Материалы и методы

В качестве объекта исследования была выбрана конструкционная среднелегированная сталь марки 30ХГСА в горячекатаном состоянии (лист толщиной 6 мм). Для исследования изменения структуры, строения и микротвердости зоны лазерного воздействия методом лазерной резки были изготовлены специальные образцы (рис. 1). Лазерную резку осуществляли с применением волоконного непрерыв-

ного лазера, снабженного оптической головкой ЭИП1119, производства НТО «ИРЭ-Полюс» по следующему режиму: мощность 1100 Вт; скорость 200 мм/мин; давление вспомогательного газа (кислород) 0,9 атм; фокусное расстояние (+3,5 мм); диаметр сопла 1,5 мм, который был выбран на основе проведенной авторами работы оптимизации технологических режимов лазерной резки легированных сталей, учитывающей влияние толщины разрезаемого листа и углеродного эквивалента на качественные характеристики зоны газолазерного термического воздействия.

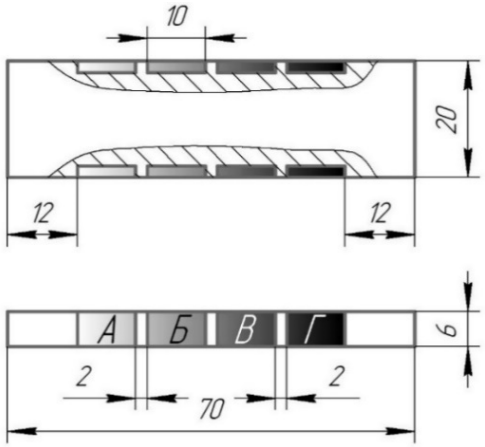



**Рис. 1.** Эскиз образца для исследования. Заливкой на образцах указаны области лазерного микроструктурирования

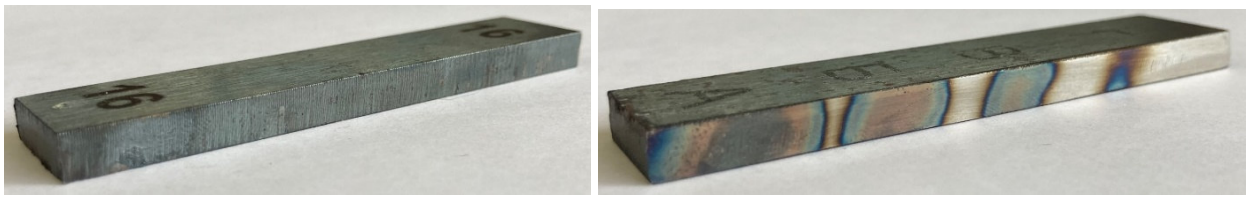
**Fig. 1.** Sketch of a sample for research. The areas of laser microstructuring are indicated by filling on the samples

После лазерной резки одну из рабочих поверхностей образца подвергли фрезерной обработке с целью удаления зоны с измененной структурой [8], получаемой в ходе газолазерного раскроя материала [11]. После этого рабочие поверхности образцов с использованием непрерывного волоконного лазера были подвергнуты лазерному микроструктурированию по режимам, представленным в таблице 1. Общий вид образца после лазерного микроструктурирования представлен на рисунке 2.

**Таблица 1.** Режимы лазерного микроструктурирования образцов

**Table 1.** Modes of laser microstructuring of samples

| Параметры лазерной обработки | Четные образцы | | | | Нечетные образцы | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Образец 12 | | | | Образец 13 | | | |
| Мощность, Вт | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 |
| Скорость подачи, мм/мин | 200 | 400 | 600 | 800 | 300 | 600 | 900 | 1200 |
| | Образец 14 | | | | Образец 15 | | | |
| Мощность, Вт | 1450 | 1450 | 1450 | 1450 | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 |
| Скорость подачи, мм/мин | 300 | 600 | 900 | 1200 | 200 | 400 | 600 | 800 |
| | Образец 16 | | | | Образец 17 | | | |
| Мощность, Вт | 1300 | 1300 | 1300 | 1300 | 1450 | 1450 | 1450 | 1450 |
| Скорость подачи, мм/мин | 300 | 600 | 900 | 1200 | 300 | 600 | 900 | 1200 |



а б

**Рис. 2.** Общий вид образца после лазерного микроструктурирования: а – сторона после лазерной резки; б – сторона после механического фрезерования

**Fig. 2.** General view of the sample after laser microstructuring: a – the side after laser cutting; б – the side after mechanical milling

Следует отметить, что используемый нами лазер не мог сразу набрать указанную выходную мощность, в связи с чем была выбрана траектория движения лазерного луча, представленная на рисунке 3. Из представленной на рисунке 3 схемы видно, что при соприкосновении лазерного луча с поверхностью образца нагрев осуществляется не только в зоне входа лазера, но также и в основной и выходной зонах. Однако только зона входа лазерного луча прогревается в недостаточной степени [12]. В этой связи в процессе лазерной обработки может наблюдаться неравномерное распределение температур [13] по обрабатываемой поверхности и, как следствие, различие по глубине [14] зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) во входной и выходной зонах. Поэтому исследование протяженности ЗЛВ проводили для двух вышеуказанных зон.

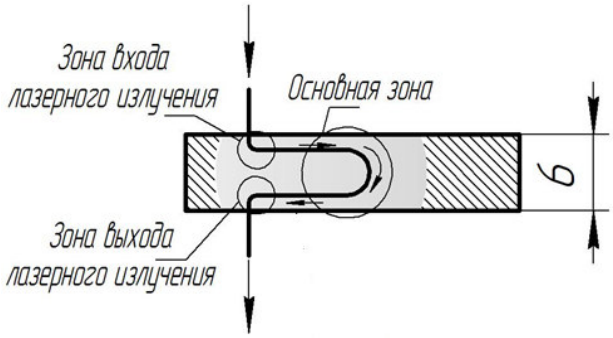



**Рис. 3.** Схема траектории движения лазерного луча в процессе лазерного микроструктурирования

**Fig. 3.** Diagram of the trajectory of the laser beam in the process of laser microstructuring

Микроструктуру основного металла образцов и зоны лазерного воздействия анализировали до и после травления водным раствором $CuSO_4 + HCl + H_2O$ на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ-1С» и электронном микроскопе JEOL JSM 6390 с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром BRUKER QUANTEX QX1 методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Микротвердость по Виккерсу определяли в ЗЛВ в соответствии с ГОСТ 2999-75 с помощью твердомера KBW1-V при нагрузке 0,1 Н (10 г) и выдержке под нагрузкой в течение 15 с. За протяженность ЗЛВ ($L$) принимали расстояние от рабочей (обработанной) поверхности до слоя с постоянным значением микротвердости.

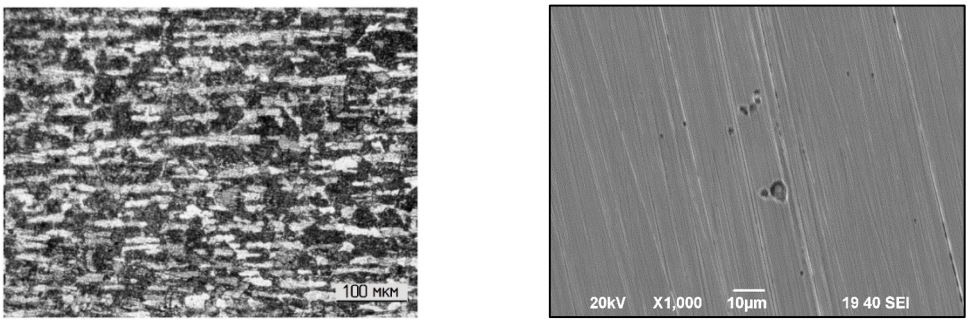
Измерение шероховатости (ГОСТ 2789-73) рабочей (обработанной) поверхности образцов исследуемых сталей проводили с целью определения количественной характеристики чистоты поверхности с использованием профилометра Time Group TR220.

## Результаты и их обсуждение

Микроструктурный анализ матрицы основного металла стали марки 30ХГСА в горячекатаном состоянии не позволил выявить в структуре трещин, несплошностей, крупных посторонних включений. В то же время в нетравленом состоянии на плоскости шлифа наблюдаются неметаллические включения сульфидного характера (рис. 4, б) размером до 10 мкм.

Полуколичественный химический анализ, проведенный с использованием РЭМ, определил эти включения, как включения комплексного состава, мас. %: S ~17,0; Fe ~57,0; Al ~1,3; Mn ~16,6; Ca ~5,5; Cr ~1,3; Si ~0,74.

Микроструктура на основной плоскости шлифа представляет собой перлит пластинчатый + феррит (рис. 4, а). Полосчатость балл 4 ряд В – равномерное чередование ферритных и перлитных полос, состоящих из равноосных и деформированных зерен.




а б

**Рис. 4.** Микроструктура матрицы (а) основного металла стали марки 30ХГСА (травлено, ×200) и неметаллические включения сульфидного характера (б) в матрице основного металла (нетравлено (РЭМ), ×1000)

**Fig. 4.** The microstructure of the matrix (a) of the base metal of steel grade 30KhGSA (etched, ×200) and non-metallic inclusions of a sulfide nature (б) in the matrix of the base metal (not etched (SEM), ×1000)

При мощности лазерного излучения 1300 и 1450 Вт структура ЗЛВ (со стороны после лазерной резки) имеет следующее строение (рис. 5): первым слоем является нетравящийся белый слой; затем следует зона термического влияния (ЗТВ) [15], которая, в свою очередь, состоит из зоны закалки из твердой фазы и последующей переходной зоны.

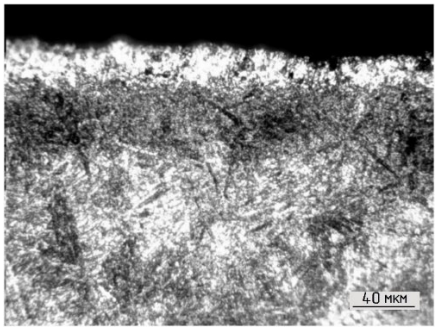
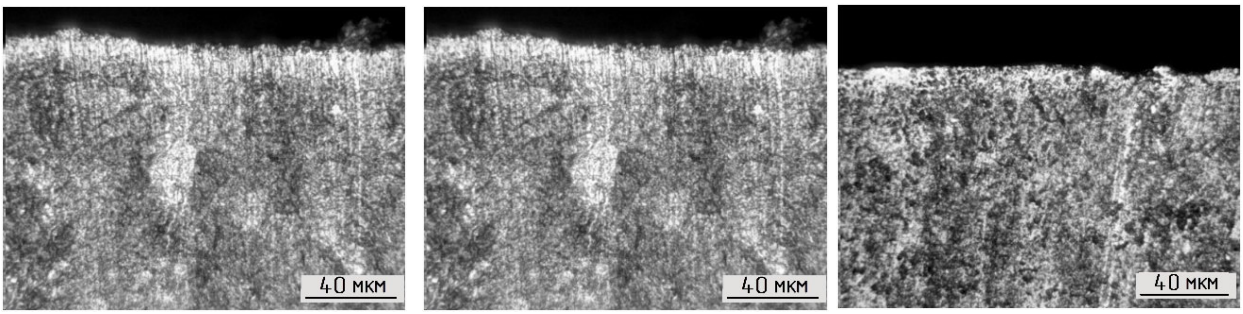



**Рис. 5.** Микроструктура ЗЛВ (травлено, ×500) в стали марки 30ХГСА после лазерного микроструктурирования по режиму: мощность 1300 Вт; скорость 300 мм/мин

**Fig. 5.** Microstructure of ZLV (etched, ×500) in steel grade 30KhGSA after laser microstructuring according to the mode: power 1300 W; speed 300 mm/min

Рассмотрим влияние режимных параметров (мощности, скорости) лазерного микроструктурирования на особенности формирования ЗЛВ, ее отдельных составляющих и изменение микротвердости.

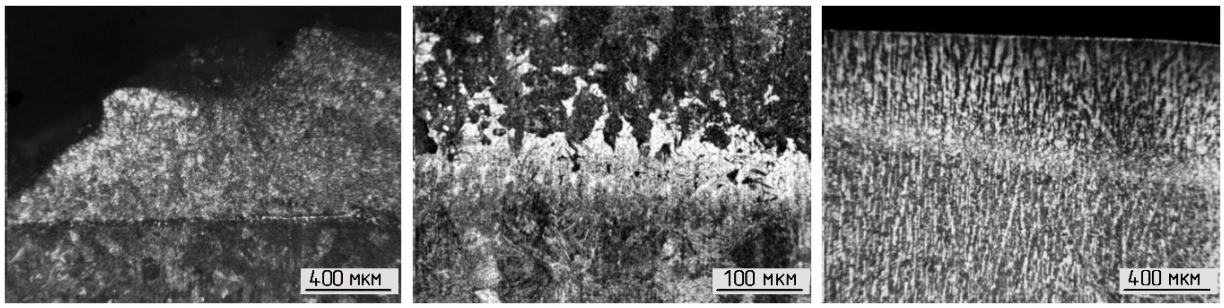
Металлографические исследования позволили установить, что после повторной лазерной обработки белый слой преимущественно имеет мартенситную структуру (рис. 6), а также карбиды. В ряде случаев белый слой имел ферритную, мартенситную, перлитно-мартенситную структуру (рис. 7). Карбиды в подобных структурах отсутствовали.




а б в

**Рис. 6.** Микроструктура ЗЛВ в стали марки 30ХГСА после повторной лазерной обработки (травлено, ×500) по режимам: а – мощность 1300 Вт, скорость 600 мм/мин; б – мощность 1300 Вт, скорость 900 мм/мин; в – мощность 1450 Вт, скорость 600 мм/мин

**Fig. 6.** The microstructure of ZLV in steel grade 30KhGSA after repeated laser treatment (etched, ×500) according to the modes: a – power 1300 W, speed 600 mm/min; б – power 1300 W, speed 900 mm/min; в – power 1450 W, speed 600 mm/min

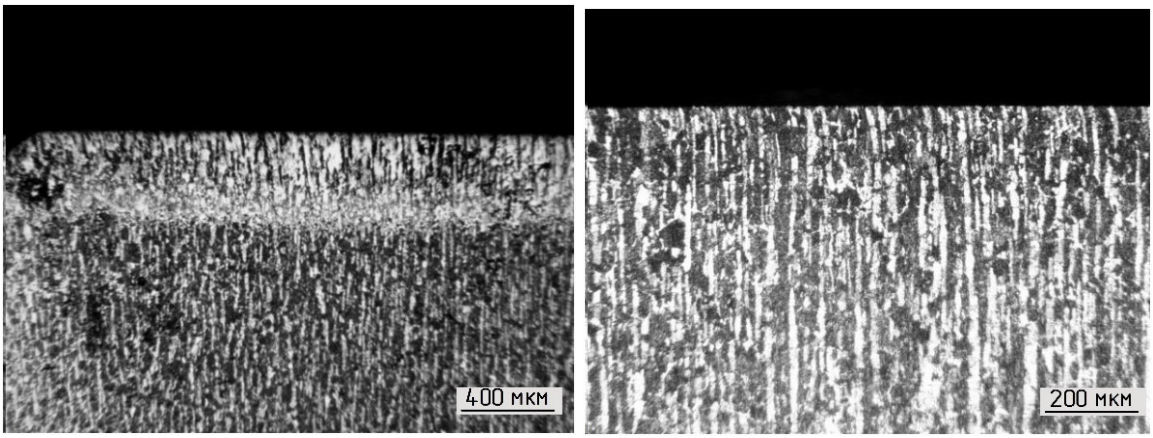



а б в

**Рис. 7.** Микроструктура ЗЛВ в стали марки 30ХГСА после повторной лазерной обработки (травлено): а – феррит (окалина), ×50; б – перлит + мартенсит, ×200; в – мартенсит, ×50

**Fig. 7.** The microstructure of ZLV in steel grade 30KhGSA after repeated laser treatment (etched): a – ferrite (scale), ×50; б – perlite + martensite, ×200; в – martensite, ×50

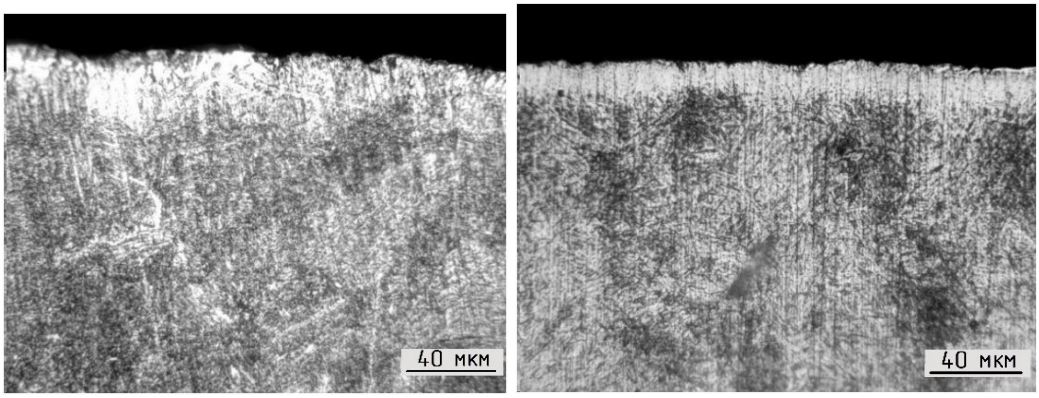
В случае лазерного микроструктурирования поверхностей, предварительно подвергнутых механической обработке фрезерованием, в подавляющем большинстве случаев белого слоя не обнаруживается (рис. 8, а), а в ряде случаев обработка прошла без изменений структурных составляющих (соответственно отсутствовали зона закалки из твердой фазы и переходная зона (рис. 8, б)). В имеющихся единичных случаях структура белого слоя представляет собой мартенсит, мартенсит и карбиды, троостомартенсит (рис. 9).




а б

**Рис. 8.** Микроструктура ЗЛВ в стали марки 30ХГСА после лазерного микроструктурирования предварительно фрезерованной поверхности (травлено): а – с изменением структурных составляющих, ×50; б – без изменения структурных составляющих, ×100

**Fig. 8.** The microstructure of ZLV in steel grade 30KhGSA after laser microstructuring of a pre-milled surface (etched): a – with a change in structural components, ×50; б – without a change in structural components, ×100



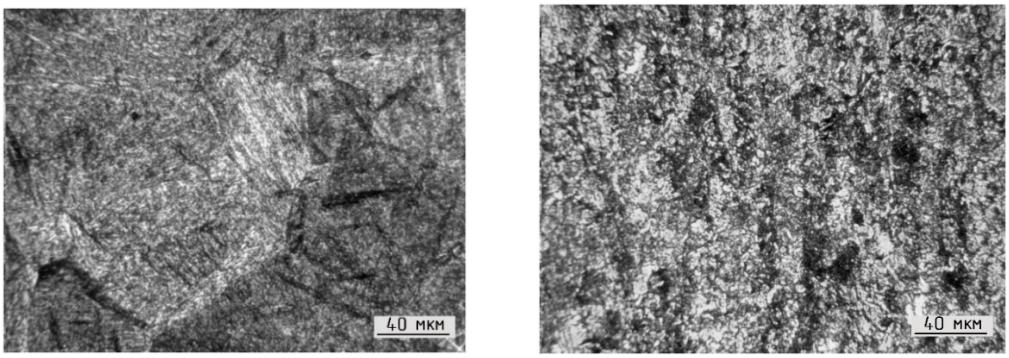

а б

**Рис. 9.** Микроструктура ЗЛВ в стали марки 30ХГСА после лазерной обработки предварительно фрезерованной поверхности (травлено): а – троостомартенсит, ×200; б – мартенсит, ×500

**Fig. 9.** The microstructure of ZLV in steel grade 30KhGSA after laser treatment of a pre-milled surface (etched): a – troostomartensite, ×200; б – martensite, ×500

Структура зоны закалки из твердой фазы образцов после повторной лазерной обработки представляла собой преимущественно мелкоигольчатый мартенсит, мартенсит + карбиды, а предварительно фрезерованных образцов – смесь мартенсита и пластинчатого перлита. В отдельных случаях наблюдали структуры грубоигольчатого мартенсита (рис. 10, а), который по мере удаления от поверхности переходит в смесь крупноигольчатого мартенсита с пластинчатым перлитом.

Переходная зона для всех режимов обработки, в которых было обнаружено изменение структуры, представляла собой либо перлит сорбитообразный + перлит пластинчатый + сорбит + карбидная сетка (рис. 10, б), либо перлит сорбитообразный + перлит пластинчатый + карбидная сетка.




а б

**Рис. 10.** Структура грубоигольчатого мартенсита (а) в ЗЛВ (травлено, ×500) и микроструктура переходной зоны (б) (травлено, ×500) стали марки 30ХГСА

**Fig. 10.** The structure of coarse-needle martensite (a) in ZLV (etched, ×500) and the microstructure of the transition zone (b) (etched, ×500) steel grade 30KhGSA

Далее с использованием дюрометрического анализа исследовали микротвердость образцов в ЗЛВ. Результаты замеров микротвердости по слоям представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Микротвердость ЗЛВ в стали марки 30ХГСА после лазерного микроструктурирования по различным режимам

**Table 2.** The microhardness of ZLV in steel grade 30KhGSA after laser microstructuring according to various modes

| Номер образца | Рабочая поверхность | Микротвердость, HV0,1 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | белый слой | зона закалки | переходная зона |
| 12 | После ЛР | 527–702 | 347–628 | 257–338 |
| | После МФ | 564–605 | 263–564 | 210–282 |
| 13 | После ЛР | 510–824 | 399–605 | 200–377 |
| | После МФ | 605–824 | 387–605 | 206–329 |
| 14 | После ЛР | 480–628 | 312–450 | 234–297 |
| | После МФ | 449–464 | 320–464 | 206–260 |
| 15 | После ЛР | 402–859 | 304–527 | 215ч282 |
| | После МФ | – | 312–449 | 220ч260 |
| 16 | После ЛР | 730–897 | 210–651 | 234ч338 |
| | После МФ | – | 326–494 | 263 |
| 17 | После ЛР | 730 | 297–628 | 210–269 |
| | После МФ | – | 356–494 | 210ч240 |

*Примечание.* ЛР – лазерная резка; МФ – механическое фрезерование.

Из анализа экспериментальных результатов (см. табл. 2) видно, что по максимальным значениям микротвердости белого слоя все образцы вне зависимости от начального состояния поверхности примерно одинаковы. Однако по минимальным значениям микротвердости в большинстве случаев образцы, подвергнутые предварительной механической обработке, превосходят образцы, подвергнутые повторному лазерному облучению.

В зоне закалки из твердой фазы максимальные значения микротвердости образцов в зависимости от исходного состояния поверхности имеют существенное различие. По минимальным значениям

различие в значениях микротвердости зоны закалки из твердой фазы аналогично изменению в белом слое.

В переходной зоне существенных различий между соответствующими значениями микротвердости в зависимости от состояния исходной поверхности и мощности лазерного излучения не обнаружено. По сравнению с основным металлом (лист толщиной 6 мм) микротвердость белого слоя после повторной лазерной обработки увеличивается в 2,2–4 раза, зоны закалки из твердой фазы – в 1,3–2,8 раза, переходной зоны – в 1,1–1,5 раза. Аналогичные результаты увеличения микротвердости по слоям для поверхности, предварительно подвергнутой механической обработке, составляют для белого слоя – 2,5–3,6 раза, зоны закалки из твердой фазы – в 1,1–2,6 раза, переходной зоны – в 1,1–1,2 раза.

Далее анализировали влияние режимов лазерного микроструктурирования на протяженность ЗЛВ (табл. 3 и 4).

**Таблица 3.** Протяженность ЗЛВ после лазерного микроструктурирования со стороны лазерной резки

**Table 3.** The length of the ZLV after laser microstructuring from the laser cutting side

| Номер образца | Мощность, Вт / скорость, мм/мин | Протяженность ЗЛВ, мкм | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Общая | | БС | | Зона закалки | | ПЗ |
| | | Вх.Л | Вых.Л | Вх.Л | Вых.Л | Вх.Л | Вых.Л | |
| 12 | 1300/200* | 4600 | 5400 | 600 | 1200 | 2800 | 4200 | 612 |
| | 1300/400 | 1630 | 1840 | 15 | 20 | 1350 | 1600 | 306 |
| | 1300/600 | 820 | 1220 | 10 | 14 | 550 | 940 | 200 |
| | 1300/800 | 140 | 710 | 15 | 20 | 100 | 660 | 50 |
| 13 | 1300/300 | 2080 | 2960 | 25 | 160 | 1830 | 2040 | 306 |
| | 1300/600 | 1080 | 1470 | 20 | 25 | 860 | 1300 | 250 |
| | 1300/900 | 200 | 816 | 12 | 15 | 160 | 714 | 80 |
| | 1300/1200 | 80 | 450 | 8 | 12 | 50 | 420 | 30 |
| 14 | 1450/300 | 2860 | 3160 | 570; окалина 40 | 160; окалина 50 | 2140 | 2500 | 410 |
| | 1450/600 | 1160 | 1530 | 22 | 30 | 960 | 1300 | 200 |
| | 1450/900 | 180 | 920 | 10 | 20 | 80 | 820 | 100 |
| | 1450/1200 | 60 | 450 | 8 | 15 | 10 | 400 | 50 |
| 15 | 1300/200 | 2180 | 2550 | 25 | 40 | 1800 | 220 | 350 |
| | 1300/400 | 1140 | 1450 | 20 | 30 | 860 | 1170 | 250 |
| | 1300/600 | 350 | 760 | 12 | 25 | 90 | 480 | 250 |
| | 1300/800 | 220 | 550 | 8 (прерыв.) | 20 (прерыв.) | 60 | 380 | 150 |
| 16 | 1300/300 | 1020 | 900 | 30 | 20 | 690 | 580 | 300 |
| | 1300/600 | 160 | 930 | 6 | 15 | 80 | 310 | 80 |
| | 1300/900 | 100 | 260 | 5 (прерыв.) | 15 (прерыв.) | 95 | 245 | НО |
| | 1300/1200 | 100 | 240 | Ширина 8 мкм | | 100 | 240 | НО |
| 17 | 1450/300 | 1326 | 1326 | Незначительные участки | | 1000 | 1000 | 330 |
| | 1450/600 | 670 | 670 | 15 | 15 | 450 | 450 | 200 |
| | 1450/900 | 180 | 306 | 10 | 10 | 70 | 195 | 100 |
| | 1450/1200 | 100 | 260 | НО | | 40 | 20 | 60 |

*Примечание.* ЛО – лазерная обработка; Вх.Л – зона входа лазерного луча; Вых.Л – зона выхода лазерного луча; *в числителе представлена мощность обработки, а в знаменателе – скорость; прерыв. – прерывистый белый слой; НО – слой не обнаружен; БС – белый слой; ПЗ – переходная зона.

**Таблица 4.** Протяженность ЗЛВ после лазерного микроструктурирования со стороны механической обработки

**Table 4.** The length of the ZLV after laser microstructuring by mechanical processing

| Номер образца | Мощность, Вт / скорость, мм/мин | Протяженность ЗЛВ, мкм | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Общая | | БС | | Зона закалки | | ПЗ |
| | | Вх.Л | Вых.Л | Вх.Л | Вых.Л | Вх.Л | Вых.Л | |
| 12 | 1300/200* | 2750 | 2860 | 140 | 570 | 2240 | 2450 | 400 |
| | 1300/400 | 1330 | 1940 | прерыв. | – | 1180 | 1630 | 200 |
| | 1300/600 | 730 | 1330 | 13 | 18 | 470 | 1100 | 200 |
| | 1300/800 | 80 | 530 | НО | | 30 | 500 | 30 |
| 13 | 1300/300 | 1510 | 2240 | 12 | 35 | 1350 | 2040 | 235 |
| | 1300/600 | 410 | 1140 | прерыв. | НО | 200 | 910 | 230 |
| | 1300/900 | 80 | 330 | НО | | 50 | 300 | 30 |
| | 1300/1200 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |
| 14 | 1450/300 | 1500 | 1300 | 30 | 15 | 1225 | 1040 | 245 |
| | 1450/600 | 800 | 200 | НО | | 640 | 40 | 160 |
| | 1450/900 | 430 | 310 | НО | | 310 | 190 | 120 |
| | 1450/1200 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |
| 15 | 1300/200 | 1590 | 1920 | НО | | 1230 | 1545 | 350 |
| | 1300/400 | 800 | 1200 | НО | | 550 | 950 | 250 |
| | 1300/600 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |
| | 1300/800 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |
| 16 | 1300/300 | 80–300 в центральной части в виде дуги (без зон входа и выхода) | | НО | | 60 | 200 | 263 |
| | 1300/600 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |
| | 1300/900 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |
| | 1300/1200 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |
| 17 | 1450/300 | 1500 | 1060 | НО | | 1260 | 820 | 240 |
| | 1450/600 | Незначительное изменение структуры в центральной части | | | | | | |
| | 1450/900 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |
| | 1450/1200 | Изменений структуры не обнаружено | | | | | | |

*Примечание.* ЛО – лазерная обработка; Вх.Л – зона входа лазерного луча; Вых.Л – зона выхода лазерного луча; *в числителе представлена мощность обработки, а в знаменателе – скорость; прерыв. – прерывистый белый слой; НО – слой не обнаружен; БС – белый слой; ПЗ – переходная зона.

Из анализа полученных результатов видно, что с увеличением скорости лазерного микроструктурирования как общая протяженность ЗЛВ, так и протяженность ее составляющих уменьшается. Данное обстоятельство обусловлено тем фактом, что при увеличении скорости обработки поверхность не успевает прокалиться на достаточную глубину [16]. Также стоит отметить, что в подавляющем большинстве случаев имеются значительные различия в протяженности ЗЛВ на входе и выходе лазерного луча, что, как было отмечено выше, может быть обусловлено неравномерностью распределения температур в указанных зонах [17].

Далее анализировали влияние лазерного микроструктурирования на изменение шероховатости поверхности. Из анализа экспериментальных результатов (рис. 11) видно, что дополнительное лазерное микроструктурирование поверхности реза позволяет в 4–7 раз снизить ее шероховатость.

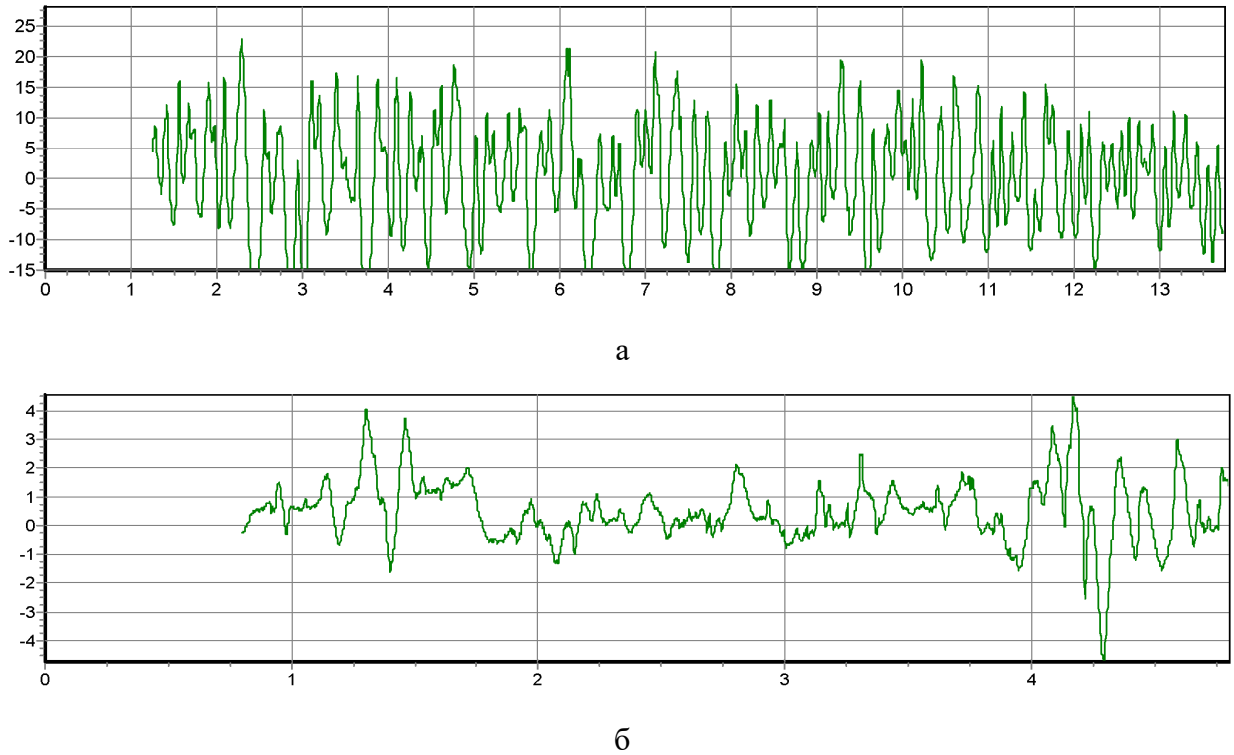



**Рис. 11.** Графики изменения шероховатости ЗЛВ стали марки 30ХГСА: а – после лазерной резки; б – после лазерного микроструктурирования

**Fig. 11.** Graphs of changes in the roughness of the laser impact zone of 30KhGSA steel: a – after laser cutting; б – after laser microstructuring

Таким образом, на основании вышеприведенных результатов можно утверждать, что лазерное микроструктурирование [18] является эффективным инструментом повышения качественных характеристик поверхностного слоя [19], позволяющим получать изделия из конструкционных сталей по своим свойствам, не уступающие изделиям, изготовленным с применением традиционных технологий термической обработки [20].

## Выводы

1. Рассмотрены особенности изменения микроструктуры зоны лазерного воздействия в зависимости от вида лазерной обработки (резка, микроструктурирование, комбинированное воздействие). Показано, что вне зависимости от вида лазерной обработки (лазерная резка, лазерное микроструктурирование, лазерная резка + лазерное микроструктурирование) на термоупрочненной поверхности образуется «белый слой», толщина которого зависит от параметров лазерного излучения: мощности, скорости, диаметра пятна, фокусного расстояния. Выявлено, что при использовании в качестве предварительной механической обработки поверхности кромки реза операции фрезерования в подавляющем большинстве случаев белый слой не образуется.

2. Выявлены закономерности изменения микротвердости образцов после лазерной обработки. Показано, что по срав-

нению с основным металлом микротвердость белого слоя после повторной лазерной обработки увеличивается в 2,2–4 раза, зоны закалки из твердой фазы – в 1,3–2,8 раза, переходной зоны – в 1,1–1,5 раза. Аналогичные результаты увеличения микротвердости по слоям для поверхности, предварительно подвергнутой механической обработке, составляют для белого слоя – 2,5–3,6 раза, зоны закалки из твердой фазы – 1,1–2,6 раза, переходной зоны – 1,1–1,2 раза.

3. Полученные в работе результаты позволяют рекомендовать использовать технологию лазерного микроструктурирования поверхности в качестве финишной операции при изготовлении деталей из конструкционных легированных сталей методом лазерной резки, а также могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов упрочнения конструкционных легированных сталей с использованием высококонцентрированных потоков энергии.

4. Установлено, что протяженность зоны лазерного воздействия зависит от скорости обработки: при низких скоростях (200–400 мм/мин) наблюдаются высокие значения протяженности порядка 1,1–2,9 мм; при скоростях свыше 600 мм/мин наблюдается резкое снижение протяженности до значений 0,08–0,7 мм. В случае лазерного микроструктурирования предварительно фрезерованной поверхности на больших скоростях (600–1200 мм/мин) зона лазерного воздействия отсутствует, что может быть связано с тем фактом, что металл не успевает прокалиться на достаточную глубину, а также с меньшей поглощательной способностью материала по сравнению с использованием в качестве предварительной обработки операции шлифования.

## Список литературы

1. Клепиков В.В., Порошин В.В., Голов В.А. Качество изделий. 2-е изд., доп. и перераб. М.: МГИУ, 2006. 252 с.

2. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение-1, 2005. 226 с.

3. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным рельефом. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 59 с.

4. Вейко В.П., Дышловенко С.С. Лазерное микроструктурирование поверхностей // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета). 2001. № 4. С. 119–128.

5. Родионов И.В. Анализ структуры поверхностного слоя, его качества и влияния на эксплуатационные свойства деталей // Современные материалы, техника и технологии. 2020. № 3 (30). С. 42–47.

6. Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера / О.С. Васильев, В.П. Вейко, С.Г. Горный, Ю.С. Рузанкина // Оптический журнал. 2015. Т. 82, № 12. С. 70–77.

7. Югов В.И., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Особенности формирования структуры и микрогеометрии поверхности лазерных наплавок с использованием многоканального $CO_2$-лазера // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 11 (143). С. 19–22.

8. Формирование упрочненного поверхностного слоя при комплексном лазерном воздействии на кромку реза деталей из конструкционных углеродистых сталей / И.В. Минаев, С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, Е.В. Агеев, Д.В. Журба // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 2. С. 55–69. https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-55-69.

9. Medres B.S., Bamberger M. Laser texturing of friction surfaces // Lasers in Engineering. 2008. Vol. 18. P. 137–144.

10. Шастин В.И., Каргапольцев С.К. Лазерное модифицирование сопрягаемых поверхностей трения // Вестник СамГУПС. 2016. № 3 (33). С. 27–33.

11. Влияние режимов лазерной обработки на изменение структуры и механических свойств поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА / И.В. Минаев, С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 1. С. 73–86. https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-73-86.

12. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, силовая оптика / В.П. Вейко, М.Н. Либенсон, Г.Г. Червяков, Е.Б. Яковлев. М.: Физматлит, 2008. 312 с.

13. Ведерникова И.И., Полетаев В.А. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин лазерным модифицированием // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. Вып. 3. С. 1–3.

14. Алисин В.В. Влияние лазерной обработки на качество поверхности черных металлов // Фундаментальные основы механики. 2022. № 10. С. 24–27.

15. Влияние режимов обработки лазерным лучом на параметры зон термического воздействия и триботехнические характеристики сталей / А.А. Якубовский, В.П. Бирюков, А.Н. Принц, А.П. Савин // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2021): труды конференции. М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2021. С. 264–270.

16. Индукционная и лазерная термическая обработка стальных изделий / М.В. Майсурадзе, М.А. Рыжков, О.Ю. Корниенко, С.И. Степанов. Екатеринбург: Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. 92 с.

17. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / В.С. Коваленко, А.Д. Верхотуров, Л.Ф. Головко, И.А. Подчерняева. М.: Наука, 1986. 276 с.

18. 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.

19. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. М.: Физматлит, 2017. 416 с.

20. 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.

## Reference

1. Klepikov V.V., Poroshin V.V., Golov V.A. Product quality. 2nd ed. Moscow: MGIU; 2006. 252 p. (In Russ.)

2. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Creep and relaxation of residual stresses in reinforced structures. Moscow: Mashinostroenie-1; 2005. 226 p. (In Russ.)

3. Schneider Yu.G. Operational properties of parts with regular relief. Leningrad: Mashinostroenie, Lening. otd-nie; 1982. 59 p. (In Russ.)

4. Veiko V.P., Dyshlovenko S.S. Laser microstructuring of surfaces. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo instituta tochnoi mekhaniki i optiki (tekhnicheskogo universiteta) = Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State Institute of Precision Mechanics and Optics (Technical University).* 2001;(4):119–128. (In Russ.)

5. Rodionov I.V. Analysis of the structure of the surface layer, its quality and influence on the operational properties of parts. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii = Modern materials, equipment and technologies*. 2020;(3):42–47. (In Russ.)

6. Vasiliev O.S., Veiko V.P., Gorny S.G., Ruzankina Yu.S. Laser installation for microstructuring a metal surface using a fiber laser. *Opticheskii zhurnal = Optical Journal*. 2015;82(12):70–77. (In Russ.)

7. Yugov V.I., Afanasyeva L.E., Novoselova M.V. Features of the formation of the structure and microgeometry of the surface of laser surfacing using a multichannel $CO_2$ laser. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2016;(11):19–22. (In Russ.)

8. Minaev I.V., Kutepov S.N., Klementyev D.S., Ageev E.V., Zhurba D.V. Formation of a hardened surface layer under complex laser action on the cutting edge of parts made of structural Carbon steels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2023;13(2):55–69. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-55-69

9. Medres B.S., Bamberger M. Laser texturing of friction surfaces. *Lasers in Engineering*. 2008;18:137–144.

10. Shastin V.I., Kargapoltsev S.K. Laser modification of mating friction surfaces. Vestnik of SamGUPS. 2016;(3):27–33. (In Russ.)

11. Minaev I.V., Kutepov S.N., Klementyev D.S., Ageev E.V. The influence of laser processing modes on changes in the structure and mechanical properties of the surface layer of parts made of 30KhGSA steel. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2023;13(1):73–86. (In Russ.) https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-73-86

12. Veiko V.P., Libenson M.N., Chervyakov G.G., Yakovlev E.B. Interaction of laser radiation with matter, power optics. Moscow: Fizmatlit; 2008. 312 p. (In Russ.)

13. 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 Energy University*. 2008;(3):1–3. (In Russ.)

14. Alisin V.V. Influence of laser treatment on the surface quality of ferrous metals. *Fundamental'nye osnovy mekhaniki = Fundamental principles of Mechanics*. 2022;(10):24–27. (In Russ.)

15. Yakubovsky A.A., Biryukov V.P., Prince A.N., Savin A.P. The influence of laser beam treatment modes on the parameters of thermal impact zones and tribotechnical characteristics of steels. In: *XXXIII Mezhdunarodnaya innovatsionnaya konferentsiya molodykh uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS-2021): trudy konferentsii = XXXIII International innovative conference of young scientists and students on problems of machine science (MICMUS-2021)*. Moscow: Institut machinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN; 2021. P. 264–270. (In Russ.)

16. Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Kornienko O.Yu., Stepanov S.I. Induction and laser heat treatment of steel product. Yekaterinburg: Izd-vo Ural fed. univ. im. pervogo Presidenta Rossii B.N. Yeltsina; 2022. 92 p. (In Russ.)

17. Kovalenko V.S., Verkhoturov A.D., Golovko L.F., Podchernyaeva I. A. Laser and electroerosive hardening of materials. Moscow: Nauka; 1986. 276 p. (In Russ.)

18. Tesker E.I., Aseeva E.N., Solomatin A.V. Investigation of the processes of formation of surface layers during laser processing of parts of friction units made of structural steels. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of the Volgograd State Technical University*. 2018;(3):121–124. (In Russ.)

19. Grigoryants A.G., Kazaryan M.A., Lyabin N.A. Laser precision microprocessing of materials. Moscow: Fizmatlit; 2017. 416 p. (In Russ.)

20. 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.)

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Кутепов Сергей Николаевич,** кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, г. Тула, пр. Ленина, Российская Федерация,
e-mail: kutepovsn@yandex.ru

**Клементьев Денис Сергеевич,** старший преподаватель кафедры технологии и сервиса, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

**Спиридонова Мария Максимовна,** студент, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, г. Тула, Российская Федерация,
e-mail: mariaspiridonowa10@yandex.ru

**Sergei N. Kutepov,** Candidate of Sciences (Pedagogical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation,
e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

**Denis S. Klementyev,** Senior Lecturer of the Department of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation,
e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

**Maria M. Spiridonova,** Student, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation,
e-mail: mariaspiridonowa10@yandex.ru