Оригинальная статья / Original article

УДК 621.791.947.2:539.4
https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-8-21

CC BY 4.0

Поверхностное микроструктурирование горячекатаных углеродистых конструкционных сталей при комплексном воздействии лазерным излучением

И. В. Минаев[1], С. Н. Кутепов[2] ✉, Д. С. Клементьев[2], Д. В. Журба[3], И. В. Голышев[1]

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

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

[3] Национальный исследовательский университет ИТМО
пр. Кронверкский, д. 49, г. Санкт-Петербург 197101, Российская Федерация

✉ e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Резюме

Целью *работы являлось изучение влияния режимов лазерного микроструктурирования 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 квадратных пластин (35×35 мм) толщиной 2 мм (Ст20 и Ст45) и 4 мм (Ст35). После лазерной резки по режимам одну из сторон образца подвергли механическому шлифованию 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 свойств поверхностного слоя проводили металлографические и дюрометрические исследования.*

Результаты. *Выявлены закономерности строения зоны лазерного воздействия конструкционных углеродистых сталей после лазерного микроструктурирования, которая состоит из двух слоев: нетравящийся (слаботравящийся) белый слой, представляющий собой мелкодисперсный мартенсит игольчатого строения, и непосредственно следующая за ним зона термического влияния, которая в зависимости от содержания углерода в стали имеет различную структуру: ферритно-перлитную, мартенситную, троостомартенситную, мартенситно-перлитную. Установлено, что лазерное микроструктурирование предварительно отшлифованной поверхности в ряде случаев приводит к увеличению значений микротвердости и протяженности зоны лазерного воздействия, что может быть связано с увеличением поглощающей способности материала отшлифованной поверхности и, соответственно, уменьшением его отражающей способности.*

© Минаев И. В., Кутепов С. Н., Клементьев Д. С., Журба Д. В., Голышев И. В., 2024

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

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

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

Для цитирования: 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

Поступила в редакцию 01.04.2024 *Подписана в печать 07.05.2024* *Опубликована 17.06.2024*

Surface microstructuring of hot-rolled carbon structural steels under complex exposure to laser radiation

Igor V. Minaev[1], Sergey N. Kutepov[2] ✉, Denis S. Klementyev[2], Danila V. Zhurba[3], Ivan V. Golyshev[1]

[1] OOO Scientific and Production Enterprise "Telar"
39 City Lane, Tula 300026, Russian Federation

[2] Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy
125 Lenin Ave., Tula 30026, Russian Federation

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

✉ e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Abstract

The purpose *of the work was to study the effect of laser microstructuring modes 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 grades 20, 35, 45.*

Methods. *Structural carbon steels of grades 20, 35, 45 were selected as objects of research. To study the effect of laser modification on changing the structure and mechanical properties of machine parts using laser cutting, special samples were made in the form of square plates (35×35 mm) with a thickness of 2 mm (St20 and St45) and 4 mm (St35). After laser cutting according to the modes, one of the sides of the sample was subjected to mechanical grinding 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 properties of the surface layer.*

Results. *The regularities of the structure of the zone of laser action of structural carbon steels after laser microstructuring have been revealed, which consists of two layers: a non-etching (slightly etching) white layer, which is a finely dispersed martensite of a needle structure and immediately following it a zone of thermal influence, which, depending on the carbon content in the steel, has a different structure: ferrite-pearlite, martensitic, troostomartensitic, martensitic-pearlitic. It has been established that laser microstructuring of a pre-polished surface in some cases leads to an increase in the values of microhardness and the length of the laser exposure zone, which may be associated with an increase in the absorption capacity of the material of the polished surface and, accordingly, a decrease in its reflectivity.*

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

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

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., Zhurba D.V., Golyshev I.V. Surface microstructuring of hot-rolled carbon structural steels under complex exposure to laser radiation. *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

Received 01.04.2024 *Accepted 07.05.2024* *Published 17.06.2024*

***

Введение

Лазер и лазерные технологии являются перспективными методами получения и обработки изделий различного назначения, в связи с чем они нашли широкое применение в различных отраслях промышленности [1].

Одной из актуальных задач современного металловедения и термической обработки металлов и сплавов является исследование в области воздействия лазерного излучения как при газолазерной резке деталей из металлических сплавов, так и при лазерном неразрушающем воздействии на поверхность металлов и сплавов, влияющем на изменение микроструктуры и свойств облучаемых поверхностей [1]. В обоих случаях эти процессы (лазерная резка, микроструктурирование) характерны высокой скоростью нагревания (от 10^3 до 10^6 градусов в секунду) и высокой скоростью охлаждения (10^6 градусов в секунду и более) облучаемой детали за счет скорости потока квантовых частиц излучения лазера (~$3 \cdot 10^8$ м/с) [2; 3].

Главное достоинство технологии лазерного микроструктурирования (наряду с общими достоинствами лазерных технологий обработки материалов) [4; 5]: 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 [6], высокая работоспособность созданного поверхностного слоя, существенное (в 2–5 раз) увеличение ресурса обработанных изделий [7; 8]. Однако в настоящее время имеется незначительное число работ [9; 10], посвященных исследованию изменений структуры [11] и свойств деталей машин после такой обработки [12; 13].

Целью работы являлось изучение влияния режимов лазерного микроструктурирования 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 микроструктурирования на изменение структуры и механических свойств деталей машин с использованием лазерной резки были изготовлены специальные образцы (рис. 1, а) в виде квадратных пластин (35×35 мм) толщиной 2 мм (Ст20 и Ст45) и 4 мм (Ст35). Резку осуществляли применением

волоконного непрерывного лазера, снабженного оптической головкой ЭИП1119 производства НТО «ИРЭ-Полюс». В качестве вспомогательного газа использовали кислород. После лазерной резки по режимам, представленным в таблице 1, одну из сторон (сторона 4) подвергли механическому шлифованию с целью удаления слоя с измененной структурой получаемого в ходе лазерного раскроя материала [14; 15].

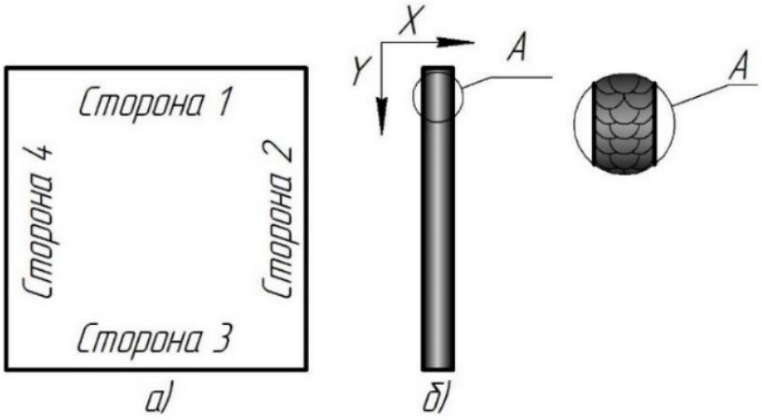

Рис. 1. Образец для исследования: а – вид сверху; б – вид сбоку;
А – наклеп на кромке реза после лазерного микроструктурирования

Fig. 1. Sample for the study: a – top view; б – side view;
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

Далее по режимам, представленным в таблице 2, с использованием непрерывного волоконного лазера было проведено лазерное микроструктурирование поверхностей образцов (см. рис. 1, б) исследуемых сталей непосредственно после лазерной резки (стороны 1–3) и последующей механической обработки (сторона 4).

Плотность «заливки» поверхности кромки реза излучением импульсного лазера (выносной элемент на рис. 1, б) обеспечивалась на следующих режимах: скорость перемещения развертки луча по х-у 122 мм/мин; длительность импульса τ = 100 кГц; диаметр пятна излучения D 90–100 мкм; энергия импульса E = 1 мДж [11].

Микроструктуру основного металла образцов и зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) анализировали до и после травления водным раствором $CuSO_4 + HCl + H_2O$ на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ-1С».

Таблица 2. Режимы лазерного микроструктурирования образцов

Table 2. Modes of laser microstructuring of samples

Параметры лазерной обработки	Сторона обработки			
	1	2	3	4
Сталь 20				
Мощность, Вт	1400	1400	1200	1200
Частота колебаний гальваносканатора, Гц	200	200	50	50
Плотность заливки (перекрытие), %	87	87	87	87
Ширина развертки, мм	50	50	50	50
Скорость подачи, мм/мин	1000	1000	250	250
Сталь 35				
Мощность, Вт	1400	1200	1400	1200
Частота колебаний гальваносканатора, Гц	200	50	200	50
Плотность заливки (перекрытие), %	87	87	87	87
Ширина развертки, мм	50	50	50	50
Скорость подачи, мм/мин	1000	250	1000	250
Сталь 45				
Мощность, Вт	1400	1400	1200	1200
Частота колебаний гальваносканатора, Гц	200	200	50	50
Плотность заливки (перекрытие), %	87	87	87	87
Ширина развертки, мм	50	50	50	50
Скорость подачи, мм/мин	1000	1000	250	250

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.

Результаты и их обсуждение

С использованием металлографического анализа установлено, что микроструктура зоны лазерного воздействия образцов после лазерного микроструктурирования преимущественно состоит из двух слоев – нетравящегося (слаботравящегося) белого слоя и непосредственно следующей за ним зоны термического влияния (ЗТВ).

Структура белого слоя на всех исследуемых сталях представляет собой мелкодисперсный игольчатый мартенсит (рис. 2). Исключение составляет лишь образец 1 стали марки Ст20, у которого при исследовании стороны 4, предварительно подвергнутой механическому шлифованию, структура (рис. 3) представляла собой смесь мартенсита с пластинчатым перлитом. Также следует отметить тот факт, что именно на стали Ст20 белый слой имел прерывистую структуру. Данное обстоятельство может быть обусловлено тем фактом, что данная сталь относится к классу малоуглеродистых и в связи с этим обладает низкой закаливаемостью [2; 3], о чем свидетельствуют результаты измерений микротвердости образцов, по сравнению со сталями марок Ст35 и Ст45 (табл. 3).

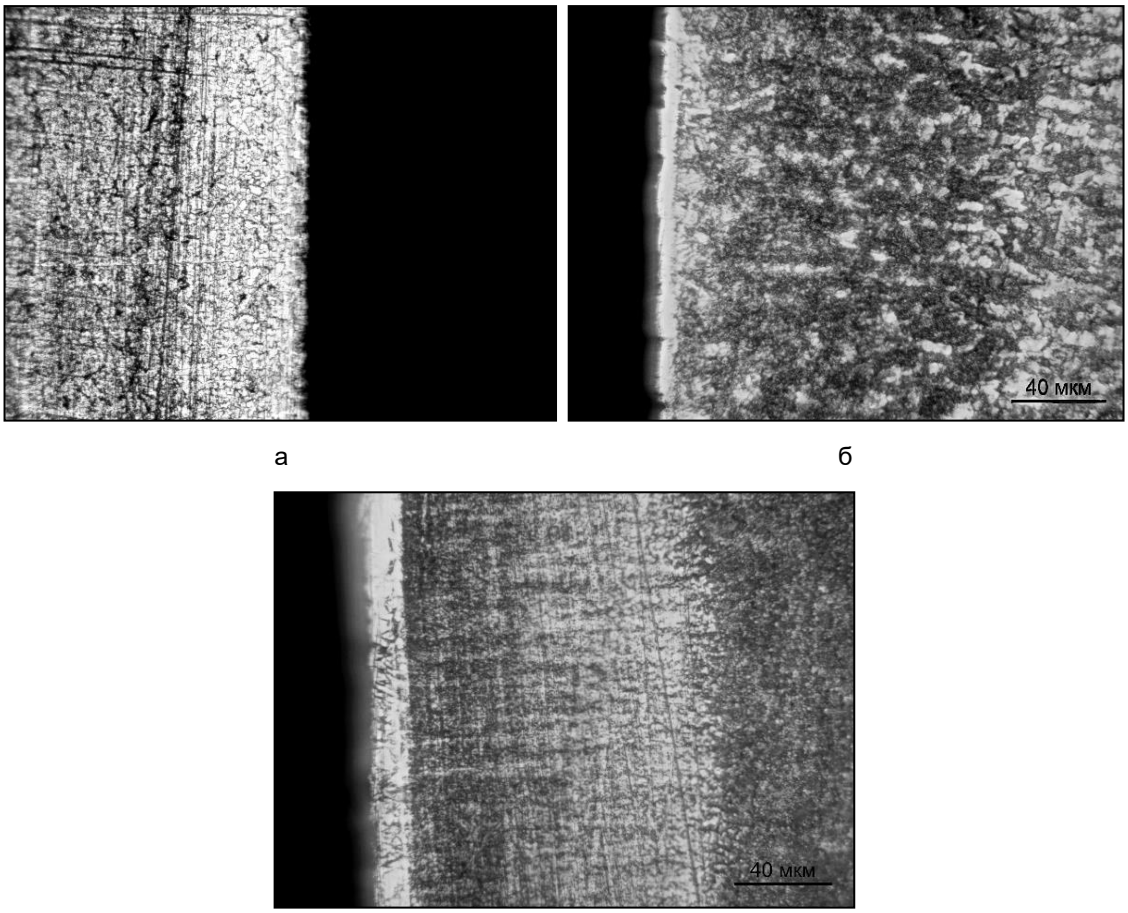

Рис. 2. Структура зоны лазерного воздействия в образцах углеродистых сталей после лазерного микроструктурирования: а – Ст20, ×200; б – Ст35, ×500; в – Ст45, ×500

Fig. 2. Structure of the laser exposure zone in carbon steel samples after laser microstructuring: а – St20, ×200; б – St35, ×500; в – St45, ×500

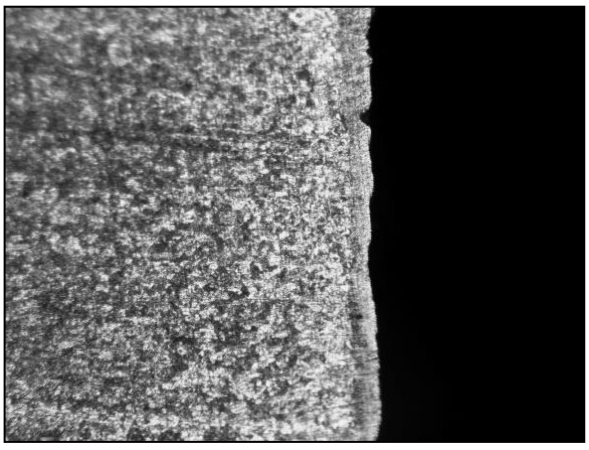

Рис. 3. Структура зоны лазерного воздействия в предварительно отшлифованном образце 1 углеродистой стали марки Ст20 после лазерного микроструктурирования, ×100

Fig. 3. The structure of the laser exposure zone in the pre-ground sample 1 of carbon steel grade St20 after laser microstructuring, ×100

Таблица 3. Микротвердость образцов исследуемых сталей после лазерного микроструктурирования в различных зонах

Table 3. Microhardness of the samples of the studied steels after laser microstructuring in various zones

Наименование слоя	Микротвердость по Виккерсу ($HV_{0,1}$) по сторонам обработки			
	1	2	3	4
Сталь 20				
Белый слой:				
образец 1	–	–	–	157–340
образец 2	–	–	282–320	–
Зона термического влияния:				
образец 1	157–194	166–280	169–282	–
образец 2	156–225	156–225	156–263	423–510
Основной металл:				
образец 1	140–150			
образец 2	140–150			
Сталь 35				
Белый слой:				
образец 1	–	–	–	387–410
образец 2	–	–	676–702	464–545
Зона термического влияния:				
образец 1	240–400	–	229–382	–
образец 2	220–390	–	229–628	–
Основной металл:				
образец 1	190–220			
образец 2	190–220			
Сталь 45				
Белый слой:				
образец 1	494–510	494–513	759–791	605–791
образец 2	490–510	628–676	527–628	565–824
Зона термического влияния:				
образец 1	292–464	290–464	312–605	–
образец 2	294–449	312–565	312–464	–
Основной металл:				
образец 1	230–290			
образец 2	230–290			

Причем микротвердость стали марки Ст20 после лазерного микроструктурирования стали (см. табл. 3) в сравнении с исходной микротвердостью структуры 230–280 $HV_{0,05}$ [11] непосредственно после лазерной резки существенно не изменяется, за исключением стороны 4 на образце 2, микротвердость которого возросла в 1,8 раза (510 $HV_{0,1}$) по сравнению с микротвердостью, полученной в ходе лазерной резки.

Зона термического влияния в стали марки Ст20 представляет собой ферритно-перлитную смесь. Исключение составляет лишь образец 2, у которого при исследовании стороны 4, предварительно подвергнутой механическому шлифованию, структура представляла собой смесь мартенсита с пластинчатым перлитом. Структура основного металла стали марки Ст20 (рис. 4, а) представляет собой феррит + перлит (пластинчатый).

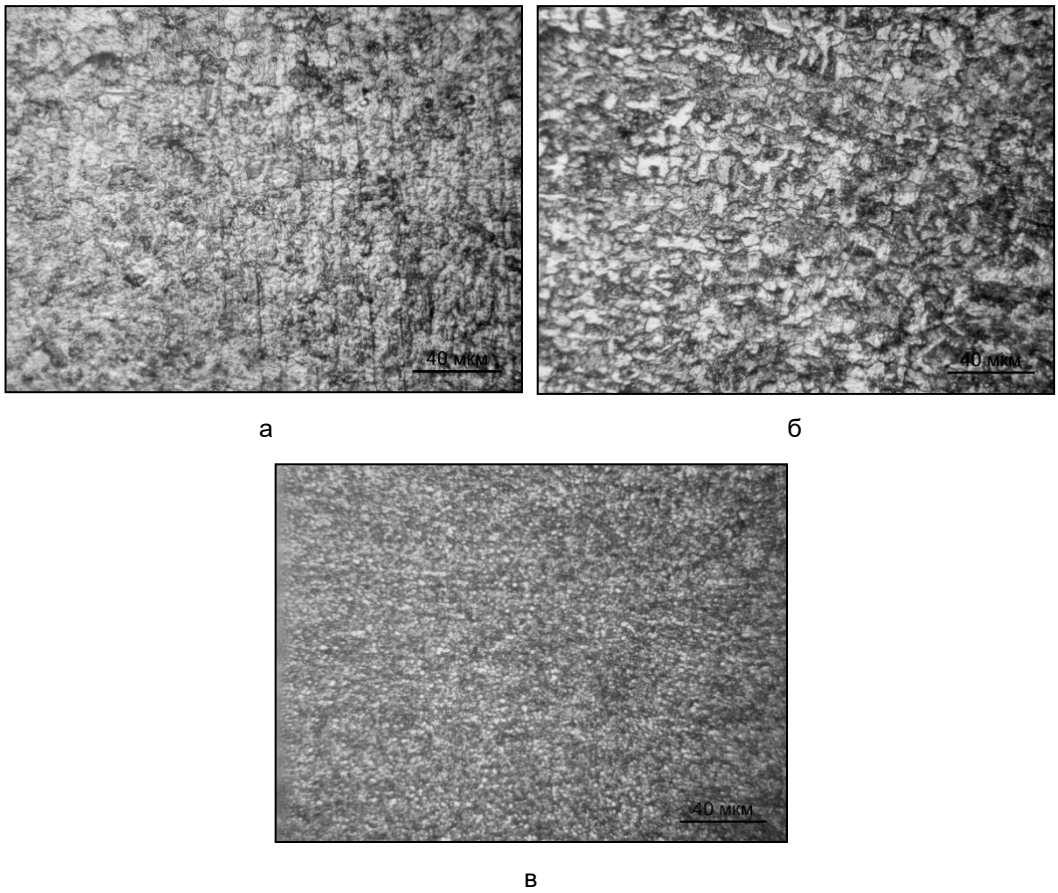

Рис. 4. Структура основного металла в образцах углеродистых сталей марок, ×500: а – Ст20; б – Ст35; в – Ст45

Fig. 4. The structure of the base metal in carbon steel samples of grades, ×500: а – St 20; б – St 35; в – St45

Зона термического влияния в стали марки Ст35 преимущественно представляет собой смесь мартенсита с сорбитообразным перлитом. В целом микротвердость ЗЛВ (см. табл. 3) по значениям не уступает микротвердости образцов непосредственно после лазерной резки (470–560 $HV_{0,05}$). Но как и для стали марки Ст20, имеются исключения – сторона 3 (образец 2) имеет явные отличия по значениям микротвердости как в белом слое (возросла в 1,3 раза (702 $HV_{0,1}$)), так и в ЗТВ (возросла в 1,1 раза (628 $HV_{0,1}$)). Структура основного металла стали марки Ст35 (рис. 4, б) представляет собой феррит + перлит (пластинчатый).

Зона термического влияния в стали марки Ст45 представляет собой троостомартенситную и мартенситную структуры, что обусловливает высокую закаливаемость сталей данного типа и, соответственно, высокие значения микротвердости по сравнению с микротвердостью, полученной непосредственно после лазерной резки (450–470 $HV_{0,05}$). Так микротвердость белого слоя (см. табл. 3) увеличилась в 1,8 раза (824 $HV_{0,1}$) для предварительно отшлифованной поверхности и в 1,7 раза (791 $HV_{0,1}$) для поверхности в исходном состоянии (лазерная резка). Микротвердость ЗТВ увеличилась в 1,2–1,3 раза (565 и 605 $HV_{0,1}$) соответственно. Структура основного металла стали марки Ст45 (см. рис. 4, в) представляет собой троостит + перлит сорбитообразный + карбиды.

Анализ результатов изменения протяженности ЗЛВ после лазерного микроструктурирования в сравнении с протяженностью ЗЛВ непосредственно после лазерной резки (табл. 4) позволил установить, что в целом протяженность ЗЛВ после повторной лазерной обработки изменяется незначительно.

Таблица 4. Протяженность ЗЛВ в образцах после лазерной резки и лазерного микроструктурирования

Table 4. The extent of the laser exposure zone in samples after laser cutting and laser microstructuring

Режим обработки	Протяженность зоны лазерного воздействия, мкм		
	Ст20	Ст35	Ст45
Лазерная резка	140–150	140–330	80–170
Лазерное микроструктурирование	80–200	120–350	80–210

Однако имеется ряд исключений, которые наблюдаются на поверхностях образцов, подвергнутых предварительному шлифованию. Так, например для стали марки Ст20 протяженность ЗЛВ в образце 2 увеличилась в 1,9 раза по сравнению с исходным состоянием (лазерная резка), а для стали марки Ст45 – в 1,2 раза. Подобное увеличение ЗЛВ на поверхностях, подвергнутых предварительной механической обработке, может быть связано с увеличением поглощающей способности материала отшлифованной поверхности и, соответственно, уменьшением его отражающей способности [16].

Из выше представленных результатов видно, что ЗЛВ переходит в структуру основного металла, не подверженного термическому влиянию лазерного излучения. Сложные физические процессы, протекающие при лазерном микроструктурировании в металлической структуре, сопровождаются переносом углерода из глубинных слоев к поверхностным, что подтверждается результатами полуколичественного химического анализа ЗЛВ исследуемых сталей (табл. 5).

Полученные результаты являются общими для всех исследованных марок доэвтектоидных сталей. Такое перераспределение углерода и может служить причиной формирования белого слоя и мартенситной структуры даже в малоуглеродистых сталях, приводя к поверхностному упрочнению [17], что важно при получении различных деталей машин сложной геометрической формы.

Таблица 5. Полуколичественный химический анализ ЗЛВ исследуемых сталей

Table 5. Semi-quantitative chemical analysis of the laser exposure zone of the studied steels

Спектр	Химический состав, мас. %		
	C	Mn	Fe
Сталь 45			
22	4,21	3,18	92,61
23	4,16	3,04	92,80
24	3,87	2,65	93,49
25	3,48	2,57	93,95
26	4,21	3,89	91,90
27	3,13	3,51	93,36
28	2,32	3,21	94,48
29	2,01	3,23	94,76
30	2,12	3,35	94,53

Окончание табл. 5 / Ending of Table 5

Спектр	Химический состав, мас. %		
	C	Mn	Fe
31	1,68	2,95	95,37
32	1,75	3,11	95,14
33	1,46	3,04	95,50
ГОСТ 1050-2013	0,50	0,80	97,00
Сталь 35			
34	3,35	3,27	93,98
35	3,21	3,41	93,98
36	2,67	3,80	93,54
37	2,72	3,68	93,60
38	2,02	3,62	94,36
39	2,02	4,56	93,41
40	1,90	3,23	94,87
41	1,83	3,63	94,54
42	1,21	3,21	95,58
ГОСТ 1050-2013	0,40	0,80	97,00
Сталь 20			
43	2,06	4,25	93,69
44	2,08	3,87	94,05
45	1,62	3,99	94,39
46	1,88	3,82	94,30
47	1,18	4,17	94,66
48	1,50	4,52	93,97
49	1,30	0,55	98,14
ГОСТ 1050-2013	0,24	0,65	98,00

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки материалов [18; 19; 20].

Выводы

1. Выявлены закономерности строения зоны лазерного воздействия конструкционных углеродистых сталей после лазерного микроструктурирования, которая состоит из двух слоев: нетравящийся (слаботравящийся) белый слой, представляющий собой мелкодисперсный мартенсит игольчатого строения, и непосредственно следующая за ним зона термического влияния, которая в зависимости от содержания углерода в стали имеет различную структуру: ферритно-перлитную, мартенситную, троостомартенситную, мартенситно-перлитную.

2. Показано, что повторная лазерная обработка поверхности не приводит к значительному изменению протяженности зоны лазерного воздействия. При этом на некоторых режимах происходит увеличение микротвердости 1,1–1,8 раза по сравнению с микротвердостью, полученной непосредственно после лазерной резки.

3. Установлено, что лазерное микроструктурирование предварительно отшлифованной поверхности в ряде случаев приводит к увеличению значений микротвердости и протяженности зоны лазерного воздействия, что может быть связано с увеличением поглощающей способности материала отшлифованной поверхности и, соответственно, уменьшением его отражающей способности.

Список литературы

1. Основы лазерной и газоплазменной обработки сталей: монография / Н. Н. Сергеев, И. В. Минаев, И. В. Тихонова, С. Н. Кутепов, М. Ю. Комарова, Е. С. Алявдина, А. Е. Гвоздев, А. А. Калинин. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 337 с.

2. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Наука, 1989. 304 с.

3. Коваленко В. С., Головко Л. Ф., Черненко В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. Киев: Тэхника, 1990. 192 с.

4. Перспективы индустриальных применений лазерной очистки материалов / В. П. Вейко, А. А. Кишалов, Т. Ю. Мутин, В. Н. Смирнов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3 (79). С. 50–54.

5. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 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. Lu Y. F., Ren Z. M. Laser microprocessing and the applications in microelectronics industry // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4157. P. 191–199.

9. 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.

10. 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.

11. 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

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). М.: Изд-во ФГБУН «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: Изда-во Уральского федер. ун-та 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.

References

1. Sergeev N.N., Minaev I.V., Tikhonova I.V., Kutepov S.N., Komarova M.Yu., Alyavdina E.S., et al. Fundamentals of laser and gas plasma processing of steel. Tula: TulSU Publishing House; 2017. 337 p. (In Russ.)

2. Grigoryants A.G. Fundamentals of laser processing of materials. Moscow: Nauka; 1989. 304 p. (In Russ.)

3. Kovalenko V.S., Golovko L.F., Chernenko V.S. Hardening and alloying of machine parts with a laser beam. Kiev: Tekhnika; 1990. 192 p. (In Russ.)

4. Veiko V.P., Kishalov A.A., Mutin T.Y., Smirnov V.N. Prospects of industrial applications of laser cleaning of materials. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of information Technologies, Mechanics and Optics*. 2012;(3):50–54. (In Russ.)

5. Suslov A.G. The quality of the surface layer of machine parts. Moscow: Mashinostroenie; 2000. 320 p. (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 vysshih uchebnyh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2008;51(4):30–36. (In Russ.)

8. Lu Y.F., Ren Z.M. Laser microprocessing and the applications in microelectronics industry. Proc. SPIE. 2000;4157:191–199.

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

10. 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.)

11. 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

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. *XXXIII Mezhdunarodnaya innovacionnaya konferenciya molodyh uchenyh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS – 2021) = XXXIII International Innovative Conference of Young Scientists and students on problems of machine science (MICMUS – 2021)*. Moscow: Izd-vo FGBUN "Institut mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova" RAN; 2021. P. 264–270.

16. Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Kornienko O.Yu., Stepanov S.I. Induction and laser heat treatment of steel products. Yekaterinburg: Izda-vo Ural'skogo feder. un-ta im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'cina; 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.

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.

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

20. Afanasyeva L.E., Tretyakov S.A., Ivanova A.I., Grechishkin R.M. Laser microstructuring of the steel surface. *Hardening technologies and coatings*. 2018;14(7):297–302. (In Russ.)

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, Candidate of Sciences (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

Sergej N. Kutepov, Candidate of Sciences (Pedagogical), Associate Professor, Associate Professor Department of Technology and Service, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepovsn@yandex.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

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

Голышев Иван Владимирович, ведущий инженер, ООО НПП «Телар», г. Тула, Российская Федерация, e-mail: Ivan.golyshev@gmail.com

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

Ivan V. Golyshev, Lead Engineer, Research and Production Enterprise Telar LLC, Tula, Russian Federation, e-mail: Ivan.golyshev@gmail.com