

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.785:539.531:544.032.65

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-39-50>

Влияние режимов лазерного микроstructuring на концентрацию углерода и уровень остаточных напряжений в поверхностном слое изделий из углеродистых сталей

И.В. Минаев¹✉

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

✉ e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Резюме

Целью работы являлось исследование влияния лазерного микроstructuring на изменение концентрации углерода и зональных остаточных макронапряжений первого рода в зоне лазерного воздействия образцов листовых углеродистых сталей марок 20, 35, 45 после лазерного микроstructuring по различным режимам.

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 микроstructuring поверхностей образцов. Рентгеноструктурные исследования с целью определения содержания углерода, знака и уровня остаточных напряжений первого рода (макронапряжений) проводили с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-4.0 в кобальтовом K_α -излучении в режиме дискретной съемки по точкам.

Результаты. С использованием метода рентгеноструктурного фазового анализа выявлено увеличение содержания углерода в поверхностном слое образцов после лазерного микроstructuring среднеуглеродистых сталей марок 35 и 45, значительно превышающее значения, установленные ГОСТ 1050-2013. Выявленный рост концентрации углерода, вероятно, связан с реализацией эффекта Сорэ (термодиффузией) в условиях воздействия высоких температур. Установлено, что лазерное микроstructuring рабочих поверхностей среднеуглеродистых сталей марок 34 и 45 приводит к формированию высоких зональных остаточных макронапряжений сжатия (до $-2300 \dots -3800$ МПа). Полученный результат свидетельствует о положительном воздействии лазерной обработки на механические свойства поверхностного слоя.

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

Ключевые слова: лазерное микроstructuring; зона лазерного воздействия; концентрация углерода; эффект Сорэ; остаточные напряжения.

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

Для цитирования: Минаев И.В. Влияние режимов лазерного микроstructuring на концентрацию углерода и уровень остаточных напряжений в поверхностном слое изделий из углеродистых сталей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 39–50. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-39-50>.

Поступила в редакцию 28.12.2024

Подписана в печать 27.01.2025

Опубликована 20.03.2025

© Минаев И.В., 2025

The effect of laser microstructuring modes on Carbon concentration and the level of residual stresses in the surface layer of carbon steel products

Igor V. Minaev¹✉

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

✉ e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Abstract

The purpose of the work was to study the effect of laser microstructuring on changes in carbon concentration and zonal residual macro stresses of the first kind in the laser exposure zone of carbon steel sheet samples of grades 20, 35, 45 after laser microstructuring according to various modes.

Methods. Structural carbon steels of grades 20, 35, and 45 were selected as objects of research. 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 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. X-ray diffraction studies to determine the carbon content, sign, and level of residual stresses of the first kind (macro stresses) were performed using a DRON-4.0 X-ray diffractometer in cobalt Ka radiation in the discrete point survey mode.

Results. Using the method of X-ray diffraction phase analysis, an increase in the carbon content in the surface layer of samples after laser microstructuring of medium-carbon steels of grades 35 and 45 was revealed, significantly exceeding the values established by GOST 1050-2013. The revealed increase in carbon concentration is probably related to the realization of the Soret effect (thermodiffusion) under conditions of exposure to high temperatures. It has been established that laser microstructuring of the working surfaces of medium-carbon steels of grades 34 and 45 leads to the formation of high zonal residual compression stresses (up to -2300...-3800 MPa). The obtained result indicates the positive effect of laser treatment on the mechanical properties of the surface layer.

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

Keywords: laser microstructuring; laser exposure zone; Carbon concentration; Soret effect; residual stresses.

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. The effect of laser microstructuring modes on carbon concentration and the level of residual stresses in the surface layer of carbon steel products. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(1):39–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-39-50>.

Received 28.12.2024

Accepted 27.01.2025

Published 20.03.2025

Введение

Лазерная обработка активно и успешно применяется в современном машиностроении при резке [1] и упрочнении [2] изделий из сталей и сплавов. К недостаткам лазерной резки [3] можно отнести высокую энергоемкость и недостаточно контролируемые параметры поверхности реза [4] в виде высокой шероховатости, грата, высоких напряжений в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ), приводящих к

формированию поверхностных трещин [5].

В последние годы начинает развиваться новое направление лазерного воздействия на стали и сплавы, предназначенное для снижения остаточных напряжений и шероховатости поверхности [5], а также создания контролируемых структур в упрочненных поверхностях стальных полуфабрикатов после лазерной резки.

Для этих целей начинают применять перспективное лазерное воздействие на стальные поверхности маломощными лазерами. Подобную обработку называют лазерным модифицированием [6] или лазерным микроstructuring (ЛМ) [7].

В результате подобной обработки в ЗЛВ наблюдается образование «белого» слоя (который характеризуется как мелко-игольчатый (бесструктурный) мартенсит) с повышенным (по сравнению с матрицей основного металла) содержанием углерода [5], микротвердостью [8] и уровнем остаточных напряжений, однако в научной литературе не имеется единого мнения о механизмах увеличения указанных характеристик поверхностного слоя. В связи с этим актуальной задачей является установление взаимосвязей указанного роста свойств с формированием микро-структуры ЗЛВ, образующейся в ходе ЛМ.

Целью работы являлось исследование влияния лазерного микроstructuring на изменение концентрации угле-

рода и зональных остаточных макро-напряжений первого рода в зоне лазерного воздействия образцов листовых углеродистых сталей марок 20, 35, 45 после лазерного микроstructuring по различным режимам.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны конструкционные углеродистые стали марок 20, 35, 45. Для исследования влияния лазерного микроstructuring 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) [5]. Резку осуществляли применением волоконного непрерывного лазера, снабженного оптической головкой производства IPG. В качестве вспомогательного газа использовали кислород. Режимы лазерной резки представлены в таблице 1 для каждой марки стали.

Таблица 1. Режимы лазерной резки образцов [5]

Table 1. Modes of laser cutting of samples [5]

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 произведено лазерное микроstructuring (ЛМ) кромок лазерного реза на всех образцах следующими режимами обработки: мощность лазера 1200 Вт, частота колебаний гальваносканера 50 Гц, линейная скорость перемещения полосы лазерного излучения относительно поверхности кромки образца 250 мм/мин.

После ЛМ рабочие поверхности образцов были подвергнуты рентгеноструктурному анализу с целью выявления изме-

нений химического и фазового состава, а также зональных остаточных макро-напряжений первого рода в ЗЛВ.

Рентгеноструктурные исследования с целью определения содержания углерода, знака и уровня остаточных напряжений первого рода (макронапряжений) проводили с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-4.0 в кобальтовом K_{α} -излучении в режиме дискретной съемки по точкам.

Для повышения достоверности полученных результатов съемку и ее анализ выполнили расчетом смещения двух наиболее близко расположенных и имеющих максимальную интенсивность дифракционных линий α -фазы (110) и (211).

Для определения содержания углерода предварительно строили тарировочный график зависимости $\Delta\theta = f(C)$ [9].

Для этого с помощью формулы (1) рассчитывали теоретические углы θ для линий тетрагональных дублетов мартенсита (101) и (110):

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left(H^2 + K^2 + L^2 \frac{a^2}{c^2} \right), \quad (1)$$

где c и a – параметры решетки мартенсита; λ – длина волны; H, K, L – индексы интерференции, равные произведению соответствующих индексов плоскости (hkl) на порядок отражения n ($H=nh, K=nk, L=nl$).

Для кобальтового излучения, использованного в данном исследовании, расчи-

тали теоретические углы θ для линий тетрагональных дублетов (110) и (101) при разных заданных содержаниях углерода (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2% C).

Параметры решетки мартенсита c и a в зависимости от содержания углерода рассчитывали по формулам [10]

$$c = 2,8664 + 0,118P, \quad (2)$$

$$a = 2,8664 - 0,015P, \quad (3)$$

где P – содержание углерода, %.

По рассчитанным углам θ определяли значения $\Delta\theta$ для линий (110) и (101) при разных содержаниях углерода и строили зависимость

$$\Delta\theta = \theta_{\{110\}} - \theta_{\{101\}} = f(P). \quad (4)$$

В результате были рассчитаны теоретические углы θ для линий тетрагональных дублетов (110) и (101) при разных заданных содержаниях углерода (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 % C) и построен график (рис. 1).

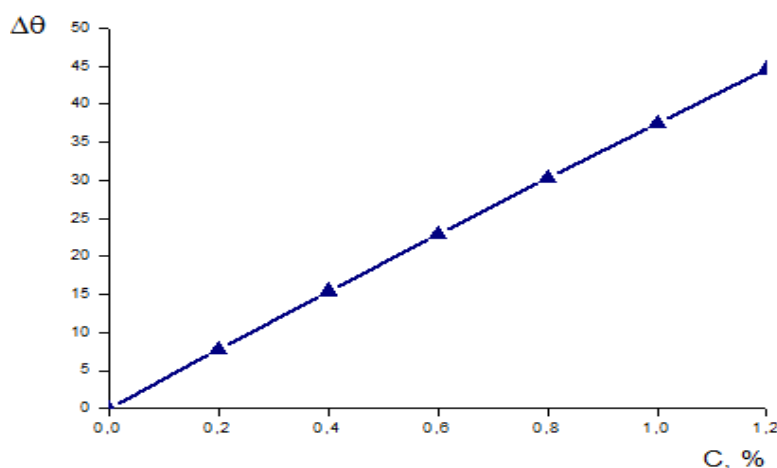


Рис. 1. График зависимости междублетного расстояния от содержания углерода (на примере стали марки 35)

Fig. 1. Graph of the dependence of the interblock distance on the carbon content (using the example of grade 35 steel)

Содержание углерода в исследуемых сталях определяли с помощью расчетов физического уширения. Физическое уширение β определяли как

$$\beta = \sqrt{B'^2 - B^2}, \quad (5)$$

где B' и B – ширина кривой распределения интенсивности на половине высоты максимума (полуширина) исследуемого образца и эталона.

За величины B' и B принимали ширину кривой распределения интенсивности на половине высоты максимума (полуширина) исследуемого образца и эталона соответственно. За эталон принимался отоженный образец. За междублетное расстояние принимали величину физического уширения.

Помимо определения содержания углерода в мартенсите образцов исследованных сталей марок 20, 35 и 45 после лазерного микроstructuring на этих же поверхностях определяли величину остаточных зональных макронапряжений первого рода. Для указанных целей применяли метод $\sin^2 \psi$ [11].

После съемки на дифрактометре величину остаточных напряжения рассчитывали по формуле

$$\sigma = E [(1 + \mu) \sin^2 \psi \cdot \sin \theta - \sin \theta \psi / \sin \theta \psi], \quad (6)$$

где μ – коэффициент Пуассона ($\mu = 0,3$); E – модуль упругости материала.

Значения модуля нормальной упругости E принимали: для стали 20 – $E = 212000$ МПа; для стали 35 – $E = 206000$ МПа; для стали 45 – $E = 200000$ МПа.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментальных исследований с использованием полук количественного химического анализа [5] было обнаружено увеличение содержания углерода в зоне лазерного воздействия образцов после ЛМ, величина которого колеблется в пределах, указанных в таблице 2.

Таблица 2. Содержание углерода в зоне лазерного воздействия углеродистых сталей марок 20, 35, 45 после лазерного микроstructuring

Table 2. Carbon content in the area of laser exposure of carbon steels grades 20, 35, 45 after laser microstructuring

Содержание углерода, мас. %	Марка стали		
	20	35	45
По данным полук количественного химического анализа*	1,30...2,08	1,21...3,35	1,46...4,21
По данным ГОСТ 1050-2013	0,24	0,40	0,50

*Данные о содержании углерода взяты из работы [5].

Для подтверждения увеличения содержания углерода в ЗЛВ провели рентгеноструктурный анализ.

Дифрактограммы исследованных участков сталей марок 20, 35, 45 после ЛМ, полученные в результате рентгеноструктурного анализа эталона и рабочих поверхностей образца, представлены на рисунках 2–4, а результаты расчета представлены в таблице 3.

На дифрактограммах сталей 35 и 45 идет наложение нескольких дифракционных линий. В меньшей степени это проявляется для стали 45. Для оценки нали-

чия в структуре поверхности исследованных сталей γ -фазы (аустенита) с использованием дифрактограмм и справочной литературы были рассчитаны межплоскостные расстояния дублетной линии ($d/n = \lambda / \sin 2\theta$, $\lambda_{Co} = 1,79021 \text{ \AA}$; $d/n = 1,79021 / \sin 2\theta$; $d/n = 1,79021 / \sin 2\theta$; $d/n = 2,068 \text{ \AA}$, что, согласно справочным данным, соответствует d/n линии (111) γ -фазы (аустенита) равной 2,07. По итогам расчетов дублетные линии на дифрактограммах сталей 35 и 45 были определены как линии (111) γ -фазы (остаточного аустенита).

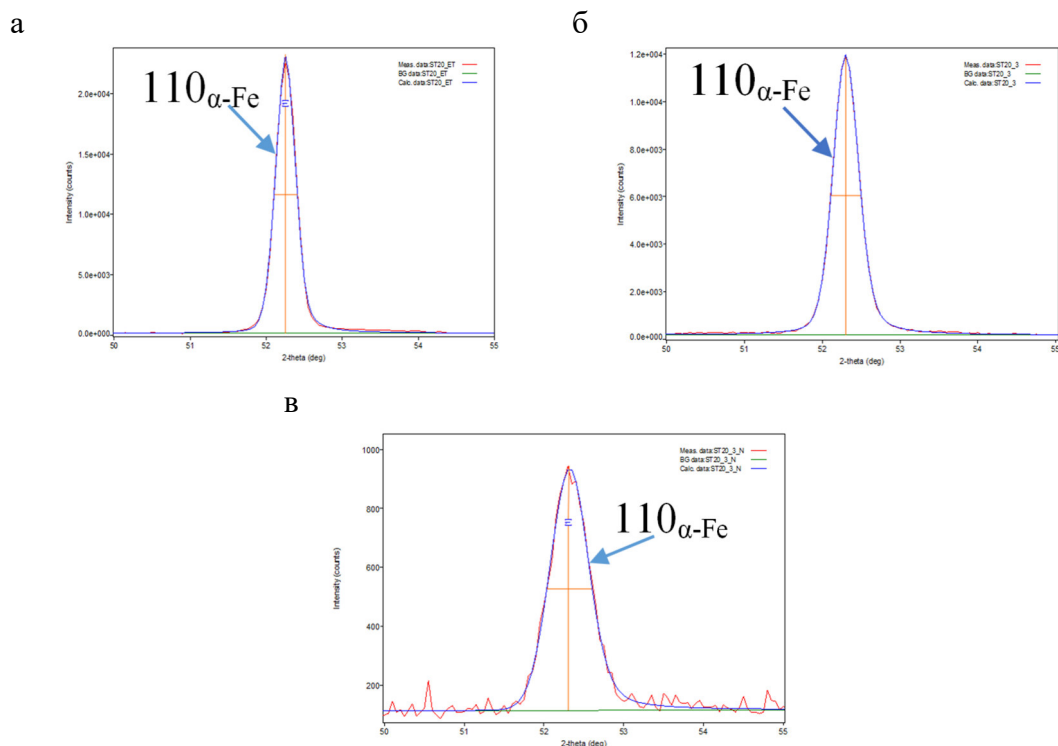


Рис. 2. Участки дифрактограмм эталона (а), стороны 3 после съемки при угле $\psi = 0^\circ$ (б) и угле $\psi = 45^\circ$ (в) исследуемого образца стали марки 20 после ЛМ

Fig. 2. Sections of the diffractograms of the standard (a); sides 3 after shooting at an angle of $\psi = 0^\circ$ (б) and $\psi = 45^\circ$ (в) of the studied steel sample grade 20 after laser microstructuring

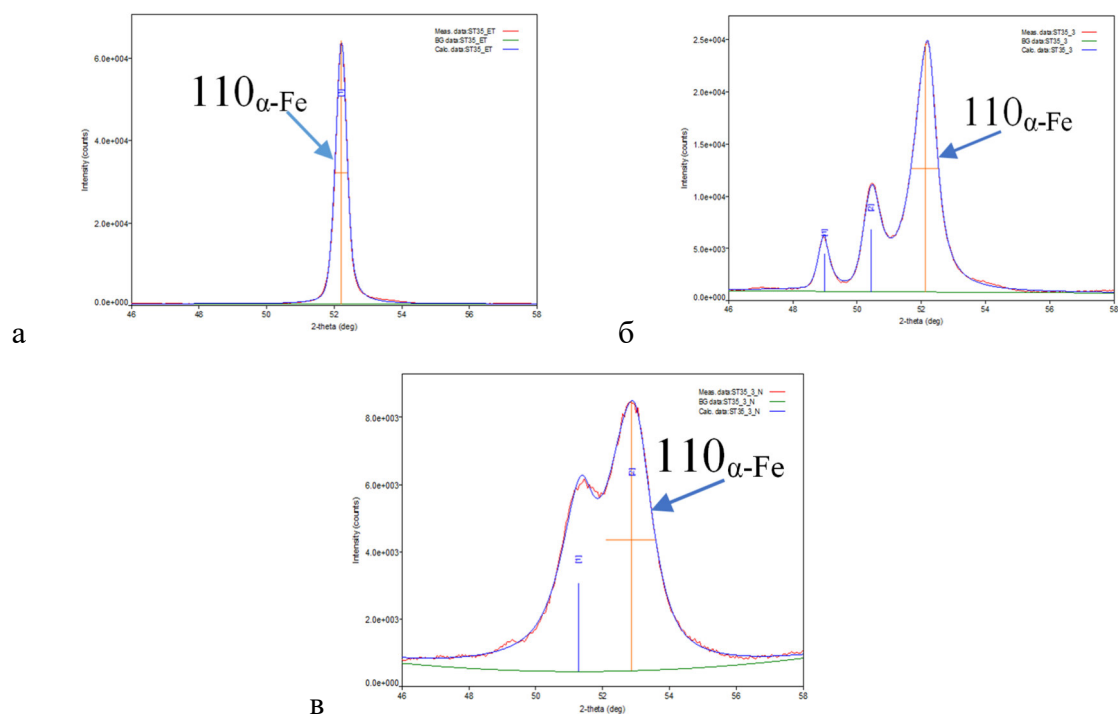


Рис. 3. Участки дифрактограмм эталона (а), стороны 3 после съемки при угле $\psi = 0^\circ$ (б) и угле $\psi = 45^\circ$ (в) исследуемого образца стали марки 35 после ЛМ

Fig. 3. Sections of the diffractograms of the standard (a), sides 3 after shooting at an angle of $\psi = 0^\circ$ (б) and $\psi = 45^\circ$ (в) of the studied steel sample grade 35 after laser microstructuring

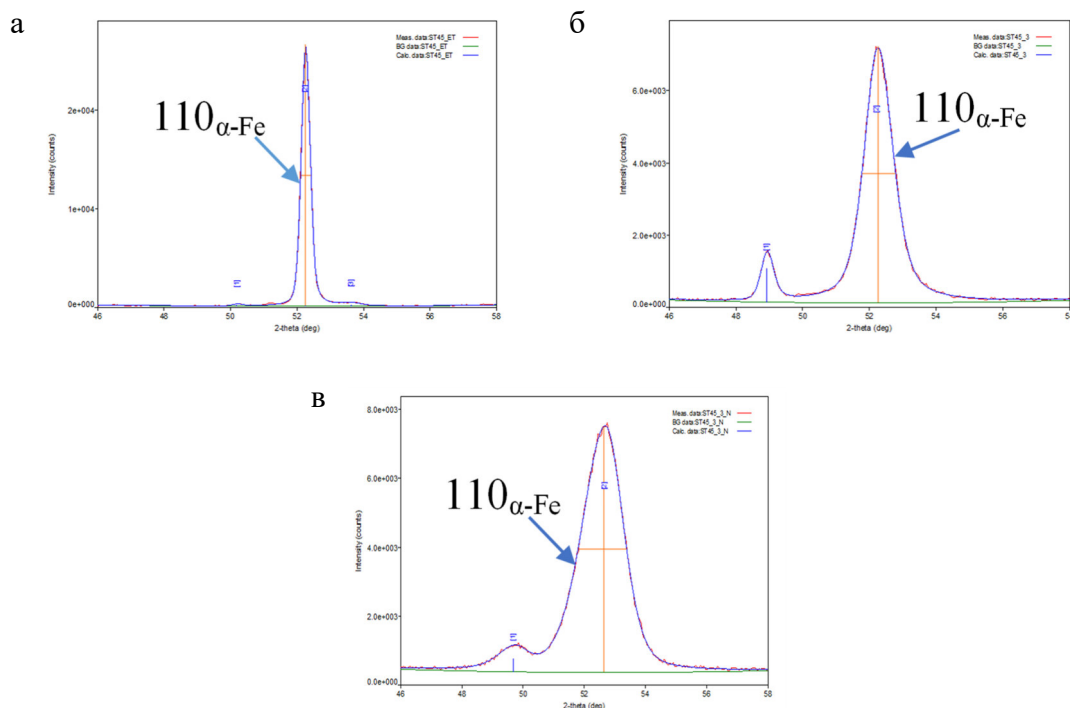


Рис. 4. Участки дифрактограмм эталона (а), стороны 3 (б) после съемки при угле $\psi = 0$ и $\psi = 45^\circ$ исследуемого образца стали марки 45 после ЛМ

Fig. 4. Sections of the diffractograms of the standard (a); sides 3 (б) after shooting at an angle of $\psi = 0$ and $\psi = 45^\circ$ of the studied steel sample grade 45 after laser microstructuring

Таблица 3. Полуширина линии $(110)_{\alpha\text{-Fe}}$ и рассчитанные концентрации углерода в пересыщенном твердом растворе $\alpha\text{-Fe}$ на плоскостях 3 и 4

Table 3. The half-width of the $(110)_{\alpha\text{-Fe}}$ line and the calculated carbon concentrations in a supersaturated $\alpha\text{-Fe}$ solid solution on planes 3 and 4

Маркировка плоскостей образца	Полуширина (FWHM), 2θ	Полуширина линии $(110)_{\alpha\text{-Fe}}$, мин	Физическое уширение линии $(110)_{\alpha\text{-Fe}}$	C, мас. %
Сталь 20				
ST20_ET	0,133	7,98	—	—
ST20_3	0,178	10,68	7,098	0,18
ST20_4	0,183	10,98	7,54	0,19
Сталь 35				
ST35_ET	0,179	10,74	—	—
ST35_3	0,406	24,36	21,86	0,55
ST35_4	0,411	24,66	22,198	0,57
Сталь 45				
ST45_ET	0,138	8,28	—	—
ST45_3	0,5045	30,27	29,116	0,77
ST45_4	0,5545	33,27	32,22	0,83

Из анализа представленных экспериментальных результатов видно, что ЛМ рабочих поверхностей стали марки 20 не привело к изменению концентрации углерода. Подобные результаты хорошо согласуются с имеющимися литературными данными [12] о сравнительно небольшой величине прокаливаемости малоуглеродистых сталей.

При ЛМ рабочих поверхностей среднеуглеродистых сталей марок 35 и 45 фиксировали рост содержания углерода в ЗЛВ как на предварительно шлифованных (поверхность 4), так и подвергнутых комбинированной (поверхность 3) обработке (лазерная резка с последующим лазерным микроструктурированием) поверхностях (см. табл. 3).

Полученный результат связывали с реализацией термодиффузии (эффект Ш. Соре [13]), характерной для скоростного высокотемпературного лазерного воздействия.

Термодиффузией (эффектом Соре) называют перенос компонент жидких или газовых смесей под действием градиента температуры. Если разность температур поддерживается постоянной, то вследствие термодиффузии в объеме смеси возникает градиент концентрации, что вызывает и обычную диффузию.

Поскольку резкий рост концентрации углерода до 0,55–0,57% (сталь 35) и 0,77–0,83% (сталь 45) против значений, определяемых ГОСТ 1050-2013, отмечен не только после лазерной резки, но и после механического шлифования, то его нельзя отнести к возможному массопереносу в жидкой фазе при лазерной резке и суммированию общего лазерного воздействия в ходе лазерной резки и ЛМ. Основное влияние, по-видимому, оказывает завершающая лазерная обработка – ЛМ. Она же и привела к формированию высоких сжимающих зональных макронапряжений в сталях марок 35 и 45 (табл. 4).

Таблица 4. Исходные данные и результаты расчета зональных макронапряжений по линии (110)

Table 4. Initial data and calculation results of zonal macro stresses along the line (110)

Марка стали	Угол съёмки 2θ , град		Угол съёмки θ , град		$\sin^2\psi$, град	σ , МПа
	$\psi = 0^\circ$	$\psi = 45^\circ$	$\psi = 0^\circ$	$\psi = 45^\circ$		
Сталь 20	52,267	52,292	26,1335	26,146	0,5	–144,96
Сталь 35	52,171	52,869	26,0855	26,4345	0,5	–3888,83
Сталь 45	52,212	52,65	26,106	26,325	0,5	–2379,25

Для объективного расчета по данным дифрактограмм линии (211) была выполнена процедура расчёта центра тяжести дифракционных максимумов. Значения

остаточных зональных напряжений на поверхностях образцов сталей марок 35 и 45 после ЛМ представлены в таблице 5.

Таблица 5. Исходные данные и результаты расчета зональных макронапряжений по линии (211)

Table 5. Initial data and calculation results of zonal macro stresses along the line (211)

Марка стали	Угол съёмки 2θ , град		Угол съёмки θ , град		$\sin^2\psi$, град	σ , МПа
	$\psi = 0^\circ$	$\psi = 45^\circ$	$\psi = 0^\circ$	$\psi = 45^\circ$		
Сталь 20	52,267	52,292	26,1335	26,146	0,5	–144,96
Сталь 35	99,8	100,0	49,9	50	0,5	–454,73
Сталь 45	99,55	99,68	49,775	49,84	0,5	–294,76

Несмотря на уменьшение величины остаточных макронапряжений сжатия у сталей 35 и 45 практически на один порядок при расчете их по линии (211) можно утверждать, что данные напряжения способствуют значительному увеличению прочности [5] поверхностного слоя образцов.

По мнению авторов работы [14], формирование остаточных сжимающих напряжений после лазерной обработки может быть связано с увеличением достаточно насыщенного углеродом мартенсита в процессе охлаждения и отсутствием остаточного аустенита [15], с ростом содержания которого объемный эффект за счет мартенситного превращения снижается и, как следствие, на поверхности стали после лазерной обработки преобладают растягивающие напряжения.

Таким образом, на основании вышеприведенных результатов можно утверждать, что лазерное микроструктурирование [16] является эффективным инструментом повышения качественных характеристик [17] поверхностного слоя [18], позволяющим получать изделия из конструкционных сталей, по своим свойствам [19] не уступающие изделиям, изготовленным с применением традиционных технологий термической обработки [20].

Выводы

1. С использованием метода рентгеноструктурного фазового анализа выявлено увеличение содержания углерода в поверхностном слое образцов после лазерного микроструктурирования среднеуглеродистых сталей марок 35 и 45, значительно превышающее значения, установленные ГОСТ 1050-2013. Выявленный рост концентрации углерода, вероятно, связан с реализацией эффекта Корре (термодиффузией) в условиях воздействия высоких температур. Максимальный рост концентрации углерода был достигнут в поверхностях, подвергнутых обработке в двух направлениях лазером мощностью 1400 и 1200 Вт поверхностей 2 и 3 с частотой развёртки 200 и 50 Гц соответственно.

2. Установлено, что лазерное микроструктурирование рабочих поверхностей среднеуглеродистых сталей марок 34 и 45 приводит к формированию высоких зональных остаточных макронапряжений сжатия (до $-2300...-3800$ МПа). Полученный результат свидетельствует о положительном воздействии лазерной обработки на механические свойства поверхностного слоя.

3. По результатам расчета межплоскостного расстояния дифракционной линии фазы, зафиксированной рядом с линией (110), можно заключить, что она с большой долей вероятности является линией γ -фазы (остаточного аустенита).

Список литературы

1. Особенности газолазерной резки углеродистых сталей: монография / И.В. Минаев, С.Н. Кутепов, А.Н. Сергеев, Д.С. Клементьев, И. В. Голышев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. 170 с.
2. Гаврилов Д.И., Жданов А.В., Беляев И.В. Влияние лазерной модификации поверхности на физико-механические и трибологические свойства штамповой стали // Ползуновский вестник. 2022. № 4-2. С. 14–18.
3. Ефимова М.В. Современное состояние проблемы обработки кромок деталей летательных аппаратов и перспективы ее решения // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: материалы Международной научно-практической конференции. СПб.: НИЦ МС, 2024. С. 51–53.

4. Закиров К.И. Прогрессивные технологии изготовления зубчатых колес // Современные перспективы развития гибких производственных систем в промышленном гражданском строительстве и агропромышленном комплексе: сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск: Университетская книга, 2024. С. 56–59.
5. 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>.
6. Влияние лазерной модификации на эксплуатационные характеристики стали Р6М5 / И.Н. Степанкин, Л.С. Верещагина, Е.П. Поздняков, О.Г. Девойно, П.В. Веремей // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2015. № 1(60). С. 19–26.
7. 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.
8. 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>.
9. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
10. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 134 с.
11. Новиков И.И., Строганов Г.Б., Новиков А.И. Металловедение, термообработка и рентгенография. М.: МИСИС, 1994. 480 с.
12. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Metallurgy, 1977. 646 с.
13. Чепак-Гизбрехт М.В. Эффекты Соре и Дюфура при лазерной обработке металлов // X Информационная школа молодого ученого: сборник научных трудов. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2022. С. 540–549.
14. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков (обзор) / С.В. Петроченко, Ц. Хао, С. Юй, К. Чжао // Омский научный вестник. 2024. № 1(189). С. 56–65.
15. Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Спиридонова М.М. Влияние параметров лазерного микроструктурирования на особенности строения зоны лазерного воздействия деталей из стали марки 30ХГСА // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции. Курск: Университетская книга, 2024. С. 197–201.
16. Григорьянц А.Г., Казарян М.А. Лябин Н.А. Лазерная прецизионная микрообработка материалов. М.: Физматлит, 2017. 416 с.
17. Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Спиридонова М.М. Формирование качественных показателей поверхностного слоя деталей машин методами лазерной обработки // Фундаментальные основы механики. 2024. № 14. С. 141–146.
18. Верещагин М.Н., Целуева С.Н., Целуев М.Ю. Модифицирование поверхностных слоев металлических деталей импульсной лазерной обработкой // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 99–109.

19. Лазерное термоупрочнение колес зубчатых, изготовленных из порошковых материалов / Д.А. Разин, И.С. Печников, К.А. Фролов, А.Б. Люхтер // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24, № 4. С. 323–330.

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

Reference

1. Minaev I.V., Kutepov S.N., Sergeev A.N., Klementyev D.S., Golyshev I. V. Features of carbon steel laser cutting. Tula: TulGU; 2024. 170 p. (In Russ.)

2. Gavrilov D.I., Zhdanov A.V., Belyaev I.V. The effect of laser surface modification on the physico-mechanical and tribological properties of stamped steel. *Polzunovskiy vestnik = Polzunovsky bulletin*. 2022;(4-2):14–18. (In Russ.)

3. Efimova M.V. The current state of the problem of processing edges of aircraft parts and the prospects for its solution. In: *Mashiny, agregaty i protsessy. Proektirovanie, sozдание i modernizatsiya: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Machines, aggregates and processes. Design, creation and modernization: proceedings of the International scientific and practical conference*. St. Petersburg: NIC MS, 2024. P. 51–53. (In Russ.)

4. Zakirov K.I. Progressive technologies for manufacturing gears. In: *Sovremennye perspektivy razvitiya gibkikh proizvodstvennykh sistem v promyshlennom grazhdanskom stroitel'stve i agropromyshlennom komplekse: sbornik nauchnykh statei 2-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrrov i bakalavrov = Modern prospects for the development of flexible production systems in industrial civil engineering and the agro-industrial complex: collection of scientific articles of the 2nd All-Russian scientific and technical conference of young scientists, graduate students, masters and Bachelors*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2024. P. 56–59. (In Russ.)

5. Minaev I.V., Kutepov S.N., Klementyev D.S., Zhurba D.V., Golyshev I.V. Surface microstructuring of hot-rolled carbon structural steels under complex laser radiation exposure. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(2):8–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-2-8-21>.

6. Stepankin I.N., Vereshchagina L.S., Pozdnyakov E.P., Devoino O.G., Veremey P.V. The effect of laser modification on the performance characteristics of P6M5 steel. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo = Vestnik P.O. Sukhoi State Technical University*. 2015;(1):19–26. (In Russ.)

7. Afanasyeva L.E., Tretyakov S.A., Ivanova A.I., Grechishkin R.M. Laser microstructuring of the steel surface. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening technologies and coatings*. 2018;14(163):297–302. (In Russ.)

8. Kutepov S.N., Klementyev D.S., Spiridonova M.M. Ensuring the quality of the surface layer of parts made of 30KhGSA grade steel by laser microstructuring. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):18–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-18-33>.

9. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. Radiographic and electron-optical analysis. Moscow: MISIS; 2002. 360 p. (In Russ.)

10. Mirkin L.I. X-ray diffraction control of machine-building materials. Moscow: Mashinostroenie; 1979. 134 p. (In Russ.)

11. Novikov I.I., Stroganov G.B., Novikov A.I. Metallovedenie, heat treatment and radiography. Moscow: MISIS; 1994. 480 p. (In Russ.)
12. Gulyaev A.P. Metallovedenie. Moscow: Metallurgiya; 1977. 646 p. (In Russ.)
13. Chepak-Gizbrecht M.V. Soret and Dufour effects in laser metalworking. In: *X Informatsionnaya shkola molodogo uchenogo = X Information School of a Young scientist: collection of scientific papers*. Yekaterinburg: Izd-vo UPI; 2022. P. 540–549. (In Russ.)
14. Petrochenko S.V., Hao C., Yu S., Zhao K. Evaluation of the influence of the parameters of the laser quenching mode on the quality of the surface and surface layer of machine parts (review). *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2024;(1):56–65. (In Russ.)
15. Kutepov S.N., Klementyev D.S., Spiridonova M.M. The influence of laser microstructuring parameters on the structural features of the laser impact zone of 30KHGSA steel parts. In: *Sovremennoe perspektivnoe razvitie nauki, tekhniki i tekhnologii: sbornik nauchnykh statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsi = Modern perspective development of science, technology and technology: collection of scientific articles of the 2nd international scientific and technical conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2024. P. 197–201. (In Russ.)
16. Grigoryants A.G., Kazaryan M.A., Lyabin N.A. Laser precision micro-processing of materials. Moscow: Fizmatlit; 2017. 416 p. (In Russ.)
17. Kutepov S.N., Klementyev D.S., Spiridonova M.M. Formation of qualitative indicators of the surface layer of machine parts by laser processing methods. *Fundamental'nye osnovy mekhaniki = Fundamental principles of Mechanics*. 2024;(14):141–146. (In Russ.)
18. Vereshchagin M.N., Tseluyeva S.N., Tseluyev M.Y. Modification of surface layers of metal parts by pulsed laser treatment. *Lit'e i metallurgiya = Casting and Metallurgy*. 2020;(1):99–109. (In Russ.)
19. Razin D.A., Pechnikov I.S., Frolov K.A., Liuchter A.B. Laser thermal hardening of gear wheels made of powder materials. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering research*. 2023;24(4):323–330. (In Russ.)
20. Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Kornienko O.Yu., Stepanov S.I. Induction and laser heat treatment of steel products. Yekaterinburg: Izd-vo Ural feder. un-ta im pervogo Prezidenta Rossii B.N. Yeltsina; 2022. 92 p. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

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

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