

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 26. Выпуск 4.

УДК: 004.942:535.872:621.373.826

DOI: 10.22405/2226-8383-2025-26-4-521-534

Моделирование энергетического воздействия при лазерном микроструктурировании изделий из углеродистых сталей¹

И. В. Минаев, А. Н. Чуканов, Д. В. Журба, И. В. Голышев,
С. Н. Кутепов, Д. С. Клементьев, Е. В. Цой

Минаев Игорь Васильевич — кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Научно-производственное предприятие «ТЕЛАР»» (г. Тула).

e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Чуканов Александр Николаевич — доктор технических наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Журба Данила Владимирович — аспирант, Национальный исследовательский университет ИТМО (г. Санкт-Петербург).

e-mail: zhurba.danila306@yandex.ru

Голышев Иван Владимирович — ведущий инженер, ООО «Научно-производственное предприятие «ТЕЛАР»» (г. Тула).

e-mail: Ivan.golyshev@gmail.com

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Клементьев Денис Сергеевич — Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Цой Евгений Владимирович — Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: tsoyev@tsput.ru

Аннотация

В статье описана методика моделирования в программной среде *COMSOL* (ПК *COMSOL Multiphysics*) энергетических параметров лазерного воздействия, позволяющего без разрушения поверхностного слоя оптимизировать микроструктуру и повысить физико-механические свойства рабочих поверхностей деталей из углеродистых сталей.

На основании теоретических представлений о механизмах основных процессов, определяющих энергетические характеристики воздействие лазерного излучения, были получены уравнения средней плотности энергии (энергетической дозы) лазерного излучения, температуры локального нагрева в центре пятна сканирования обрабатываемой поверхности, а также площади покрытия излучением в единицу времени и скорости её покрытия излучением, достаточной для изменения микроструктуры углеродистой стали без разрушения поверхностного слоя. На основании их экспериментальной апробации были разработаны режимы лазерного воздействия (микроструктурирования), обеспечившие возможность управления диффузией углерода из внутренних слоев детали к её рабочим поверхностям. Реализация разработанных режимов позволила сформировать структуру поверхностного

¹Работа выполнена при финансовой поддержке гранта правительства Тульской области в сфере науки и техники ДС/161 от 28.12.2024 г.

слоя с повышенным содержанием углерода и высокой твердостью без оплавления за счёт диффузии углерода из внутренних слоев к рабочим поверхностям изделий.

Результаты исследований послужили основой для оформления патента РФ на способ лазерной микрообработки сталей (RU 2 840 325 C1).

Ключевые слова: углеродистые стали, лазерное микроструктурирование, плотность энергии, площадь лазерного покрытия, твердость, остаточные напряжения.

Библиография: 18 названия.

Для цитирования:

Минаев И.В., Чуканов А.Н., Журба Д.В., Голышев И.В., Кутепов С.Н., Клементьев Д.С., Цой Е.В. Моделирование энергетического воздействия при лазерном микроструктурировании изделий из углеродистых сталей // Чебышевский сборник, 2025, т. 26, вып. 4, с. 521–534.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 26. No. 4.

UDC: 004.942:535.872:621.373.826

DOI: 10.22405/2226-8383-2025-26-4-521-534

Modeling of energy effects during laser microstructuring of carbon steel products

I. V. Minaev, A. N. Chukanov, D. V. Zhurba, I. V. Golyshev,
S. N. Kutepov, D. S. Klementyev, E. V. Tsoi

Minaev Igor Vasilyevich — candidate of technical sciences, general director of LLC Scientific and Production Enterprise “TELAR” (Tula).

e-mail: ivminaev1960@yandex.ru

Chukanov Alexander Nikolaevich — doctor of technical sciences, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: alexchukanov@yandex.ru

Zhurba Danila Vladimirovich — postgraduate student, ITMO National Research University, ITMO University (Saint Petersburg).

e-mail: zhurba.danila306@yandex.ru

Golyshev Ivan Vladimirovich — senior engineer, LLC Scientific and Production Enterprise “TELAR” (Tula).

e-mail: Ivan.golyshev@gmail.com

Kutepov Sergey Nikolaevich — candidate of pedagogical sciences, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Klementyev Denis Sergeevich — Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Tsoi Evgeny Vladimirovich — Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: tsoyev@tspu.ru

Abstract

The article describes a technique for modeling the energy parameters of laser exposure in the COMSOL software environment (COMSOL Multiphysics PC), which makes it possible to optimize the microstructure and improve the physics-mechanical properties of the working surfaces of carbon steel parts without destroying the surface layer.

Based on theoretical concepts of the mechanisms of the main processes that determine the energy characteristics of laser radiation exposure, equations of the average energy density (energy dose) of laser radiation, the temperature of local heating in the center of the scanning spot of the treated surface, as well as the area of radiation coverage per unit time and the rate of radiation coverage sufficient to change the microstructure of carbon steel without destruction of the surface layer.

Based on their experimental testing, laser exposure modes (microstructuring) were developed, which made it possible to control the diffusion of carbon from the inner layers of the part to its working surfaces. The implementation of the developed modes made it possible to form the structure of the surface layer with a high carbon content and high hardness without melting due to the diffusion of carbon from the inner layers to the working surfaces of the products.

The research results served as the basis for the registration of a patent of the Russian Federation for a method of laser micromachining of steels (RU 2 840 325 C1).

Keywords: carbon steels, laser microstructuring, energy density, laser coating area, hardness, residual stresses.

Bibliography: 18 titles.

For citation:

Minaev, I.V., Chukanov, A.N., Zhurba, D.V., Golyshev, I.V., Kutepov, S.N., Klementyev, D.S., Tsoi, E.V. 2025, "Modeling of energy effects during laser microstructuring of carbon steel products", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 26, no. 4, pp. 521–534.

1. Введение

В современной производственной практике широко используются различные виды лазерной обработки: резания, термического воздействия, структурирования и т.п. [1-4]. Они предназначены для изготовления, предварительной и финишной обработки деталей из углеродистых сталей путём направленного изменения микроструктуры их рабочих поверхностей для улучшения эксплуатационных характеристик [5,6].

Помимо этого, воздействие лазерного излучения применяют также для формирования заданных физико-механических свойств поверхностей (прочности, твёрдости, шероховатости, остаточных напряжений) изделий из сталей и сплавов путём создания в их поверхностях контролируемых структур (лазерного микроструктурирования - ЛМС) [7].

На сегодняшний день все положительные возможности метода лазерного микроструктурирования исполнительных кромок (рабочих поверхностей) деталей из углеродистых сталей используется недостаточно активно. Это объясняют отсутствием теоретически обоснованной и экспериментально апробированной методики моделирования и разработки энергетических и тепловых параметров поверхностного лазерного микроструктурирования [8].

Цель данной работы – моделирование в среде *COMSOL Multiphysics* [9] и экспериментальная апробация разработанных энергетических параметров лазерного микроструктурирования поверхностей стальных деталей для управляемого формирования микроструктуры высокой твёрдости [8].

Материал и методика испытаний. В работе моделировали технологический процесс лазерной микрообработки (лазерного микроструктурирования - ЛМС) поверхностей образцов углеродистых сталей [10]. В качестве объектов исследования использовали плоские образцы

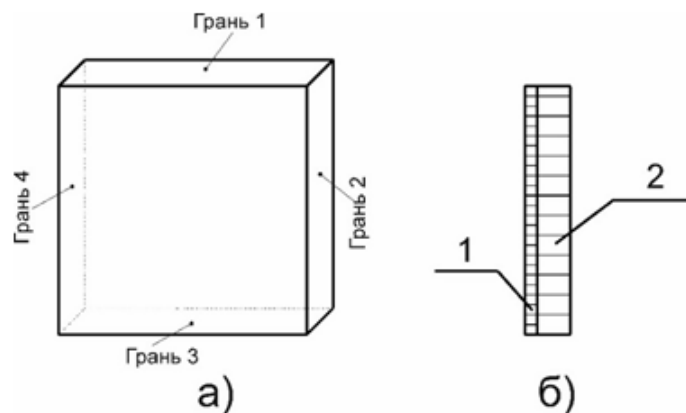


Рис. 1: Образец для исследования и его рабочие стороны/границы 1,2,3,4 (1 - зона лазерного воздействия; 2 - зона воздействия газовой струи)

горячекатаных углеродистых конструкционных сталей марок 20, 35, 45 толщиной от 2 до 4 мм и размером 35х35мм (рис. 1).

Образцы были изготовлены методом лазерной резки волоконным лазером (границы/стороны 1,2,3) и механической обработки (шлифованием) по одной из сторон (границы/сторона 4). После резки и механической обработки образцы подвергали поверхностному воздействию лазерного излучения непрерывным волоконным лазером по следующим режимам: мощность лазера 1200...2000Вт, развертка потока излучения в полосу (0,65х50мм) сканирующей системой *HZG-WOBD20* (КНР) и линейная подача полосы развертки в перпендикулярном направлении с частотой колебания зеркала гальванического сканатора 50...200 Гц.

Методика моделирования. Для ЛМС, как и для лазерной резки, характерны высокая скорость нагревания (от 10^3 до 10^6 градусов в секунду) и высокая скорость охлаждения (10^6 градусов в секунду и более) облучаемой детали за счёт скорости потока квантовых частиц излучения лазера ($\sim 3 \cdot 10^8$ м/с). При лазерном нагреве поверхности стали ввиду его локальности, а значит и большего градиента температур, высокие скорости охлаждения обеспечиваются за счёт электронной теплопроводности 10^5 – 10^6 и более градусов в секунду [11,12]. При подобных скоростях охлаждения можно термически закалять даже малоуглеродистые стали (например, сталь марки 20).

Наиболее высокие требования к лазерному излучению предъявляют при обработке материалов на микроуровне (при микрообработке). Эта технология широко применяется в радиоэлектронной промышленности и микроэлектронике.

В данной работе программное моделирование энергетических параметров ЛМС стальных изделий выполняли в многофункциональной среде *COMSOL Multiphysics* [9], предназначенной для решения инженерных и физическо-химических задач широкого круга явлений с использованием метода конечных элементов и систем дифференциальных уравнений в частных производных [13-15].

В качестве основных параметров, использованных в ходе моделирования лазерного микроструктурирования, принимали интенсивность излучения (или плотность мощности) лазерной энергии в единичном импульсе, дозу излучения (энергетическую экспозицию) и суммарную энергетическую экспозицию [13,16].

Плотность мощности излучения определяет способность лазера коагулировать и реализовывать абляцию материала. Её величину вычисляли по формуле (1.1):

$$\rho = P/S, \quad (1.1)$$

где ρ — плотность мощности (Вт/см²); P — мощность лазерного излучения (Вт); S — площадь

лазерного воздействия (см^2).

Энергетическую экспозицию D (дозу излучения, равную количеству энергии, полученному единичной площадью в течение одного импульса), выраженную в $\text{Дж}/\text{см}^2$, вычисляли по формуле (1.2):

$$D = P \cdot T / S, \quad (1.2)$$

где D - доза облучения ($\text{Дж}/\text{см}^2$); P - мощность лазерного излучения (Вт); T - время экспозиции (сек); S - площадь лазерного воздействия (см^2).

Энергетическая экспозиция отражает общее количество энергии, полученное участком кожи за все время лечения. Её вычисление производили по формуле (1.3):

$$E = P \cdot n \cdot t / S, \quad (1.3)$$

где E - средняя энергетическая экспозиция, ($\text{Дж}/\text{см}^2$); P - мощность лазерного излучения (Вт); n - число импульсов; t - длительность воздействия (сек).

Совместное использование при моделировании трёх перечисленных параметров, позволяет разработать унифицированные режимы лазерного микроструктурирования, обеспечивающие высокое качество обрабатываемых материалов при использовании одной и той же длины волны, даже при использовании различных лазерных установок.

При реализации моделирования учитывали процессы, характерные для быстротекущих термических процессов, имеющих место в ходе воздействия лазерного излучения длиной волны 1070 нм [11,12].

На первом этапе исследований по лазерной микрообработке был выполнен расчет пороговой плотности пиковой мощности процесса абляции (испарения) для углеродистых сталей, широко применяемых в современном производстве. Расчеты проводили по формуле (1.4), используемой во многих технологических работах, учитывающей основные теплофизические и оптические свойства материалов [5, 15].

$$\rho_n = (kT_u / 2A) \cdot (\sqrt{\pi} / \delta \tau), \quad (1.4)$$

где k - коэффициент теплопроводности; T_u - температура испарения (кипения); $A = 1 - R$ - коэффициент поглощения (R - коэффициент отражения); δ - коэффициент температуропроводности; τ - длительность импульса лазерного излучения.

Для непрерывных лазерных систем, применявшихся в работе, значение длительности импульсов для расчета по формуле (1.4) берется по полувысоте, т.к. импульс имеет форму, близкую к треугольной, и равно 10^{-8} с [5,16].

С другой стороны, для практической реализации работы, необходимо знать реальные значения мощности излучения лазерного воздействия. Для этого дополнительно использовали формулу расчета плотности мощности импульсного излучения (1.5) с учётом реальных режимов работы:

$$\rho_u = P_{\text{ср}} / f \cdot \tau \cdot S, \quad (1.5)$$

где $P_{\text{ср}}$ - средняя мощность лазерного излучения; f - частота повторения импульсов; τ - длительность импульсов излучения по полу высоте; $S = \pi d^2 / 4$ - площадь светового пятна сфокусированного лазерного пучка (d - диаметр светового пятна). Из формулы (1.5), зная ρ_n , определяется пороговая (минимальная) $P_{\text{ср}}$ лазерной системы, необходимая для микрообработки материала в режиме микроструктурирования (1.6):

$$P_{\text{ср}} = \rho_n \cdot f \tau \cdot \pi \cdot d^2. \quad (1.6)$$

При описанных параметрах ЛМС происходит диффузия углерода из внутренних слоев стального изделия к её поверхности (термодиффузия), обрабатываемой лазером, что позволяет получить мартенситную микроструктуру с увеличенным значением микротвердости по

сравнению с классической закалкой или лазерной резкой и создать на поверхности стали нетравящийся (коррозионностойкий) сверхтвёрдый слой.

Основанный на рассчитанных параметрах способ ЛМС рабочих поверхностей/сторон деталей из углеродистых сталей, включал взаимное непрерывное перемещение по оси Y сфокусированного светового пятна лазерного луча со скоростью $V_{ск} = 2500 \dots 10000$ мм/с с использованием кадровой строчной оптической развертки, равной предельному внешнему размеру исполнительной плоской кромки/стороны детали по оси Y , а по оси X детали, ориентированной плоской исполнительной кромкой в направлении к развертке. Площадь поглощения S лазерного излучения указанной поверхностью детали в единицу времени рассчитывали по формуле (1.7):

$$S = V_{лин} \cdot L_{разв} \cdot t, \text{ мм}^2 \quad (1.7)$$

где $V_{лин}$ – скорость перемещения детали по оси X ; $L_{разв}$ – длина развертки, мм; t – время обработки исполнительной плоской кромки.

Величину плотности потока энергии лазерного излучения W с длиной волны в диапазоне 1000 -1100 нм, одновременно воздействующего при равномерном распределении на обрабатываемую поверхность детали, рассчитывали по формуле (1.8) [5,15]

$$W = \frac{P \cdot t}{S} \cdot N = \frac{P \cdot t}{V_{лин} \cdot t \cdot L_{разв}} \cdot N = \frac{P}{V_{лин} \cdot L_{разв}} \cdot N, \text{ Дж/мм}^2, \quad (1.8)$$

где P – мощность лазерного излучения в диапазоне 1200...1400 Вт; $N=2$ (число проходов обработки по осям X и Y) [17].

Для достижения равномерного распределения по толщине поглощаемой энергии лазерного излучения температуру локального нагрева T исполнительной плоской кромки детали рассчитывали по формуле (1.9):

$$T \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q_0 (1 - R)}{k} \sqrt{\frac{2ar_0}{V_{ск}} + T_{нач}}, \quad (1.9)$$

где q_0 – падающая плотность мощности лазерного излучения, Вт/мм²; R – коэффициент отражения железа на длине волны 1,06 мкм, $V_{ск}$ – скорость сканирования, мм/с; r_0 – радиус лазерного пятна, мм; $T_{нач} = 20^\circ\text{C}$ (температура детали в помещении перед началом микроструктурирования), где $\alpha = k/\rho \cdot c$ – температуропроводность, k – теплопроводность железа, Вт/(м*К), ρ – плотность железа, кг/мм³, c – теплоемкость железа, Дж/(кг*К).

Рассчитанная таким образом температура локального разогрева создаёт условия для диффузии атомов углерода из внутренних слоев углеродистой стали к поверхности, формируя тем самым без разрушения на исполнительной плоской кромке микроструктурированный слой повышенной твердости с содержанием углерода в его поперечном сечении не менее 2 мас. %.

2. Экспериментальная апробация результатов моделирования

На базе проведённого моделирования в многофункциональной среде *COMSOL Multiphysics* были получены аналитические выражения (7 – 9) и выполнен расчет плотности энергии лазерного излучения, температуры локального нагрева обрабатываемой поверхности и площади покрытия излучением в единицу времени. Были разработаны режимы лазерного микроструктурирования поверхностей стальных деталей, позволяющие создать условия для управления микроструктурой повышения эксплуатационных характеристик их поверхностных слоёв [17].

Для проведения технологических операций ЛМС была разработана установка (рис. 2).

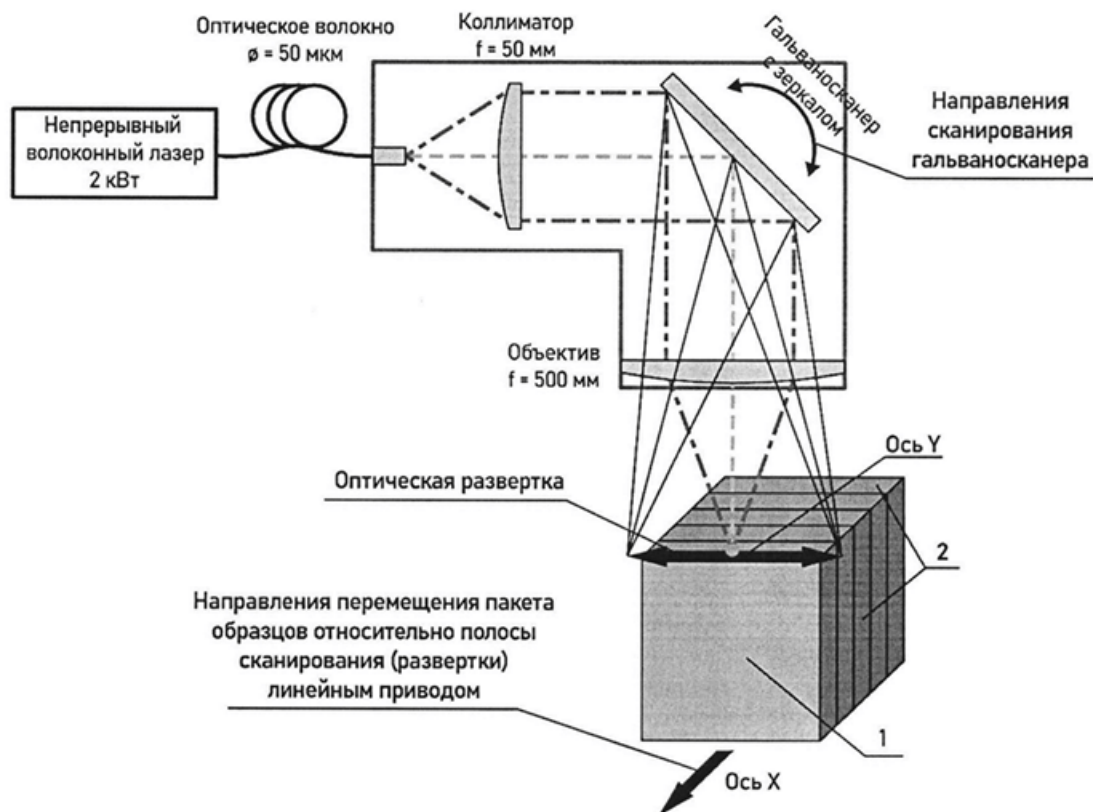


Рис. 2: Установка для лазерного микроструктурирования (ЛМС)

Обработку на установке микроструктурирования вели вблизи зоны фокусировки в соответствии с режимами, представленными в табл. 1 - 3.

Таблица 1: Режимы резки и ЛМС образцов стали 20 (толщина 2 мм)
Лазерное резание

Мощность: 400 Вт	Скорость: 2200 мм/мин	Фокус: +3	Диаметр сопла: 1мм	Давление: 1 атм	Вспомогательный газ: кислород
---------------------	--------------------------	--------------	--------------------------	--------------------	----------------------------------

Лазерное микроструктурирование:

	Сторона 1 Л	Сторона 2 Л	Сторона 3 Л	Сторона 4 Ш
Мощность (Вт):	1400	1400	1200	1200
Частота колебаний гальваносканатора (Гц):	200	200	50	50
Плотность заливки (площадь лазерного перекрытия), в %	87	87	87	87
Проходы по координатам <i>x-y</i>	+	+	+	+

(Л – сторона: лазерный рез, Ш – сторона: шлифованный металл)

Таблица 2: Режимы микроструктурирования заготовки из стали 45 (толщина 2мм)

	Сторона 1 Л	Сторона 2 Л	Сторона 3 Л	Сторона 4 Ш
Мощность (Вт):	1400	1400	1200	1200
Частота колебаний гальваносканатора (Гц):	200	200	50	50
Плотность заливки (площадь лазерного перекрытия), в %	87	87	87	87
Проходы по координатам $x-y$	+	+	+	+

(Л – сторона: лазерный рез, Ш – сторона: шлифованный металл)

Таблица 3: Режимы микроструктурирования образцов стали 35 (толщина 4мм)

	Сторона 1 Л	Сторона 2 Л	Сторона 3 Л	Сторона 4 Ш
Мощность (Вт):	1400	1200	1400	1200
Частота колебаний гальваносканатора (Гц):	200	50	200	50
Плотность заливки (площадь лазерного перекрытия), в %	87	87	87	87
Проходы по координатам $x-y$	+	+	+	+

(Л – сторона: лазерный рез, Ш – сторона: шлифованный металл)

На основании результатов моделирования и экспериментальной апробации параметров плотности энергии излучения, температуры локального нагрева обрабатываемой поверхности и площади покрытия излучением в единицу времени были разработаны режимы 1 и 2 лазерной обработки, обеспечившие возможность управления диффузией углерода из внутренних слоев стали к рабочим поверхностям (кромкам), полученных лазерной резкой или механической обработкой, что позволило сформировать микроструктурированный слой повышенной твердости без разрушения (оплавления) за счет увеличения содержания углерода в его поперечном сечении в процессе поглощения обрабатываемой поверхности детали мощного потока лазерного излучения.

Параметры режимов: Режим 1: Мощность излучения $P=1400\text{Вт}$, Частота развертки $F_{\text{разв}} = 200\text{Гц}$, Площадь покрытия обрабатываемой поверхности по оси $X=83\%$, ширина развертки $L=50\text{ мм}$, Скорость подачи пакета образцов $V_{\text{лин}} = 17\text{ мм/с}$. Режим 2: Мощность излучения $P = 1200\text{Вт}$, Частота развертки $F_{\text{разв}} = 50\text{Гц}$, Площадь покрытия обрабатываемой поверхности по оси $X = 96\%$, ширина развертки $L=50\text{ мм}$, Скорость подачи пакета образцов $V_{\text{лин}} = 4\text{ мм/с}$.

Лазерное микроструктурирование (ЛМС) рабочих сторон деталей из углеродистых сталей проводили при диаметре сфокусированного светового пятна лазерного луча не менее 650 мкм. Для достижения технического результата ЛМС реализовывали при скорости подачи развертки лазерного луча по обрабатываемой поверхности 4...17 мм/с и скорости поглощения обрабатываемой поверхностью лазерного излучения не менее 150мм²/с.

Полученный моделированием распределение плотности мощности лазерного излучения в пятне на поверхности образца (профиль пучка) приведено на рис. 3.

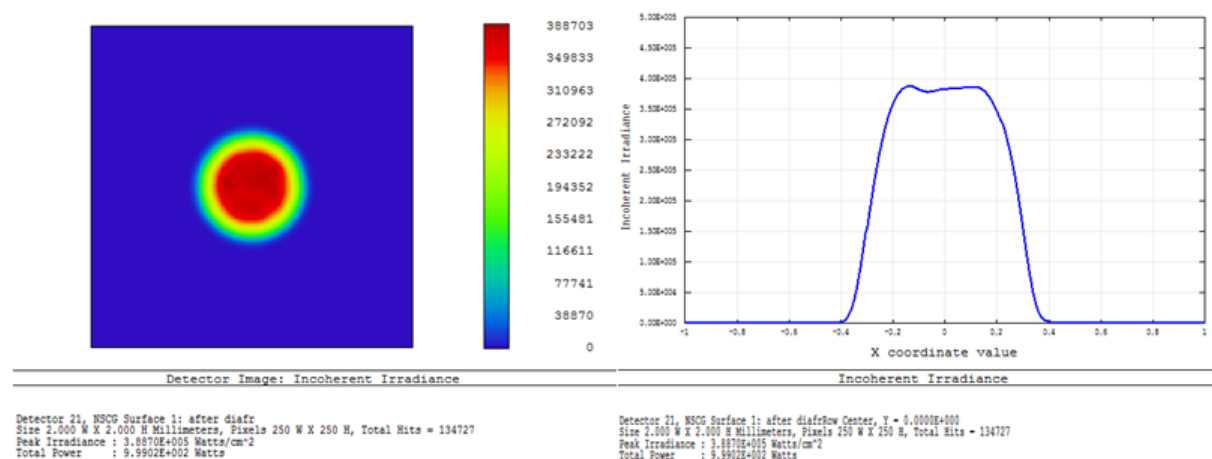


Рис. 3: Сглаженный профиль пучка в зоне обработки при уровне мощности 86%

3. Анализ результатов экспериментов

Микроструктуру образцов исследовали в поперечном сечении области лазерного воздействия после травления на оптическом микроскопе *Altami MET 1-C*.

Микроструктура в зоне поверхности на всех образцах условно состоит из двух частей (направленные от поверхности к основному металлу):

- тонкий слаботравящийся или нетравящийся слой;
- зона термического влияния.

Микротвердость по Виккерсу определялась в зоне газолазерного термического влияния (ЗГЛТВ) в соответствии с ГОСТ 2999-75 с помощью твердомера *KWB1-V* при нагрузке 0,5Н и выдержке под нагрузкой в течении 15 сек.

Результаты анализа структуры и микротвёрдости представлены в табл.4-6.

Таблица 4: Микротвердость и содержание углерода в образцах стали 20

	Нетравящийся слой / Глубина ЗГЛТВ	Мартенситная структура / Глубина ЗГЛТВ	Переходная область в основной металл
Лазерная резка	нет	340 <i>HV</i> 120 мкм	300...120 <i>HV</i> 170 мкм
ЛМС стороны лазерного реза 200 Гц, 1400Вт	нет	282...263 <i>HV</i> 100...244 мкм	150...140 <i>HV</i>
ЛМС стороны шлифованной поверхности 50 Гц, 1200Вт	нет	510...464 <i>HV</i> 30...500 мкм	245...210 <i>HV</i>
Содержание углерода в поверхностном слое на глубине 0,5 мм, мас. %	2,08...2,06	1,62...1,30	1,10...0,20

Таблица 5: Микротвердость и содержание углерода в образцах стали 35

	Нетравящийся слой / Глубина ЗГЛТВ	Мартенситная структура / Глубина ЗГЛТВ	Переходная область в основной металл
Лазерная резка	480...470 <i>HV</i> 20 мкм	360...350 <i>HV</i> 110 мкм	190...140 <i>HV</i> 110 мкм
ЛМС стороны лазерного реза 200 Гц, 1400Вт	702...676 <i>HV</i> 20 мкм	628...584 <i>HV</i> 200...280 мкм	220...190 <i>HV</i>
ЛМС стороны шлифованной поверхности 50 Гц, 1200Вт	605...545 <i>HV</i> 50...240 мкм		220...190 <i>HV</i>
Содержание углерода в поверхностном слое на глубине 0,3 мм, мас. %	3,35...3,21	2,67...1,83	1,21...0,35

Таблица 6: Микротвердость и содержание углерода в образцах стали 45

	Нетравящийся слой / Глубина ЗГЛТВ	Мартенситная структура / Глубина ЗГЛТВ	Переходная область в основной металл
Лазерная резка	480...470 <i>HV</i> 23 мкм	380...370 <i>HV</i> 110 мкм	200...150 <i>HV</i> 140 мкм
ЛМС стороны лазерного реза 200 Гц, 1400Вт	791...759 <i>HV</i> 15...25 мкм	605...545 <i>HV</i> 75...120 мкм	290...230 <i>HV</i>
ЛМС стороны шлифованной поверхности 50 Гц, 1200Вт	824...759 <i>HV</i> 60...200 мкм		290...230 <i>HV</i>
Содержание углерода в поверхностном слое на глубине 0,2 мм, мас. %	4,21...2,06	3,87...2,12	1,68...0,45

Реализация описанных режимов приводит к миграции углерода из внутренних слоев углеродистой стали к поверхности. При этом содержание углерода в поперечном сечении микроструктурированного слоя может составлять 2-5 мас. %.

Наличие высокой концентрации атомов углерода в микроструктурированной поверхностном слое образцов исследованных сталей марок 20, 35 и 45 было подтверждено исследованиями с использованием метода рентгеноструктурного фазового анализа [18].

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 $K\alpha$ -излучении в режиме дискретной съемки по точкам. Полученная на поверхностях образцов концентрация углерода значительно превышала значения, установленные ГОСТ 1050-2013.

На основании выполненных расчётов и их экспериментальной апробации был разработан и запатентован «Способ лазерного микроструктурирования исполнительный плоской кромки деталей из углеродистой стали» (патент RU 2 840 325 C1).

4. Заключение

В результате проведённых исследований установлено следующее:

- На основе моделирования в программной среде *COMSOL* (ПК *COMSOL Multiphysics*) были получены и экспериментально апробированы формулы расчета средней плотности энергии (энергетической дозы) излучения, температуры в центре пятна сканирования и скорости покрытия площади излучением достаточной для изменения микроструктуры углеродистой стали без разрушения поверхностного слоя.
- Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют об общем положительном воздействии лазерного микроструктурирования на микроструктуру и механические свойства (микротвёрдость) поверхностного слоя образцов.
- Выявленный в результате ЛМС рост концентрации углерода в поверхностных слоях исследованных сталей, связывали с реализацией эффекта термодиффузии (эффект Корре) в условиях кратковременного воздействия высоких температур при лазерном нагреве.
- Было установлено, что ЛМС рабочих поверхностей углеродистых сталей марок 20,35 и 345 приводит к формированию на них высоких зональных остаточных макронапряжений сжатия (до $-2300 \dots -3800$ МПа) [17].
- На основании результатов выполненного моделирования и их экспериментальной апробации был разработан способ лазерного микроструктурирования рабочих исполнительных поверхностей деталей из углеродистых сталей, позволивший стабилизировать их эксплуатационные свойства (микротвёрдость) и увеличить их ресурс за счет формирования требуемой микроструктуры поверхностного слоя без его разрушения. На описанный способ был получен патент RU 2840325C1 [18].

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усов С. В. Промышленное применение физико-технических методов в производстве. — М.: Перо, 2021. — 283 с.
2. Минаев И. В., Клементьев Д. С., Кутепов С. Н., Агеева Е. В., Журба Д. В. Формирование упрочнённого поверхностного слоя при комплексном лазерном воздействии на кромку реза деталей из конструкционных углеродистых сталей и механических свойств поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 55–69.
3. 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, т. 2. — С. 14–18. — DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.002.
4. Войтович О. Н., Соколов И. О. Исследование влияния параметров лазерной термообработки на свойства упрочнённых поверхностных слоев // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2013. — № 2 (39). — С. 6–14.
5. Либенсон М. Н., Яковлев Е. Б., Шандыбина Г. Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Ч. 2: Лазерный нагрев и разрушение материалов: учебное пособие / под общ. ред. В. П. Вейко. — СПб.: НИУ ИТМО, 2014. — 181 с.

6. Вейко В. П. Лазерное микроформообразование (физические основы, применения, проблемы и перспективы) // Известия Академии наук. Серия физическая. — 2001. — Т. 65, № 6. — С. 864–870.
7. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. — СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. — 264 с.
8. Вейко В. П., Дышловенко С. С. Лазерное микроструктурирование поверхностей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2001. — Т. 1, № 4. — С. 119–128.
9. Среда COMSOL (ПК COMSOL Multiphysics) [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.comsol.com> (дата обращения: 01.01.2024).
10. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. — М.: Машиностроение, 2000. — 320 с.
11. Gamaly E. G. The physics of ultra-short laser interactions with solid at non relativistic intensities // Physics Reports. — 2011. — Vol. 508. — P. 91–243.
12. Dyukin R. V., Martsinovskiy G. A., Sergaeva O. N., Shandybina G. D., Svirina V. V., Yakovlev E. B. Interaction of Femtosecond Laser Pulses with Solids: Electron/Phonon/Plasmon Dynamics // Laser Pulses — Theory, Technology, and Applications / ed. by I. Peshko. — Rijeka: InTech, 2012. — P. 197–218.
13. Коздоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М.: Наука, 1975. — 240 с.
14. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1964. — 344 с.
15. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. — М.: Изд-во МГУ: Наука, 2004. — 656 с.
16. Амирханов И. В., Саркер Н. Р., Сархадов И. Численное моделирование лазерной абляции материалов // Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science. — 2020. — Т. 28, № 4. — С. 398–405. — ISSN 2658-4670.
17. Минаев И. В., Кутепов С. Н., Клементьев Д. С., Агеев Е. В. Влияние режимов лазерной обработки на изменение структуры и механических свойств поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2023. — Т. 13, № 1. — С. 73–86.
18. Минаев И. В., Журба Д. В., Голышев И. В., Клементьев Д. С., Сергеев А. Н., Малий Д. В. Способ лазерного микроструктурирования исполнительной плоской кромки деталей из углеродистой стали: пат. 2840325 Рос. Федерация. — № 2024132938; заявл. 01.11.2024; опубл. 21.05.2025, Бюл. № 15.

REFERENCES

1. Usov, S.V. 2021, *Industrial Application of Physics-Technical Methods in Production*, Moscow: Pero, 283 p.
2. Minaev, I.V., Klementyev, D.S., Kutepov, S.N., Ageeva, E.V., and Zhurba, D.V. 2023, "Formation of a hardened surface layer under complex laser action on the cutting edge of parts made of structural carbon steels and the mechanical properties of the surface layer of parts made of 30KHGSA steel", *Proceedings of the Southwestern State University. Series: Engineering and Technology*, 13(2), pp. 55–69.
3. Gavrilov, D.I., Zhdanov, A.V., and Belyaev, I.V. 2022, "The effect of laser surface modification on the physico-mechanical and tribological properties of stamped steel", *Polzunovskiy Vestnik*, 4(2), pp. 14–18, DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.002.
4. Voitovich, O.N., and Sokolov, I.O. 2013, "Investigation of the influence of laser heat treatment parameters on the properties of hardened surface layers", *Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2(39), pp. 6–14.
5. Libenson, M.N., Yakovlev, E.B., and Shandybina, G.D. 2014, *Interaction of Laser Radiation with Matter (Power Optics). Part II: Laser Heating and Destruction of Materials*, edited by Veiko, V.P., St. Petersburg: NRU ITMO, 181 p.
6. Veiko, V.P. 2001, "Laser microforming (physical foundations, applications, problems and prospects)", *Proceedings of the Academy of Sciences. Physical Series*, 65(6), pp. 864–870.
7. Schneider, Yu.G. 2001, *Operational Properties of Parts with Regular Microrelief*, St. Petersburg: SPb GITMO (TU), 264 p.
8. Veiko, V.P., and Dyshlovenko, S.S. 2001, "Laser microstructuring of surfaces", *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 1(4), pp. 119–128.
9. COMSOL. 2024, *COMSOL Environment (PC COMSOL Multiphysics)* [Online], Available at: <https://www.comsol.com>
10. Suslov, A.G. 2000, *The Quality of the Surface Layer of Machine Parts*, Moscow: Mashinostroyeniye, 320 p.
11. Gamaly, E.G. 2011, "The physics of ultra-short laser interactions with solid at non-relativistic intensities", *Physics Reports*, 508, pp. 91–243.
12. Dyukin, R.V., Martsinovskiy, G.A., Sergaeva, O.N., Shandybina, G.D., Svirina, V.V., and Yakovlev, E.B. 2012, "Interaction of Femtosecond Laser Pulses with Solids: Electron/Phonon/Plasmon Dynamics", in *Laser Pulses - Theory, Technology, and Applications*, edited by Peshko, I., Rijeka: InTech, pp. 197–218.
13. Kozdoba, L.A. 1975, *Methods for Solving Nonlinear Problems of Thermal Conductivity*, Moscow: Nauka, 240 p.
14. Janke, E., Emde, F., and Lösch, F. 1964, *Special Functions*, Moscow: Nauka, 344 p.
15. Akhmanov, S.A., and Nikitin, S.Y. 2004, *Physical Optics*, Moscow: MSU Publishing House: Nauka, 656 p.

16. Amirkhanov, I.V., Sarker, N.R., and Sarkhadov, I. 2020, “Numerical modeling of laser ablation of materials”, *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*, 28(4), pp. 398–405, ISSN 2658-4670.
17. Minaev, I.V., Kutepov, S.N., Klementyev, D.S., and Ageev, E.V. 2023, “The effect of laser processing modes on changes in the structure and mechanical properties of the surface layer of parts made of 30KHGSA steel”, *Proceedings of the Southwestern State University. Series: Engineering and Technology*, 13(1), pp. 73–86.
18. Minaev, I.V., Zhurba, D.V., Golyshev, I.V., Klementyev, D.S., Sergeev, A.N., and Maliy, D.V. 2025, “Method of laser microstructuring of executive flat edges of carbon steel parts”, *Patent of the Russian Federation*, 2840325.

Получено: 03.05.2025

Принято в печать: 17.10.2025