

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-55-69>



Формирование упрочненного поверхностного слоя при комплексном лазерном воздействии на кромку реза деталей из конструкционных углеродистых сталей

И. В. Минаев¹, С. Н. Кутепов², Д. С. Клементьев², Е. В. Агеев³ ✉, Д. В. Журба⁴

¹ ООО Научно-производственное предприятие «Телар»
Городской переулок, д. 39, г. Тула 300026, Российская Федерация

² Тульский государственный педагогический университет имени Л. Н. Толстого
пр. Ленина, д. 125, г. Тула 30026, Российская Федерация

³ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

⁴ Национальный исследовательский университет ИТМО
пр. Кронверкский, д. 49, литер А, г. Санкт-Петербург 197101, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Целью работы являлось изучение влияния режимов лазерного модифицирования кромки реза на изменение структуры и механических свойств поверхностного слоя деталей, изготовленных из горячекатаных конструкционных углеродистых сталей марок 20, 35, 45.

Методы. В качестве объектов исследования были выбраны конструкционные углеродистые стали марок 20, 35, 45. Для исследования влияния лазерного модифицирования на изменение структуры и механических свойств деталей машин с использованием лазерной резки были изготовлены специальные образцы в виде пластин толщиной 2 мм (ст20 и ст45) и 4 мм (ст35). После газолазерной резки проводили лазерное модифицирование кромки реза Q-switch волоконным импульсным лазером.

Результаты. Выявлены закономерности изменения структуры зоны газолазерного термического воздействия после лазерной обработки (резка, модифицирование). Установлено, что повторная обработка лазером (лазерное модифицирование) кромки реза не приводит к изменению структурных составляющих и микротвердости в зоне газолазерного термического воздействия, полученных после лазерной резки. Установлено, что характер изменения микротвердости у всех исследованных марок сталей одинаков: наибольшие значения достигаются около поверхности газолазерной обработки и составляют, например, для стали марки 35 470–560 HV, что в 3,2–3,9 раза больше исходной микротвердости (145 HV). Таким образом, на поверхности детали после лазерной обработки формируется упрочненный слой, обладающий повышенной износостойкостью. Показано, что применение лазерного модифицирования поверхности в качестве дополнительной операции при изготовлении деталей методом лазерной резки позволяет улучшить качество (шероховатость) поверхностного слоя. При этом наибольший эффект снижения шероховатости дает лазерное модифицирование в три прохода по плоскости X-Y.

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

Ключевые слова: лазерная резка; лазерное модифицирование; термическое воздействие; микротвердость; шероховатость.

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

Для цитирования: 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>.

Поступила в редакцию 10.03.2023

Подписана в печать 12.04.2023

Опубликована 30.05.2023

Formation of A Hardened Surface Layer Under Complex Laser Action on the Cutting Edge of Parts Made of Structural Carbon Steels

Igor V. Minaev¹, Sergey N. Kutepov¹, Denis S. Klementyev¹,
Evgeny V. Ageev² ✉, Danila V. Zhurba⁴

¹ OOO Scientific and production enterprise "Telar"
39 Gorodskoi Lane, Tula 300026, Russian Federation

² Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University
125 Lenin Ave., Tula 30026, Russian Federation

³ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

⁴ ITMO National Research University
49 Kronverksky Ave., lit. A, St. Petersburg 197101, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

The purpose of the work was to study the effect of laser modification of the cutting edge on changes in the structure and mechanical properties of the surface layer of parts made of hot-rolled structural carbon steels of grades 20, 35, 45 using a fiber laser.

Methods. Structural carbon steels of grades 20, 35, 45 were selected as the objects of the study. To study the effect of laser modification on changes in the structure and mechanical properties of machine parts using laser cutting, special samples were made in the form of plates with a thickness of 2 mm (st20 and st45) and 4 mm (st35). After gas laser cutting, laser modification of the Q-switch cutting edge was performed with a fiber pulsed laser.

Results. The regularities of changes in the structure of the zone of gas-laser thermal exposure after laser treatment (cutting, modification) are revealed. It has been established that repeated laser treatment (laser modification) of the cutting edge does not lead to a change in the structural components and microhardness in the zone of gas-laser thermal effects obtained after laser cutting. It has been established that the nature of the microhardness change is the same for all the studied steel grades: the highest values are reached near the surface of gas-laser treatment and are, for example, for steel grade 35 470-560 HV, which is 3,2-3,9 times greater than the initial microhardness (145 HV). Thus, a hardened layer with increased wear resistance is formed on the surface of the part after laser treatment. It is shown that the use of laser surface modification as an additional operation in the manufacture of parts by laser cutting makes it possible to improve the quality (roughness) of the surface layer. At the same time, the greatest effect of reducing roughness is given by laser modification in three passes along the X-Y plane.

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

Keywords: laser cutting; laser modification; thermal impact; microhardness; roughness.

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

For citation: 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/10.21869/2223-1528-2022-13-2-55-69>

Received 10.03.2023

Accepted 12.04.2023

Published 30.05.2023

Введение

К числу перспективных технологических процессов разделения металлических материалов следует отнести газолазерную резку металлических сплавов, основанную на процессах нагрева, расплавления материала, химических реакциях горения, испарения, вымывания и удаления расплава и продуктов разрушения зоны резки, остывания и перекристаллизации материала после окончательного лазерного воздействия [1; 2]. Высокая скорость нагрева металла при лазерной резке с последующим еще более скоростным охлаждением приводит к созданию напряженного состояния поверхностных слоев кромок реза деталей машин. При этом одной из актуальных задач современного металловедения является задача исследования структуры и свойств металлических сплавов при воздействии на них лазерным излучением, поэтому выявление особенностей изменения структуры и свойств углеродистых сталей при газолазерной резке с последующим модифицированием кромки реза позволяет установить закономерности поведения металлических сплавов в экстремальных условиях и разрабатывать на этой основе новые ресурсосберегающие способы обработки.

Главные достоинства технологии лазерного модифицирования (наряду с общими достоинствами лазерных технологий обработки материалов): локальность обработки, возможность обработки труднодоступных участков, химическая чистота, контролируемость толщины обработки, минимальная финишная доводка

(или ее отсутствие), возможность дистанционного контроля и автоматизация процесса, малая пористость созданного поверхностного слоя, минимальное коробление обрабатываемого изделия, высокая производительность процесса, высокая работоспособность созданного поверхностного слоя, существенное (в 2–5 раз) увеличение ресурса обработанных изделий [3–7].

Целью работы являлось изучение влияния режимов лазерного модифицирования кромки реза на изменение структуры и механических свойств поверхностного слоя деталей, изготовленных из горячекатаных конструкционных углеродистых сталей марок 20, 35, 45.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны конструкционные углеродистые стали марок 20, 35, 45. Для исследования влияния лазерного модифицирования на изменение структуры и механических свойств деталей машин с использованием лазерной резки были изготовлены специальные образцы (рис. 1, а) в виде пластин толщиной 2 мм (ст20 и ст45) и 4 мм (ст35). Режимы газолазерной резки представлены в таблице 1. Резку осуществляли применением волоконного непрерывного лазера, снабженного оптической головкой ЭИП1119 производства НТО «ИРЭ-Полус». Мощность лазерного излучения изменяли в диапазоне 400...800 Вт. В качестве вспомогательного газа использовали кислород.

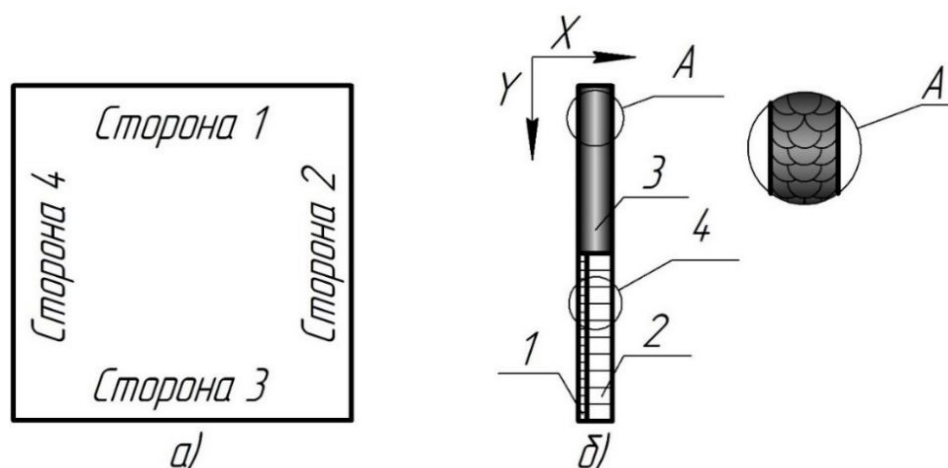


Рис. 1. Образец для исследования: а – общий вид; б – схема расположения зон;

1 – зона лазерного воздействия; 2 – зона воздействия газовой струи;

3 – зона лазерного модифицирования; 4 – кромка реза;

A – наклеп на кромке реза после лазерного модифицирования

Fig. 1. Sample for research: a – general view; б – layout of zones; 1 – zone of laser impact;

2 – zone of influence of the gas jet; 3 – laser modification zone; 4 – cutting edge;

A – hardening on the cut edge after laser modification

Таблица 1. Режимы лазерной резки образцов

Table 1. Modes of laser cutting of samples

Марка стали / толщина, мм	Мощность резки, Вт	Скорость резки, мм/мин	Фокус (+; –)	Диаметр сопла, мм	Давление вспомогательного газа (кислорода), атм
Ст20/2	400	2200	+3	1	1
Ст35/4	800	1700	+4	1	1
Ст45/2	500	2000	+3	1	1

После газолазерной резки проводили лазерное модифицирование кромки реза Q-switch волоконным импульсным лазером по режимам, представленным в таблице 2. Схема расположения зон лазерной резки и лазерного модифицирования представлена на рисунке 1, б.

Плотность «заливки» поверхности кромки реза излучением импульсного лазера (выносной элемент на рисунке 1, б) обеспечивалась на следующих режимах: скорость перемещения развертки луча по x-y 122 мм/мин; длительность им-

пульса $\tau = 100$ кГц; диаметр пятна излучения $D 90...100$ мкм; энергия импульса $E = 1$ мДж.

Микроструктуру образцов в исходном состоянии и после лазерной обработки (в поперечном сечении образца и в основной плоскости шлифа) анализировали до и после травления водным раствором $\text{CuSO}_4 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$ на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ-1С» и электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6390 с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром BRUKER QUANTEXQX1.

Таблица 2. Режимы лазерного модифицирования образцов**Table 2.** Modes of laser modification of samples

Сторона	Мощность, Вт	Частота следования импульсов, кГц	Плотность заливки (перекрытие), %	Проходы по координатам x-y
Сталь 20				
Сторона 1	50/30*	100/100	50/50	1
Сторона 2	100/30	100/100	50/50	1
Сторона 3	100/30	100/100	50/50	2
Сторона 4	100/30	100/100	50/50	3
Сталь 35				
Сторона 1	100/30	100/100	50/50	1
Сторона 2	100/30	100/100	50/50	2
Сторона 3	100/30	100/100	50/50	3
Сторона 4	100/30	100/100	50/50	4
Сталь 45				
Сторона 1	100/30	100/100	50/50	1
Сторона 2	100/30	100/100	50/50	2
Сторона 3	100/30	100/100	50/50	3
Сторона 4	100/30	100/100	50/50	4

Примечание. В числителе приведены значения параметров лазерной очистки, а в знаменателе – лазерной шлифовки.

Микротвердость по Виккерсу определяли в зоне газолазерного термического воздействия (ЗГЛТВ) в соответствии с ГОСТ 2999-75 с помощью твердомера KBW1-V при нагрузке 0,5 Н и выдержке под нагрузкой в течение 15 с.

Для оценки качества поверхности после газолазерной резки и лазерного модифицирования проводили измерение шероховатости с использованием портативного профилометра TimeGroupTR220.

Результаты и их обсуждение

Влияние вида лазерной обработки на качество поверхности

Фотографии микроструктур исследуемых сталей после лазерной резки представлены на рисунке 2. У всех исследованных сталей после лазерной резки на по-

верхности реза были обнаружены микротрещины. Их число для сталей марок 20 и 45 невелико (рис. 2, а, в), а размер не превышает 100 мкм. У стали марки 35 наблюдали значительное количество разветвленных продольных микротрещин (рис. 2, б). Данное обстоятельство можно объяснить тем, что мощность резки и толщина данной стали были в 2 раза выше, чем у сталей марок 20 и 45, а скорость – в 1,2 раза ниже, что и привело, вследствие более неравномерного распределения термических напряжений, к зарождению и развитию большего числа микротрещин.

Далее часть поверхности реза (см. рис. 1, б) была подвергнута лазерному модифицированию по режимам, представленным в таблице 2.

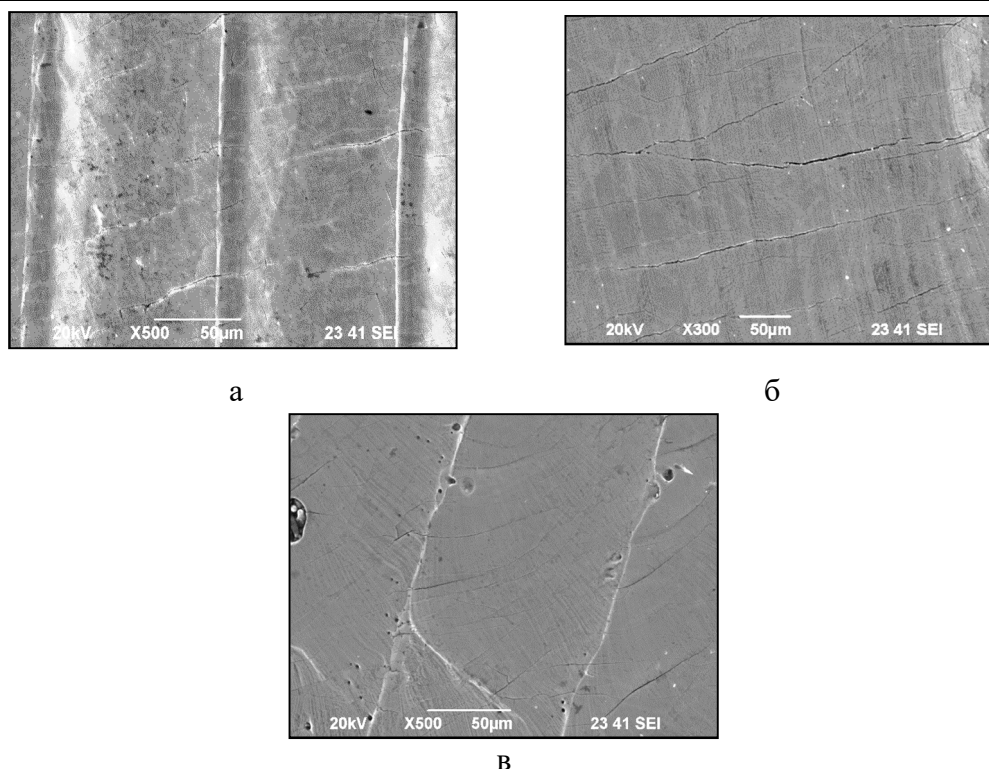


Рис. 2. Микротрещины на поверхности сталей марок ст20 (а, $\times 500$), ст35 (б, $\times 300$) и ст45 (в, $\times 500$) после лазерной резки

Fig. 2. Microcracks on the surface of steel grades st20 (a, $\times 500$), st35 (б, $\times 300$), and st45 (в, $\times 500$) after laser cutting

После лазерного модифицирования (рис. 3) трещин не обнаружено. Подобный эффект достигается, по-видимому, за счет релаксации локальных внутренних напряжений, способствующих заживлению зародышевых микротрещин. В то же время

повторная обработка лазером, производя эффект оплавления поверхностного слоя, способствует формированию в нем уплотненной кольцеобразной игольчатой структуры (рис. 3), практически не имеющей пустот.

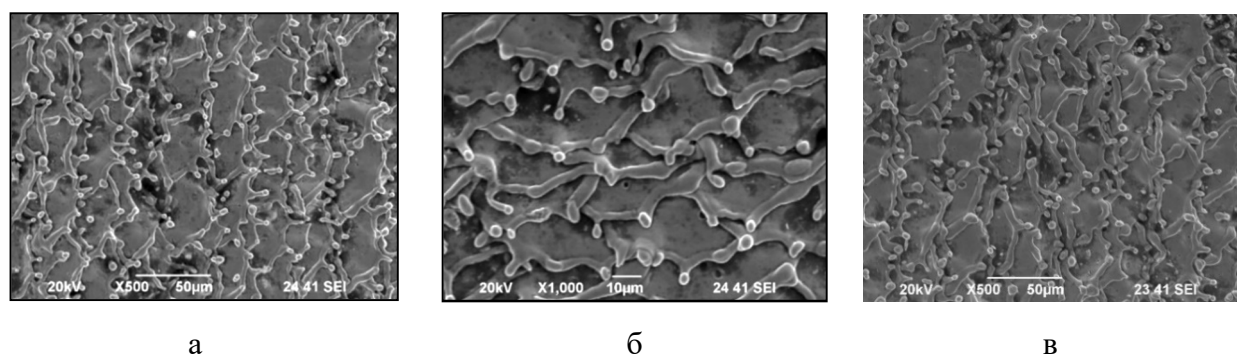


Рис. 3. Поверхности сталей марок ст20 (а, $\times 500$), ст35 (б, $\times 1000$) и ст45 (в, $\times 500$) после лазерного модифицирования (РЭМ)

Fig. 3. Microcracks on the surface of steel grades st20 (a, $\times 500$), st35 (б, $\times 300$), and st45 (в, $\times 500$) after laser modification

Представляет интерес проследить, как изменяется шероховатость поверхности в зависимости от вида лазерной обра-

ботки (резка, модифицирование). Результаты измерения шероховатости исследуемых сталей представлены в таблице 3.

Таблица 3. Шероховатость поверхностей исследуемых сталей после различных видов лазерной обработки

Table 3. Roughness of the surfaces of the studied steels after various types of laser processing

Марка стали	Среднее значение шероховатости Rz, мкм			
	сторона 1	сторона 2	Сторона 3	сторона 4
Зона газолазерного термического воздействия				
Сталь 20	16,49	20,74	13,13	8,73
Сталь 35	16,73	8,23	17,03	14,53
Сталь 45	17,17	11,68	16,23	17,15
Зона воздействия вспомогательного газа				
Сталь 20	13,73	15,85	10,34	6,50
Сталь 35	17,89	5,90	10,20	19,50
Сталь 45	17,85	9,71	15,48	25,51
Зона лазерного модифицирования				
	1 проход	1 проход	2 прохода	3 прохода
Сталь 20	10,37	14,25	11,80	10,33
	1 проход	2 прохода	3 прохода	4 прохода
Сталь 35	16,44	19,12	11,74	18,48
Сталь 45	15,10	14,98	12,59	15,92

Анализ влияния числа проходов на шероховатость поверхности реза показывает, что увеличение числа проходов с одного до трех способствует снижению шероховатости поверхности (см. табл. 3), а его увеличение до четырех приводит к увеличению шероховатости до величины, полученной при одном проходе. Применение одного-двух проходов неоднозначно влияет на изменение параметров шероховатости.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что применение лазерного модифицирования поверхности в качестве дополнительной операции при изготовлении деталей методом лазерной резки позволяет улучшить качество поверхностного слоя.

Влияние вида лазерного модифицирования на изменение структуры и микротвердости поверхностного слоя

У всех исследованных образцов после лазерной обработки (резка, модифицирование) выявлена зона с измененной структурой – ЗГЛТВ, имеющая различную ширину и микротвердость.

На рисунке 4 представлены микроструктуры ЗГЛТВ исследуемых сталей после лазерной резки. Микроструктура ЗГЛТВ на стали 20 (рис. 4, а) представлена перлитом сорбитообразным, отдельными участками игольчатого строения (троостит) и карбидами (точечная сыпь из цементитных частиц) размером до 1 мкм. Микротвердость данной зоны 230...280 HV, а ее ширина – 140...150 мкм. Ширина и структура ЗГЛТВ у всех четырех сторон образца идентичны.

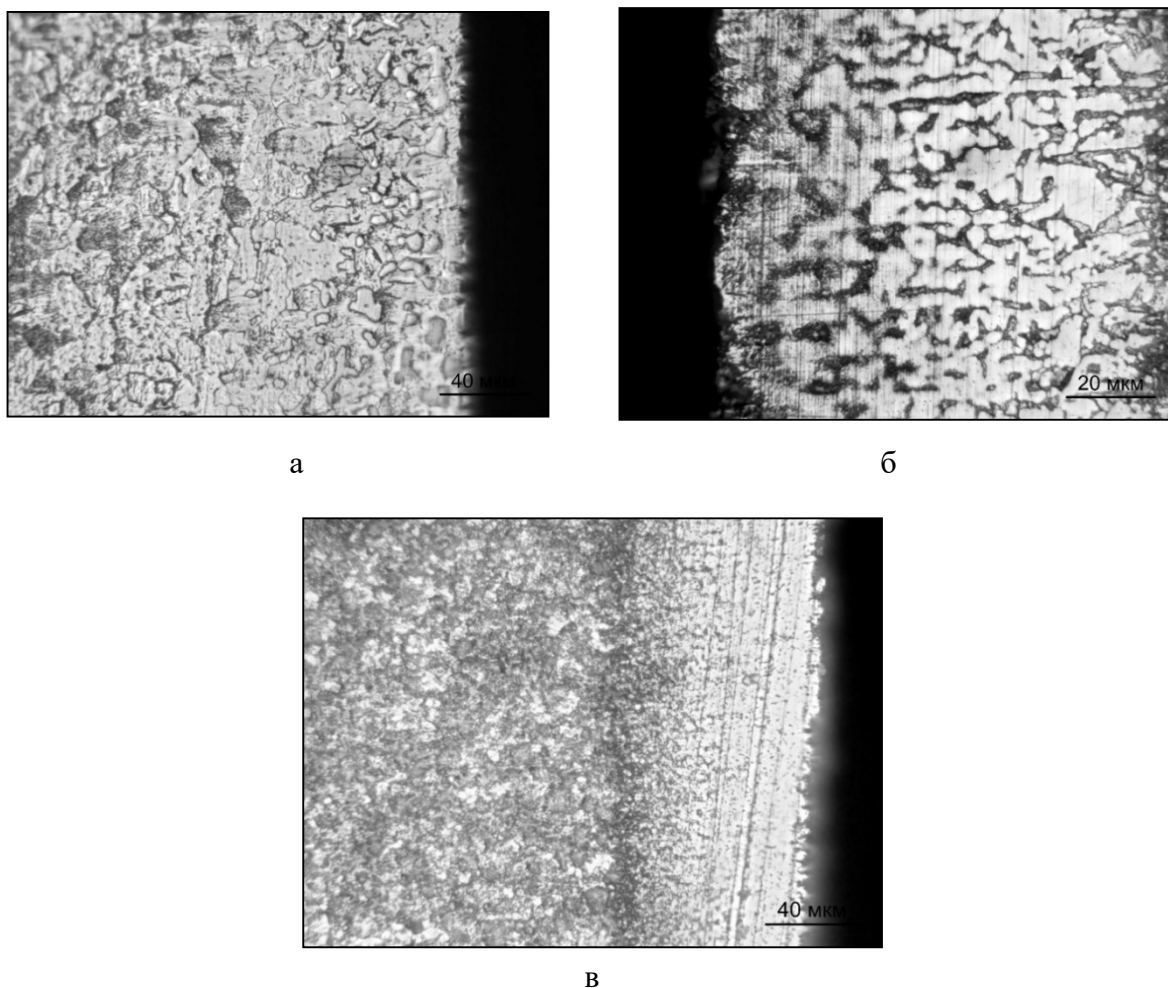


Рис. 4. Структура зоны газолазерного термического воздействия сталей марок ст20 (а, $\times 500$), ст35 (б, $\times 1000$) и ст45 (в, $\times 500$) после лазерной резки, травл.

Fig. 4. Structure of the zone of gas-laser thermal effect of steel grades st20 (а, $\times 500$), st35 (б, $\times 1000$) and st45 (в, $\times 500$) after laser cutting, etching

В стали 35 у плоскостей после лазерной резки выявлена ЗГЛТВ шириной: плоскость 1 – 140...330 мкм, плоскость 3 – 120...260 мкм. Микроструктура ЗГЛТВ (рис. 4, б) представлена мартенситом и карбидами (точечная сыпь из цементитных частиц) размером до 1 мкм. Микротвердость ЗГЛТВ составляет 470...560 HV. Ширина и структура ЗГЛТВ у всех четырех сторон образца идентичны.

В стали 45 у плоскостей после лазерной резки выявлена ЗГЛТВ шириной 80...170 мкм. Микроструктура ЗГЛТВ (см. рис. 4, в) представляет собой троостомартенсит и карбиды (точечная сыпь из

цементитных частиц) размером до 1 мкм. Микротвердость ЗГЛТВ составляет 45...470 HV. Ширина и структура ЗГЛТВ у всех четырех сторон образца идентичны.

Также изучали микроструктуру и микротвердость основного металла (рис. 5). Микроструктура на основной плоскости шлифа стали 20 (рис. 5, а) представляет собой феррит + зернистый перлит + небольшое количество пластинчатого перлита и карбиды, которые представляют собой равномерно распределенную точечную сыпь из цементитных частиц размером до 3 мкм. Микротвердость основного металла 131...148 HV.

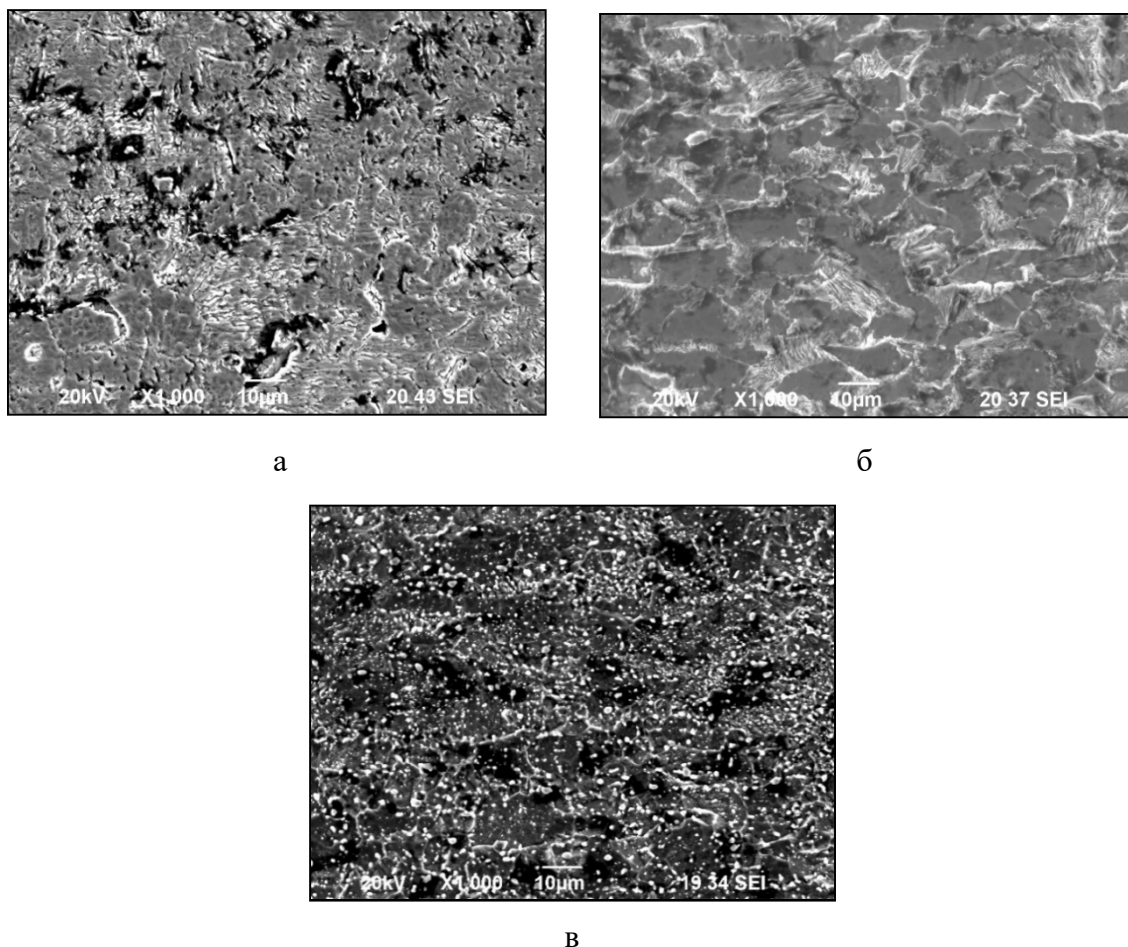


Рис. 5. Структура основного металла сталей марок ст20 (а), ст35 (б) и ст45 (в) после лазерной резки, травл. (РЭМ), $\times 1000$

Fig. 5. The structure of the base metal of steel grades st20 (a), st35 (b) and st45 (c) after laser cutting, etching. (SEM), $\times 1000$

Микроструктура на основной плоскости шлифа стали 35 (см. рис. 5, б) представляет собой феррит + зернистый и пластинчатый перлит + карбиды (равномерно распределенная точечная сыпь из цементитных частиц) размером до 1 мкм. Микротвердость основного металла 142...148 HV.

Микроструктура на основной плоскости шлифа стали 45 (см. рис. 5, в) представляет собой феррит + зернистый и пластинчатый перлит + карбиды (равномерно распределенная точечная сыпь из цементитных частиц) размером до 3,5 мкм. Микротвердость основного металла 148...156 HV.

На рисунке 6 представлены микроструктуры ЗГЛТВ исследуемых сталей после лазерной резки и последующего лазерного модифицирования кромки реза.

Микроструктура ЗГЛТВ на стали 20 (рис. 6, а) после лазерной обработки (резка и модифицирование) представляет собой перлит сорбитообразный, отдельные участки игольчатого строения (троостит) и карбиды (точечная сыпь из цементитных частиц) размером до 1 мкм. Микротвердость данной зоны 230...280 HV, а ее ширина – 100...110 мкм. Ширина и структура ЗГЛТВ у всех четырех сторон образца идентичны. Структура и микротвердость ЗГЛТВ после лазерной резки и лазерного модифицирования идентичны.

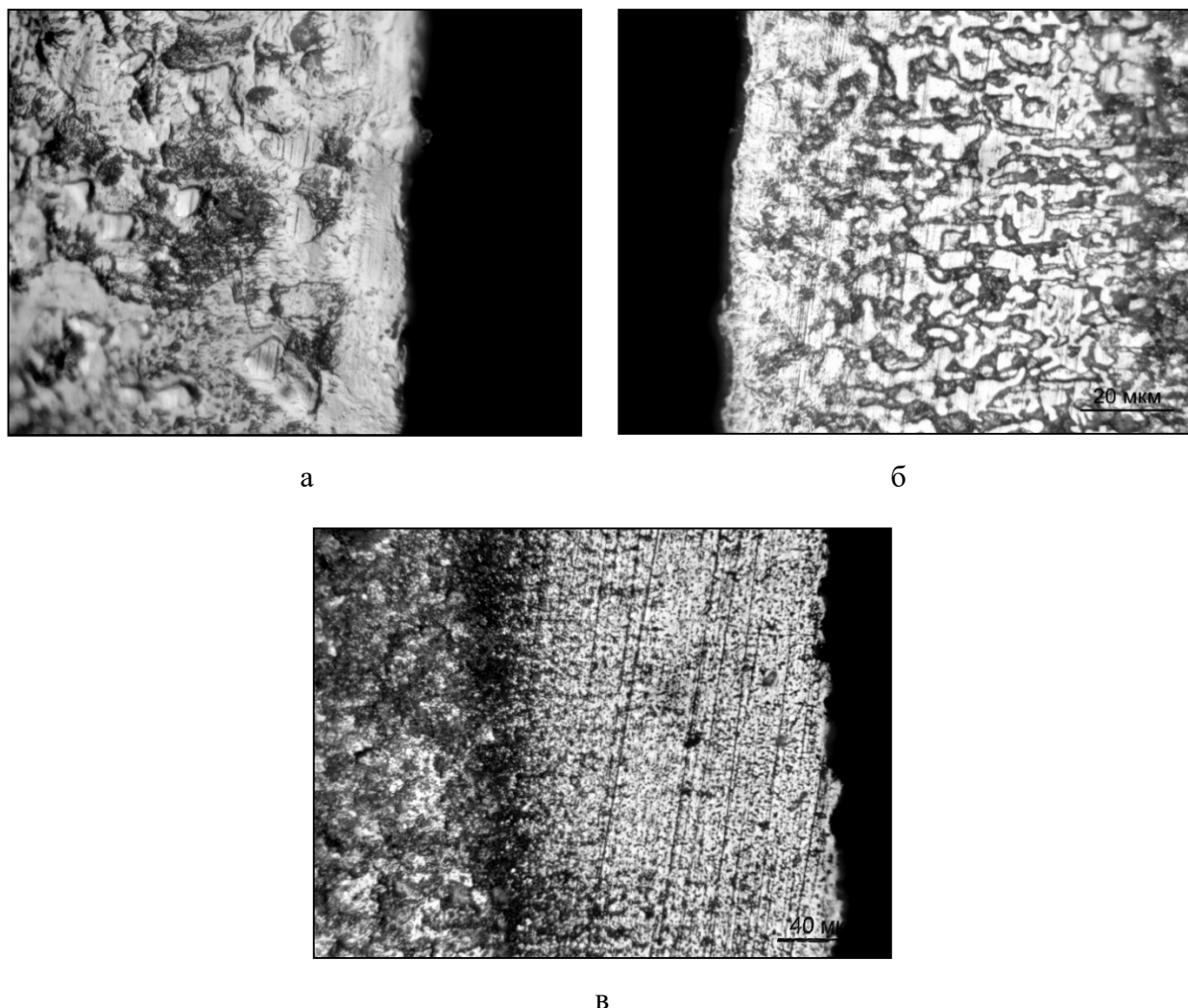


Рис. 6. Структура зоны газолазерного термического воздействия сталей марок ст20 (а), ст35 (б) и ст45 (в) после лазерной обработки (резка и модифицирование), травл., $\times 1000$

Fig. 6. Structure of the zone of gas-laser thermal effect of steel grades st20 (a), st35 (б) and st45 (в) after laser treatment (cutting and modification), etching., $\times 1000$

В стали 35 у плоскостей после лазерной обработки (резка и модифицирование) выявлена ЗГЛТВ шириной: плоскость 1 – 120...350 мкм, плоскость 3 – 120...245 мкм, а также нетравящаяся зона толщиной 4...6 мкм. Микроструктура ЗГЛТВ (см. рис. 6, б) представляет собой мартенсит и карбиды (точечная сыпь из цементитных частиц) размером до 1 мкм. Микротвердость ЗГЛТВ составляет 470...560 HV. Ширина и структура ЗГЛТВ у всех четырех сторон образца идентичны. Структура и микротвердость

ЗГЛТВ после лазерной резки и лазерного модифицирования идентичны.

В стали 45 после лазерной обработки (резка и модифицирование) выявлена ЗГЛТВ шириной 80...170 мкм. Микроструктура ЗГЛТВ (см. рис. 6, в) представляет собой троостомартенсит и карбиды (точечная сыпь из цементитных частиц) размером до 1 мкм. Микротвердость ЗГЛТВ составляет 450...470 HV. Ширина и структура ЗГЛТВ у всех четырех сторон образца идентичны. Структура и микротвердость ЗГЛТВ после лазерной резки и лазерного модифицирования идентичны.

Микроструктура исследуемых сталей на основной плоскости идентична вышеприведенной на рисунке 5 (феррит + перлит + карбиды).

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [3–20].

Выводы

1. Выявлены закономерности изменения структуры зоны газолазерного термического воздействия после лазерной обработки (резка, модифицирование). Установлено, что повторная обработка лазером (лазерное модифицирование) кромки реза не приводит к изменению структурных составляющих и микротвердости в зоне газолазерного термического воздействия, полученных после лазерной резки.

2. Анализ поверхности образцов сталей марок 20, 35, 45 после лазерной резки выявил наличие микротрещин на поверхности реза, причем при снижении скорости резки и увеличении мощности лазерного излучения количество микротрещин возрастает. Подобная закономерность обусловлена более неравномерным распределением термических напряжений,

возникающих вследствие неравномерного остывания поверхности реза.

3. Выявлено, что применение лазерного модифицирования поверхности реза способствует залечиванию имеющихся микротрещин, а также способствует формированию более плотной структуры поверхностного слоя за счет его оплавления.

4. Установлено, что характер изменения микротвердости у всех исследованных марок сталей одинаков: наибольшие значения достигаются около поверхности газолазерной обработки и составляют, например для стали марки 35 470...560 HV, что в 3,2–3,9 раза больше исходной микротвердости (145 HV). Таким образом, на поверхности детали после лазерной обработки формируется упрочненный слой, обладающий повышенной износостойкостью.

5. Показано, что применение лазерного модифицирования поверхности в качестве дополнительной операции при изготовлении деталей методом лазерной резки позволяет улучшить качество (шероховатость) поверхностного слоя. При этом наибольший эффект снижения шероховатости дает лазерное модифицирование в три прохода по плоскости X-Y.

Список литературы

1. Упрочнение деталей лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак; под общ. ред. В. С. Коваленко. Киев: Техника, 1981. 131 с.
2. Комплекс научно-технических, проектно-конструкторских и технологических разработок по созданию, изготовлению и внедрению высокоточного импортозамещающего оборудования качественной лазерной и газоплазменной обработки листового проката: монография / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, И. П. Грашкин, И. В. Минаев, С. И. Полосин, И. В. Тихонова, А. Е. Чеглов, Д. М. Хонелидзе; под ред. Н. Н. Сергеева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 188 с.
3. Перспективы промышленных применений лазерной очистки материалов / В. П. Вейко, А. А. Кишалов, Т. Ю. Мути, В. Н. Смирнов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3 (79) С. 50–54.
4. Сулов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

5. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / В. П. Вейко, В. Н. Смирнов, А. М. Чирков, Е. А. Шахно. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 103 с.
6. 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.
7. Lu Y. F., Ren Z. M. Laser microprocessing and the applications in microelectronics industry // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4157. P. 191–199.
8. Влияние параметров лазерной резки на качество поверхности реза стальных листов / И. В. Минаев, Н. Н. Сергеев, И. В. Тихонова, А. Е. Гвоздев, Д. М. Хонелидзе, И. В. Голышев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 3. С. 50–58.
9. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов / А. Е. Гвоздев, И. В. Голышев, И. В. Минаев, А. Н. Сергеев, Н. Н. Сергеев, И. В. Тихонова, Д. М. Хонелидзе, А. Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 2. С. 31–36.
10. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А. Е. Гвоздев, Н. Н. Сергеев, И. В. Минаев, А. Г. Колмаков, И. В. Тихонова, А. Н. Сергеев, Д. А. Провоторов, Д. М. Хонелидзе, Д. В. Малий, И. В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3–7.
11. Влияние содержания углерода и параметров лазерной резки на строение и протяженность зоны термического влияния стальных листов / Н. Н. Сергеев, И. В. Минаев, А. Е. Гвоздев, А. Е. Чеглов, И. В. Тихонова, О. М. Губанов, И. А. Цыганов, Е. С. Алявдина, А. Д. Бреки // Сталь. 2018. № 5. С. 21–26.
12. Методология выбора режимов лазерной резки листов из конструкционных сталей для обеспечения требуемого комплекса показателей качества поверхности / Н. Н. Сергеев, И. В. Минаев, И. В. Тихонова, А. Е. Гвоздев, А. Г. Колмаков, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, Д. В. Малий // Материаловедение. 2019. № 10. С. 25–32.
13. Формирование поверхности реза и поверхностное упрочнение при лазерной резке звездочек цепных передач из сталей СТЗ и 30ХГСА / И. В. Минаев, И. В. Тихонова, А. Е. Гвоздев, А. Г. Колмаков, Е. А. Архипова // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 9. С. 16–21.
14. Особенности строения зоны газолазерного термического влияния конструкционных легированных сталей марок 09Г2С и 20Х13 / И. В. Минаев, А. Е. Гвоздев, С. Н. Кутепов, Д. С. Клементьев, А. А. Калинин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. Вып. 10. С. 499–506.
15. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, силовая оптика / В. П. Вейко, М. Н. Либенсон, Г. Г. Червяков, Е. Б. Яковлев. М.: Физматлит, 2008. 312 с.
16. Ведерникова И. И., Полетаев В. А. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин лазерным модифицированием // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. Вып. 3. С. 1–3.
17. Корнеев В. В., Косырев Ф. К., Морящев С. Ф. О некоторых зависимостях термообработки лазером // Физика и химия обработки материалов. 1980. № 36. С. 32–33.
18. Спиридонов Н. В., Кобяков О. С., Куприянов И. Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. Минск: Вышэйш. шк., 1988. 155 с.
19. Крапошин В. С., Шахлевич К. П., Вяземский М. Г. Влияние лазерного нагрева на количество остаточного аустенита в сталях и чугунах // Металловедение и термическая обработка металлов. 1989. № 10. С. 21–23.

20. Войтович О. Н., Соколов И. О. Исследование влияния параметров лазерной термообработки на свойства упрочненных поверхностных слоев // Вестник Белорусско-Российского университета. 2013. № 2 (39). С. 6–14.

Reference

1. Kovalenko V. S., Golovko L. F., Merkulov G. V., Strizhak A. I. Uprochnenie detalei luchom lazera [Hardening of parts with a laser beam]; ed. by V. S. Kovalenko. Kyiv, Tekhnika Publ., 1981. 131 p.
2. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Grashkin I. P., Minaev I. V., Polosin S. I., Tikhonova I. V., Cheglov A. E., Khonelidze D. M. Kompleks nauchno-tekhnicheskikh, proektno-konstruktorskikh i tekhnologicheskikh razrabotok po sozdaniyu, izgotovleniyu i vnedreniyu vysokotochnogo importozameshchayushchego oborudovaniya kachestvennoi lazernoi i gazoplazmennoi obrabotki listovogo prokata [A complex of scientific and technical, design and technological developments for the creation, manufacture and implementation of high-precision import-substituting equipment for high-quality laser and gas-plasma processing of sheet metal]; ed. by N. N. Sergeev. Tula, TulSU Publ., 2014. 188 p.
3. Veiko V. P., Kishalov A. A., Mutin T. Y., Smirnov V. N. Perspektivy industrial'nykh primeneni lazernoi ochistki materialov [Prospects of industrial applications of laser cleaning of materials]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* = *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2012, no. 3 (79), pp. 50–54.
4. Suslov A. G. Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 320 p.
5. Veiko V. P., Smirnov V. N., Chirkov A. M., Shakhno E. A. Lazernaya ochistka v mashinostroenii i priborostroenii [Laser cleaning in mechanical engineering and instrumentation]. St. Petersburg, ITMO Research Institute, 2013. 103 p.
6. Veiko V. P., Mutin T. Y., Smirnov V. N., Shakhno E. A., Batishche S. A. Lazernaya ochistka poverkhnostei metallov: fizicheskie protsessy i primeneniye [Laser cleaning of metal surfaces: physical processes and applications]. *Izvestiya vysshchikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* = *Proceedings of Higher Educational Institutions. Instrumentation*, 2008, vol. 51, no. 4, pp. 30–36.
7. Lu Y. F., Ren Z. M. Laser microprocessing and the applications in microelectronics industry [Laser microprocessing and the applications in microelectronics industry]. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4157, pp. 191–199.
8. Minaev I. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Khonelidze D. M., Golyshhev I. V. Vliyanie parametrov lazernoi rezki na kachestvo poverkhnosti reza stal'nykh listov [The influence of laser cutting parameters on the quality of the cutting surface of steel sheets]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* = *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*, 2014, is. 3, pp. 50–58.
9. Gvozdev A. E., Golyshhev I. V., Minaev I. V., Sergeev A. N., Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Khonelidze D. M., Kolmakov A. G. Mnogoparametricheskaya optimizatsiya parametrov lazernoi rezki stal'nykh listov [Multiparametric optimization of parameters of laser cutting of steel sheets]. *Materialovedenie* = *Materials Science*, 2015, no. 2, pp. 31–36.
10. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Kolmakov A. G., Tikhonova I. V., Sergeev A. N., Provotorov D. A., Khonelidze D. M., Maliy D. V., Golyshhev I. V. Raspredelenie temperatur i struktura v zone termicheskogo vliyaniya dlya stal'nykh listov posle lazernoi rezki

[Temperature distribution and structure in the zone of thermal influence for steel sheets after laser cutting]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2016, no. 9, pp. 3–7.

11. Sergeev N. N., Minayev I. V., Gvozdev A. E., Chegllov A. E., Tikhonova I. V., Gubarov O. M., Tsyganov I. A., Alyavdina E. S., Breki A. D. Vliyanie sodержaniya ugleroda i parametrov lazernoi rezki na stroenie i protyazhennost' zony termicheskogo vliyaniya stal'nykh listov [Influence of carbon content and parameters of laser cutting on the structure and length of the heat-affected zone of steel sheets]. *Stal' = Staly*, 2018, no. 5, pp. 21–26.

12. Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Maliy D. V. Metodologiya vybora rezhimov lazernoi rezki listov iz konstruktsionnykh stalei dlya obespecheniya trebuemogo kompleksa pokazatelei kachestva poverkhnosti [Methodology for selecting modes of laser cutting of sheets from structural steels to ensure the required set of indicators of surface quality]. *Materialovedenie = Material Science*, 2019, no. 10, pp. 25–32.

13. Minaev I. V., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Arkhipova E. A. Formirovanie poverkhnosti reza i poverkhnostnoe uprochnenie pri lazernoi rezke zvezdochek tsepnykh peredach iz stalei ST3 i 30KhGSA [Formation of the cut surface and surface hardening during laser cutting of chain gear sprockets from ST3 and 30KhGSA steels]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Deformation and destruction of materials*, 2020, no. 9, pp. 16–21.

14. Minaev I. V., Gvozdev A. E., Kutepov S. N., Klementyev D. S., Kalinin A. A. Osobennosti stroeniya zony gazolazernogo termicheskogo vliyaniya konstruktsionnykh legirovannykh stalei marok 09G2S i 20Kh13 [Features of the structure of the zone of gas-laser thermal influence of structural alloy steels of grades 09G2S and 20Kh13]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2022, Is. 10, pp. 499–506.

15. Veiko V. P., Libenson M. N., Chervyakov G. G., Yakovlev E. B. Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom, silovaya optika [Interaction of laser radiation with matter, power optics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 312 p.

16. Vedernikova I. I., Poletaev V. A. Uprochnenie rabochikh poverkhnostei detalei mashin lazernym modifitsirovaniem [Hardening of working surfaces of machine parts by laser modification]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, 2008, is. 3, pp. 1–3.

17. Korneev V. V., Kosyrev F. K., Moryashchev S. F. O nekotorykh zavisimostyakh termoobrabotki lazerom [On some dependencies of laser heat treatment]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and chemistry of materials processing*, 1980, no. 36, pp. 32–33.

18. Spiridonov N. V., Kobyakov O. S., Kupriyanov I. L. Plazmennye i lazernye metody uprochneniya detalei mashin [Plasma and laser methods of hardening machine parts]. Minsk, Vysheysh. shk. Publ., 1988. 155 p.

19. Kraposhin V. S., Shakhlevich K. P., Vyazemsky M. G. Vliyanie lazernogo nagreva na kolichestvo ostatochnogo austenita v stalyakh i chugunakh [The effect of laser heating on the amount of residual austenite in steels and cast irons]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and heat treatment of metals*, 1989, no. 10, pp. 21–23.

20. Voitovich O. N., Sokorov I. O. Issledovanie vliyaniya parametrov lazernoi termoobrabotki na svoystva uprochnennykh poverkhnostnykh sloev [The research into the influence of laser thermal processing parameters on the properties of strengthened surface layers]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2013, no. 2 (39), pp. 6–14.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Igor V. Minaev, Cand. of Sci. (Engineering), General Director, Research and Production Enterprise Telar LLC, Tula, Russian Federation, e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

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

Sergey N. Kutepov, Cand. of Sci. (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

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

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

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3862-8624

Evgeniy V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Technology of Materials and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3862-8624

Журба Данила Владимирович, аспирант, Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: zhurba.danila306@yandex.ru

Danila V. Zhurba, Post-Graduate Student, National Research University ITMO, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: zhurba.danila306@yandex.ru