

УДК 621.373.8

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 45 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ

И. В. Царенко¹, В. Г. Кудрицкий², Д. М. Гуцев³

¹ К. т. н., доцент кафедры технологии машиностроения, автоматизации и робототехники, УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Гомель, Беларусь, e-mail: tsarenkoira@gstu.by

² Научный сотрудник отдела «Трение, смазка и эксплуатационная стойкость материалов», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», Гомель, Беларусь, e-mail: vladukas@mail.ru

³ К. т. н., доцент, заведующий сектором «Специальные смазочные материалы», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси», Гомель, Беларусь, e-mail: gucevd@mail.ru

Реферат

В статье дана характеристика особенностей морфологии поверхности стали после лазерной закалки. Изучено влияние технологических параметров, таких как сила тока, время импульса и энергия в импульсе на формирование морфологических особенностей стальной поверхности после лазерной закалки. Структурные особенности были изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Было установлено, что использование различных комбинаций технологических параметров (изменения силы тока в диапазоне от 60 до 180 А, времени импульса от 5 до 20 мс, энергии в импульсе в пределах от 0,3 Дж до 10,0 Дж) дает возможность получения большого разнообразия вариантов топографии поверхности стали после лазерной обработки, отвечающих разным триботехническим характеристикам структур: от пористых до ярко выраженных зон неравномерного оплавления, кристаллических дендритных и с хорошо упорядоченной упаковкой зерен.

Согласно результатам микроскопических исследований обработка с энергией до 1 Дж не приводит к нагреву с оплавлением поверхности: при обработке с энергией в импульсе менее 1 Дж токами менее 100 А топография поверхности после обработки отличается от первоначальной только появлением следов выхода на поверхность практически всех имеющихся в металле элементов. При обработке с энергией в импульсе более 1 Дж на поверхности наблюдаются зоны оплавления. Всего в структурах обработанных лазерным излучением образцов можно выделить четыре типа основных структурных элементов: зона без выраженных кристаллитов, зона роста дендритов, зона ярко выраженных кристаллитных структур, зона отслаиваемых образований.

В результате подробного спектрального анализа было обнаружено формирование отдельных гетерогенных мультиэлементных областей, причем была установлена зависимость интенсивности образования мультиэлементных зон от энергии в импульсе: чем выше энергия – тем больший объем металла подвергается тепловому воздействию и тем интенсивнее процесс образования этих зон. Несмотря на то, что энергию в импульсе определяют и сила тока накачки, и время импульса, было установлено, что влияние этих технологических факторов на свойства мультиэлементных зон неоднозначно. Увеличение силы тока способствует росту мультиэлементных зон, тогда как увеличение времени импульса способствует их отслаиванию. Было обнаружено, что когезия мультиэлементных областей зависит от режимов обработки. Особенно важным фактором для получения оптимальной структуры поверхности является время импульса. С увеличением времени выдержки импульса усиливается окисление поверхности, приводящее к ослаблению когезионных сил. Обработка импульсом более 15 мс приводит к массовому отслаиванию образовавшихся на поверхности мультиэлементных областей.

Ключевые слова: морфология поверхности, сталь, лазерная обработка, упрочнение, износостойкость.

MORPHOLOGICAL FEATURES OF STEEL 45 SURFACE AFTER LASER TREATMENT

I. V. Tsarenko, V. G. Kudrytski, D. M. Gutsev

Abstract

Characterization of morphological features of steel surface after laser treatment was done. Influence of basic technological parameters such as current, time, energy in laser beam for formation of morphological features of steel surface after laser treatment was studied. Structural features of steel surface after laser treatment were investigated by electron microscopy technique.

It was found that using various combinations of process parameters (current ranging from 60 to 180 A, pulse duration from 5 to 20 ms, and pulse energy from 0,3 J to 10,0 J) enables a wide variety of surface topographies to be achieved after laser treatment, corresponding to different tribological characteristics of structures: from porous to clearly defined zones of uneven melting, crystalline dendritic grains, and those with well-ordered grain packing.

According to microscopic studies, treatment with an energy of up to 1 J does not result in heating and surface melting. When treated with a pulse energy of less than 1 J and currents of less than 100 A, the post-treatment surface topography differs from the initial surface only by the appearance of traces of virtually all elements present in the metal emerging on the surface. When treated with a pulse energy greater than 1 J, melting zones are observed on the surface. Four types of main structural elements can be identified in the structures of laser-treated samples: a zone without distinct crystallites, a zone of dendrite growth, a zone of clearly defined crystallite structures, and a zone of exfoliated formations.

A detailed spectral analysis revealed the formation of individual heterogeneous multi-element regions, and a dependence was established between the intensity of multi-element zone formation and pulse energy: the higher the pulse energy, the greater the volume of metal subjected to thermal action and the more intense the formation of these zones. Although pulse energy is determined by both pump current and pulse duration, it was found that the influence of these process factors on the properties of multi-element zones is ambiguous. Increasing current promotes the growth of multi-element zones, while increasing pulse duration promotes their exfoliation. It was found that the cohesion of multi-element regions depends on the processing conditions. Pulse duration is a particularly important factor for achieving an optimal surface structure. Increasing the pulse exposure time intensifies surface oxidation, weakening cohesive forces. Pulse durations longer than 15 ms lead to massive exfoliation of the multi-element regions formed on the surface.

Keywords: surface morphology, steel, laser treatment, hardening, wear resistance.

Введение

Повышение износостойкости поверхности традиционно остаётся одной из ключевых задач машиностроительных технологий [1]. На сегодняшний день существует огромный арсенал технологий,

направленных на повышение износостойкости: легирование специальными дорогостоящими материалами, объёмная или поверхностная ТВЧ закалка, наплавка высокотвёрдыми износостойкими материалами с последующей механообработкой, химико-термическая

Машиностроение

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-139-1-145-152>

обработка, как, например, хромирование, азотирование или цементация поверхности и т. д. [2–4] Эти процессы широко известны, и в определённой степени повышают износостойкость и срок службы деталей. Однако они достаточно трудоёмки, энерго- и материалоемки, имеют продолжительный технологический цикл [5, 6].

Среди методов упрочнения поверхности особое место принадлежит лазерной закалке. Эффекта воздействия на металлическую поверхность, который достигается с помощью лазерного луча, невозможно достичь никаким другим методом обработки. [7]. Лазерный луч, являясь высококонцентрированным источником энергии, обеспечивает широкие возможности управления термическими процессами, протекающими в поверхностном слое металла при облучении. Это позволяет целенаправленно придавать поверхности необходимые физико-механические свойства за счет изменения структуры, химического и фазового состава [8, 9]. Технология лазерного упрочнения дает возможность повысить износостойкость и срок службы деталей без применения дорогостоящих расходных материалов, без необходимости трудоемких и энергоемких подготовительных и последующих доводочных операций, так как может производиться без нарушения макро- и микрогеометрии поверхности детали, отличается коротким технологическим циклом, оперативностью выполнения работ, относительно низкой удельной энерго-трудо-материалоемкостью и, соответственно, низкой стоимостью. А благодаря локальности воздействия может обрабатываться не вся деталь, а только ее быстроизнашивающиеся участки [10, 11].

Несмотря на большое количество исследований лазерной обработки стали 45 наличие большого количества противоречивых мнений

(предположения о насыщении жидкого металла азотом, о влиянии азота атмосферы, о формировании микрообъемных зон нагрева чрезвычайно метастабильного состояния) говорит о многогранности характера лазерного упрочнения и перспективности его дальнейшего изучения [12, 13].

Цель данной работы – оценить влияние технологических параметров процесса лазерной обработки поверхности стали на морфологию полученных в результате лазерной закалки структур, что позволит разработать полезные рекомендации для получения максимальных параметров износостойкости с помощью лазерной обработки.

Материалы и методика эксперимента

Лазерной закалке подвергали образцы из стали 45, химический состав которой, согласно ГОСТ 1050-2013, представлен в таблице 1.

Обработку лазерным импульсом проводили на экспериментальной лазерной технологической установке на базе твердотельного лазера TL-400, представленной на рисунке 1 а. Установка является конструкторской разработкой ГГУ имени Ф. Скорины (г. Гомель) [14–16]. Оптическая схема установки позволяет изменять диаметр пятна лазерного пучка в зоне обработки от 0,1 до $3 \cdot 10^{-3}$ м. Лазерное излучение в излучателе генерируется в кристаллах АИГ: Nd³⁺. Длина волны излучения – 1,064 мкм, максимальное значение средней мощности – 400 Вт. Размер активных элементов – $6,3 \times 130 \times 10^{-3}$ м. Диаметр лазерного пучка на выходе из резонатора 6×10^{-3} м. Для обеспечения необходимого температурного режима работы активных элементов использовалось водяное охлаждение. Процесс лазерной обработки представлен на рисунке 1 б.

Таблица 1 – Химический состав в % стали 45

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
около 97	0,42–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	до 0,08



Рисунок 1 – Лазерная установка (а) и процесс лазерной обработки (б)

Топография поверхности изучалась на растровом электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan, Чехия) при увеличении от 100 до 5000 крат. Элементный анализ проводился методом EDX (энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии) на этом же микроскопе с использованием приставки INCA X-act (Oxford Instruments, Англия).

Энергия лазера в импульсе определялась с помощью измерителя энергии ИКТ1-Н.

Триботехнические испытания проводились с помощью микро-трибометра MTU-2K7 (ИММС НАН Беларуси, Гомель) [17–19] по схеме возвратно-поступательного движения сферы-контртела относительно плоскости исследуемого образца. Прибор обеспечивает измерение сил (коэффициента) трения пары сфера/плоскость в автоматическом режиме. Испытания проводились при нормальной нагрузке 500 mN, линейной скорости 2,5 мм/с, длине единичного хода 5 мм.

Результаты исследований

Изменение силы тока в диапазоне от 60 до 180 А и времени импульса от 5 до 20 ms позволило варьировать энергию в импульсе в пределах от 0,3 Дж до 10,0 Дж (таблица 2) и получить большое разнообразие вариантов топографии поверхности стали после лазерной обработки, отвечающих разным триботехническим характеристикам [20].

Таблица 2 – Зависимость энергии в импульсе E (Дж) от времени импульса τ (ms) и тока накачки I (А)

Ток накачки, I (А)	Энергия в импульсе E (Дж) в зависимости от времени импульса τ (ms)				
	5	10	15	20	25
60	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2
120	0,8	1,4	2,0	3,5	4,1
180	2,5	4,0	6,0	8,0	10,0

На рисунке 2 представлены фотографии поверхности образцов до (рисунок 2 а) и после лазерной обработки различными режимами (рисунок 2 б–к).

На сегодняшний день структурные изменения, происходящие при лазерной закалке стали 45 достаточно хорошо изучены. Как правило, ее исходная равновесная структура состоит из примерно одинакового количества феррита и перлита. В момент импульса лазерного излучения происходит полная фазовая перекристаллизация с образованием аустенита. Но степень его гомогенизации

зависит от времени теплового воздействия. Сразу после прекращения лазерного импульса начинается охлаждение нагретого объема. Тепло главным образом отводится вглубь детали. Вследствие высокой теплопроводности металлов и с учетом того, что нагретый объем составляет незначительную часть всего изделия скорость отвода тепла (скорость охлаждения) оказывается выше критической скорости закалки и, таким образом, при лазерном упрочнении не требуется принудительное охлаждение, так как происходит автозакалка.

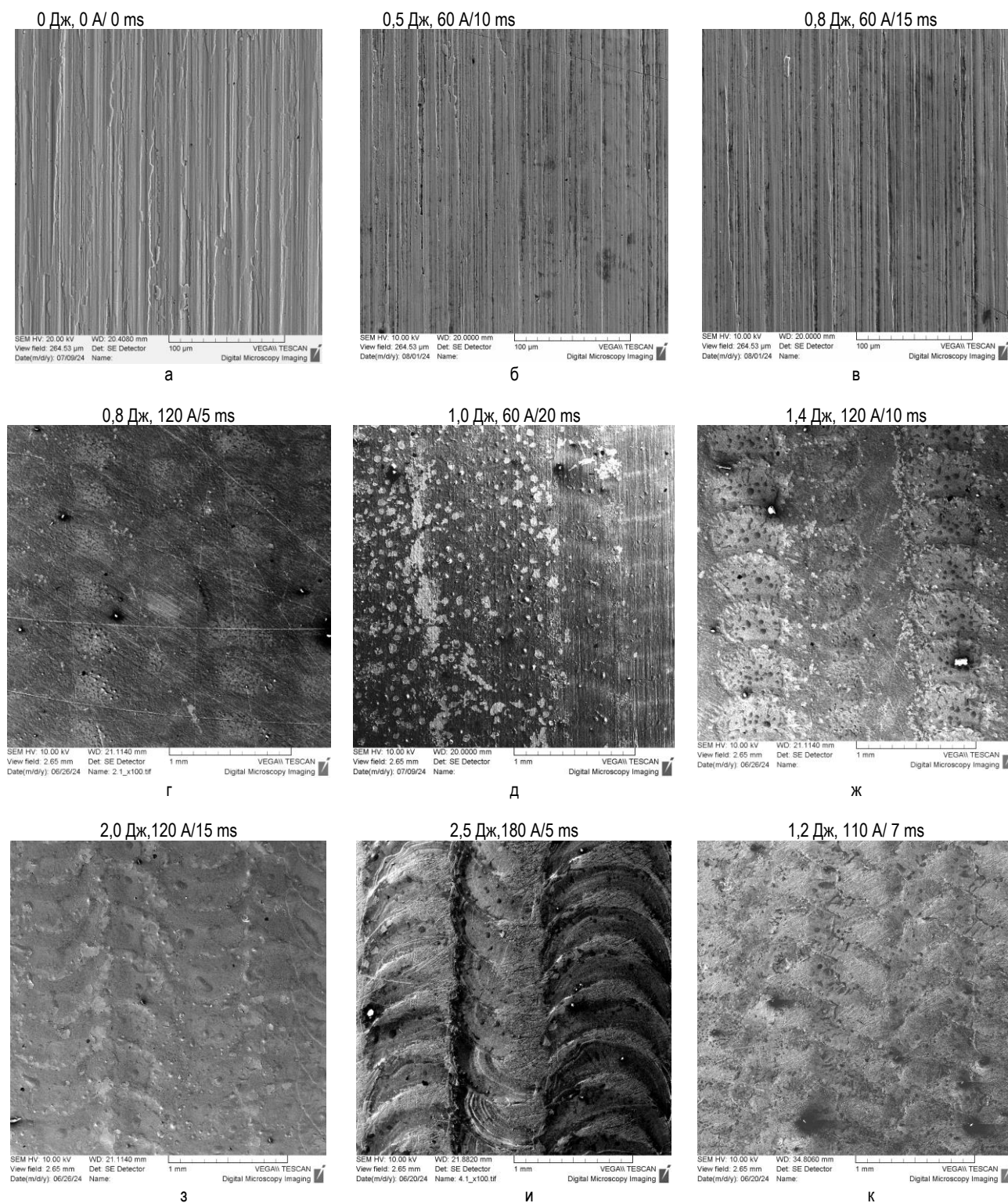


Рисунок 2 – Фотографии поверхности образцов до и после лазерной обработки различными режимами

Как показывают результаты микроскопических исследований обработка с энергией до 1 Дж не приводит к нагреву с оплавлением поверхности (рисунок 3). При обработке с энергией в импульсе менее 1 Дж токами менее 100 А топография поверхности после обра-

ботки отличается от первоначальной только появлением следов выхода на поверхность практически всех имеющихся в металле элементов (на рисунке 3 б и 3 в они, как показали спектральные исследования, отображаются темными пятнами).

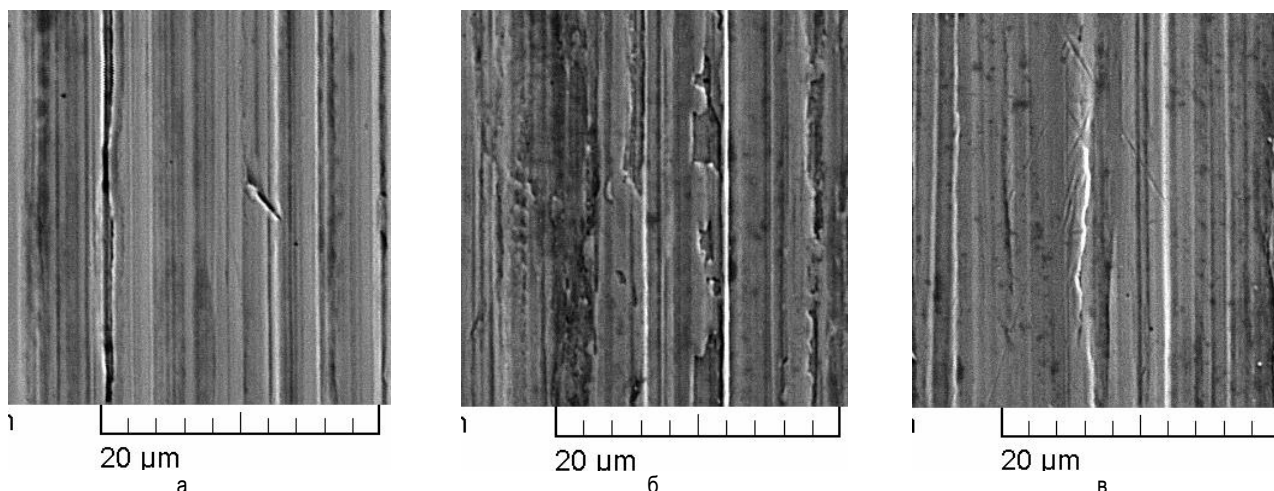
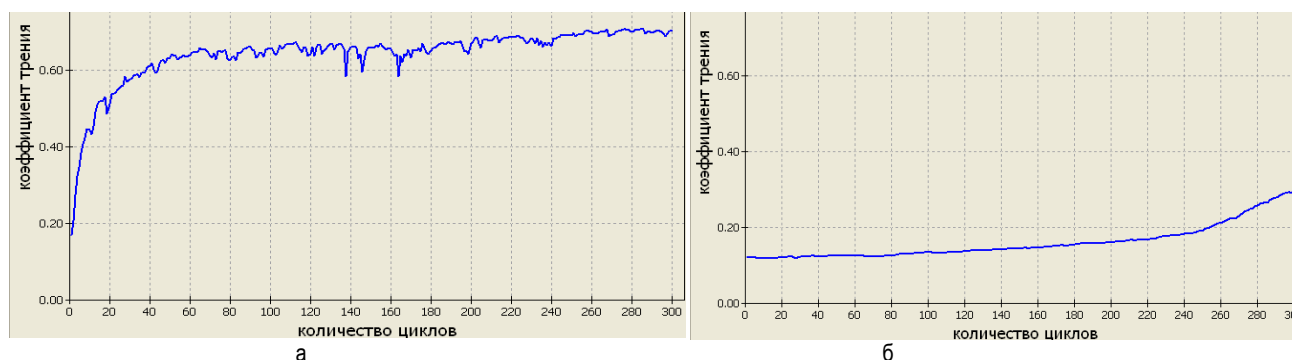


Рисунок 3 – Фотографии поверхности стали до обработки (а) и после обработки низкоэнергетическими импульсами: 0,5 Дж при 60 А/10 мс (б) и 0,8 Дж при 60 А/15 мс

При обработке с энергией в импульсе более 1 Дж на поверхности можно наблюдать зоны оплавления (рисунок 2 ж–к). Оплавление в сочетании с последующей автозакалкой представляет собой специфический вид термообработки – закалку из жидкого состояния. В результате быстрого затвердевания в тонких поверхностных слоях образуются метастабильные

структуры. Формирование таких метастабильных структур может приводить к повышению эксплуатационных характеристик изделия [21]. Как показали результаты триботехнических испытаний, представленные в [20], такие поверхности характеризуются более высокими показателями твердости и низким коэффициентом трения (рисунок 4).



а) поверхность без лазерной обработки; б) поверхность после лазерной обработки

Рисунок 4 – Влияние количества циклов на коэффициент трения при проведении триботехнических испытаний образцов стали 45

Использование различных комбинаций технологических параметров дает возможность получения большого разнообразия структур: от пористых (рисунок 5 а) до ярко выраженных зон неравномерного оплавления (рисунок 5 б, в), кристаллических дендритных (рисунок 5 г, д, е) и с хорошо упорядоченной упаковкой зерен (рисунок 5ж). При кристаллизации из жидкого состояния металлы и сплавы чаще всего приобретают дендритную структуру. В условиях быстрого теплоотвода, характерного для охлаждения после лазерного нагрева, образуются столбчатые микроструктуры, растущие перпендикулярно к границе между расплавленным слоем и оставшейся в твердом состоянии основной массой изделия.

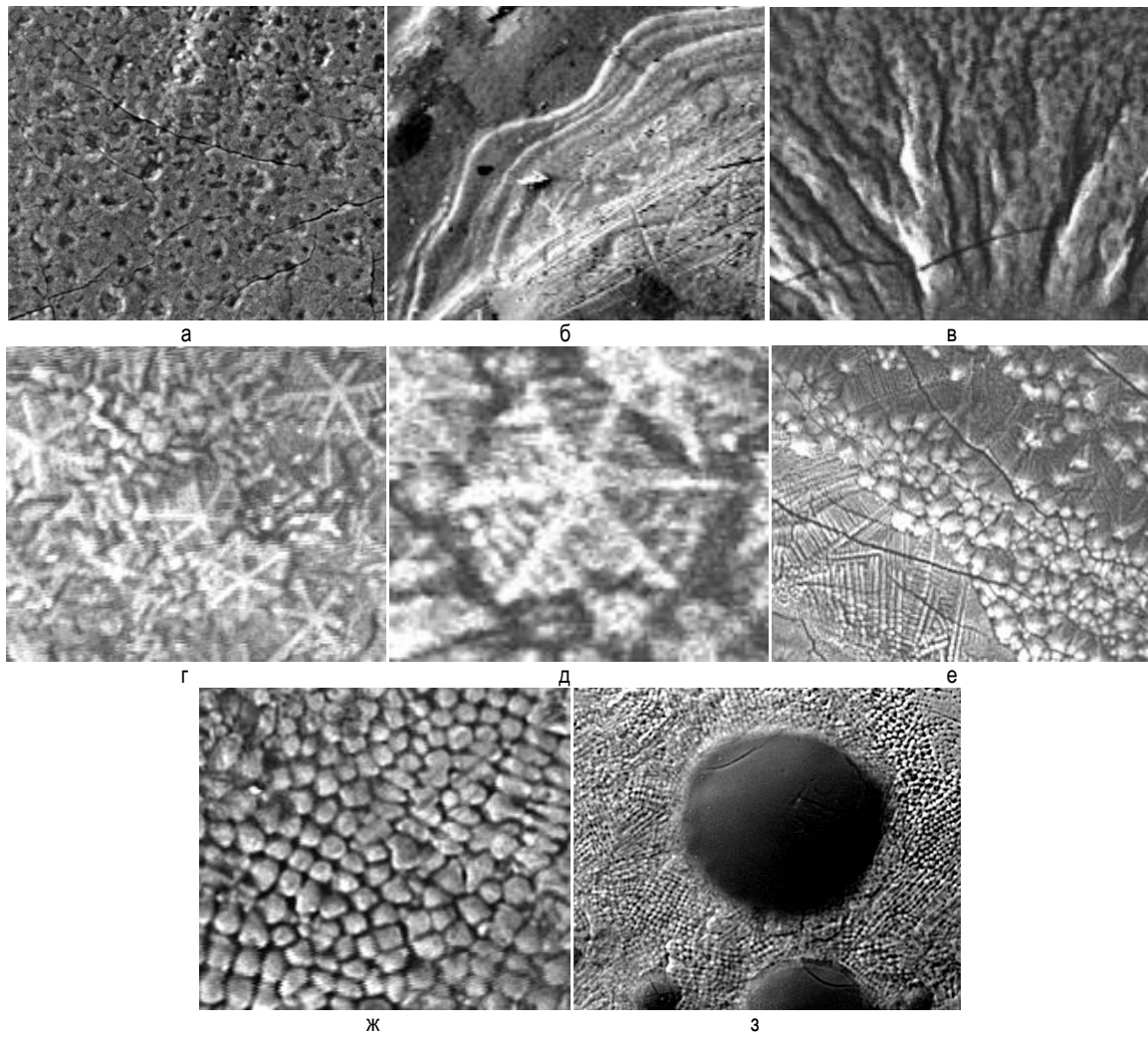
На всех обработанных лазером поверхностях обнаруживается появление темных пятен (рисунок 5 з), химический состав которых был изучен спектроскопическими методами и описан ниже.

Структура без выраженных кристаллитов (рисунок 6 а) наблюдается при недостаточной для роста кристаллитов энергии импульса (до 1 Дж). С увеличением энергии в им-

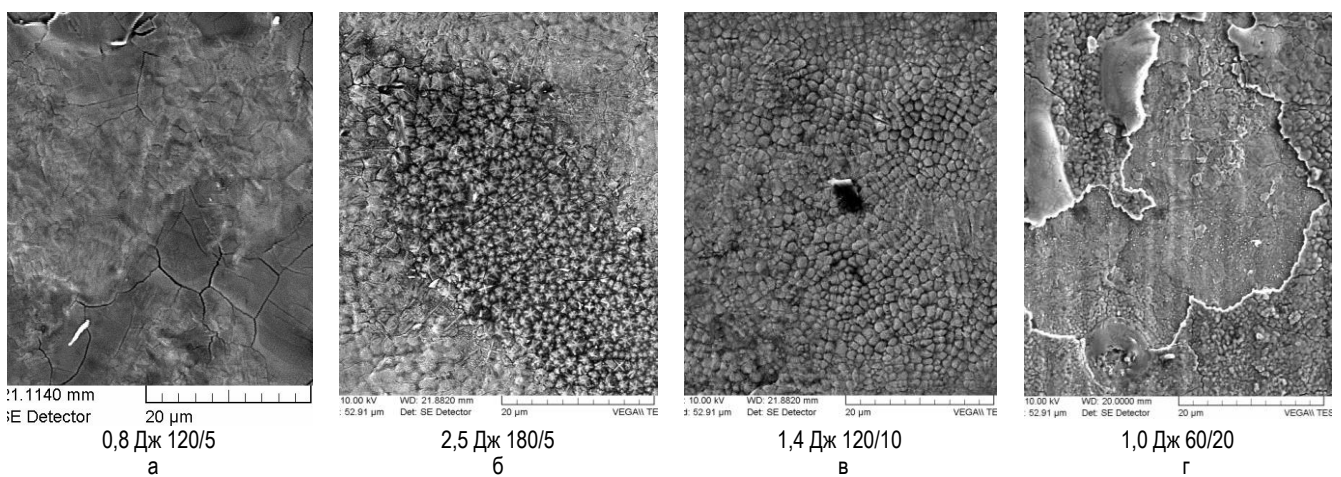
пульсе сначала можно различить появление четко выраженных дендритных структур, из которых при увеличении энергии формируются упаковки кристаллитов. Время импульса является ключевым фактором, так как даже на поверхности обработанной энергией 2,5 Дж, но при времени воздействия всего 5 мс четко наблюдается этап дендритного роста (рисунок 6 б). При обработке импульсом в течении 10 и более мс можно наблюдать ярко выраженную кристаллитную структуру (рисунок 6 в). В тоже время с увеличением времени импульса растет количество поверхностных дефектов – областей отслаивания (рисунок 6 г).

Всего в структурах обработанных лазерным излучением образцов можно выделить четыре типа основных структурных элементов, отраженных на рисунке 6:

- зона без выраженных кристаллитов (рисунок 6 а);
- зона роста дендритов (рисунок 6 б);
- зона ярко выраженных кристаллитных структур (рисунок 6 в);
- зона отслаиваемых образований (рисунок 6 г).



а) пористых; б, в) зоны выраженного неравномерного оплавления; г, д, е) кристаллические дендритные структуры; ж) структуры с хорошо упорядоченной упаковкой зерен; з) пятнистые
Рисунок 5 – Фотографии поверхности образцов до и после лазерной обработки различными режимами, отражающие появление различных структур



а) зона аморфная, без выраженных кристаллитов; б) зона роста дендритов; в) зона ярко выраженных кристаллитных структур; г) зона отслаиваемых образований

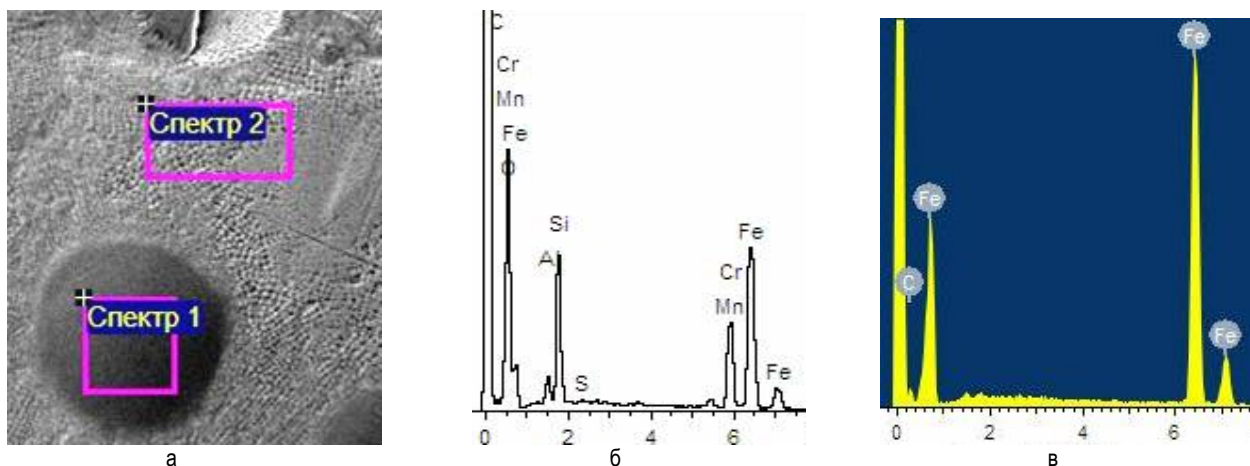
Рисунок 6 – Основные структурные элементы

Отслаиванию подвергаются аморфные области. Причем образование аморфных зон (на фотографиях проявляющиеся темными пят-

нами) было отмечено на всех образцах. Подробный спектральный анализ этих образований указывает на повышенную в них концентрацию

практически всех содержащихся в стали 45 химических элементов (таблица 1): кремния, марганца, хрома, серы (рисунок 7 б). Причем концентрация этих элементов в этих образованиях несоизмеримо выше, чем их содержание в объеме металла. Очевидно импульсное повышение температуры поверхности приводит к ускоренной диффузии этих элементов из объема металла на поверхность и сосредоточении в отдельные гетерогенные мультиэлементные области. Спектральный анализ кристаллитных структур вокруг этих областей показывает присутствие только двух элементов: железа и углерода (рисунок 7 в), причем концентрация углерода в новообразованных кристал-

литах несоизмеримо выше, чем в спектре необработанной лазером поверхности. Было отмечено, что энергия в импульсе влияет на интенсивность образования мультиэлементных зон: чем выше энергия – тем больший объем металла подвергается тепловому воздействию и тем интенсивнее процесс образования этих зон. Как указывалось выше, энергию в импульсе определяют сила тока накачки и время импульса. Но влияние этих технологических факторов на свойства мультиэлементных зон неоднозначно. Увеличение силы тока способствует росту мультиэлементных зон, тогда как увеличение времени импульса способствует их отслаиванию.

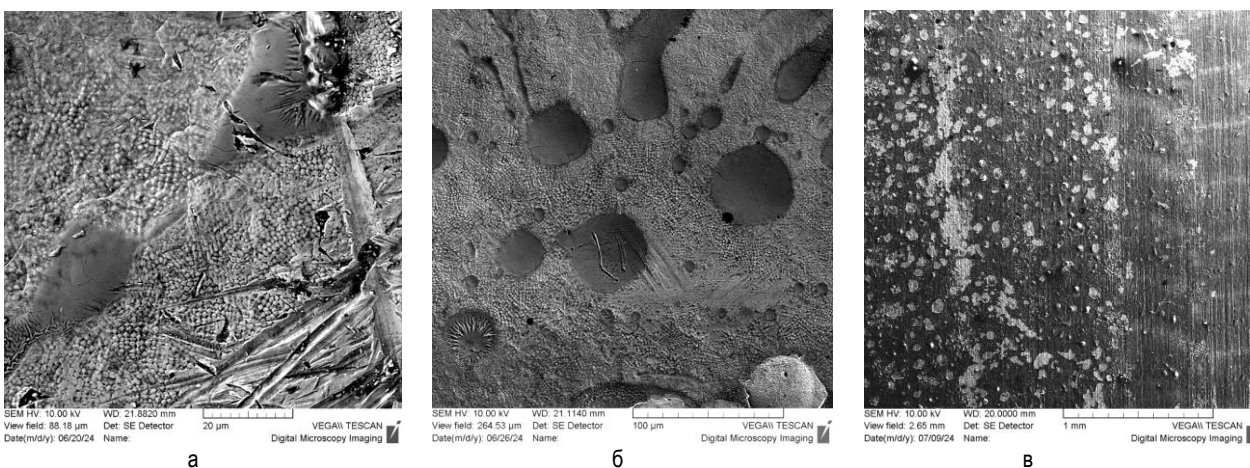


а) фотография области исследования; б) спектр отслаиваемой зоны; в) спектр «чистой» зоны

Рисунок 7 – Спектроскопический анализ областей отслаивания

Было обнаружено, что когезия этих образований зависит от режимов обработки. Особенно на нее влияет время обработки. На поверхности, полученной после 5 ms обработки, они держатся настолько прочно, что механические царапины приводят скорее к их расплыванию, чем к сколу (рисунок 8 а). Однако с увеличением времени выдержки импульса можно наблюдать ослабление когезионных сил. И если при 10 ms выдержки можно наблюдать

лишь единичные области отслаивания (рисунок 8 б), то после 15 ms обработки наблюдается массовое отслаивание (рисунок 8 в). Изучение элементного состава спектров мультиэлементных зон в зависимости от времени импульса показало рост содержания кислорода в их спектре с увеличением времени импульса. Очевидно, именно окисление приводит к ослаблению когезионных сил и шелушению поверхности.



а) 5 ms; б) 10 ms; в) 15 ms

Рисунок 8 – Образование мультиэлементных зон при обработке технологическими режимами, отличающимися по времени воздействия лазерного импульса

Сравнивая структуры поверхности образцов, полученных при воздействии одинаковой энергии в импульсе, но при разных значениях силы тока и времени импульса можно оценить влияние технологических параметров (сила тока и время импульса). На рисунке 2 представлены фотографии двух поверхностей, полученных в результате обработки лазером с энергией 0,8 Дж: на рисунке 2 в – в результате воздействия силы тока 60 А в течение 15 ms, на рисун-

ке 2 г – в результате воздействия силы тока 120 А в течение 5 ms. Несмотря на одинаковую энергию воздействия полученные структуры значительно отличаются.

Заключение

Использование различных комбинаций технологических параметров (изменения силы тока в диапазоне от 60 до 180 А, времени

импульса от 5 до 20 ms, энергии в импульсе в пределах от 0,3 Дж до 10,0 Дж) дает возможность получения большого разнообразия вариантов топографии поверхности стали после лазерной обработки, отвечающих разным триботехническим характеристикам структур: от пористых до ярко выраженных зон неравномерного оплавления, кристаллических дендритных и с хорошо упорядоченной упаковкой зерен.

Согласно результатам микроскопических исследований, обработка с энергией до 1 Дж не приводит к нагреву с оплавлением поверхности: при обработке с энергией в импульсе менее 1 Дж токами менее 100 А топография поверхности после обработки отличается от первоначальной только появлением следов выхода на поверхность практически всех имеющихся в металле элементов. При обработке с энергией в импульсе более 1 Дж на поверхности наблюдаются зоны оплавления. Всего в структурах обработанных лазерным излучением образцов можно выделить четыре типа основных структурных элементов: а) зона без выраженных кристаллитов; б) зона роста дендритов; в) зона ярко выраженных кристаллитных структур; г) зона отслаиваемых образований.

В результате подробного спектрального анализа было обнаружено формирование отдельных гетерогенных мультиэлементных областей, причем была установлена зависимость интенсивности образования мультиэлементных зон от энергии в импульсе: чем выше энергия – тем больший объем металла подвергается тепловому воздействию и тем интенсивнее процесс образования этих зон. Несмотря на то, что энергию в импульсе определяют и сила тока накачки, и время импульса, было установлено, что влияние этих технологических факторов на свойства мультиэлементных зон неоднозначно. Увеличение силы тока способствует росту мультиэлементных зон, тогда как увеличение времени импульса способствует их отслаиванию. Было обнаружено, что когезия мультиэлементных областей зависит от режимов обработки. Особенно важным фактором для получения оптимальной структуры поверхности является время импульса. С увеличением времени выдержки импульса усиливается окисление поверхности, приводящее к ослаблению когезионных сил. Обработка импульсом более 15 ms приводит к массовому отслаиванию образовавшихся на поверхности мультиэлементных областей.

Было установлено, что при энергии импульса менее 1 Дж на обработанной поверхности образование структуры кристаллитов не наблюдается: энергии менее 1 Дж недостаточно для роста кристаллитов.

Список цитированных источников

1. Ведерникова, И. И. Применение лазерного модифицирования для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин / И. И. Ведерникова, В. А. Поletaev // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2019. – № 15. – С. 18–25.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учебное пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисуров ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : МГТУ им. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск : Белорусская наука, 2008. – 250 с.
4. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий / А. В. Белый, А. С. Калиниченко, О. Г. Девойно, В. А. Кукарко. – Минск : Белорусская наука, 2017. – 456 с.
5. Surface Hardening of Gears by Laser Beam Processing / H. Zhang, Y. Shi, C.Y. Xu, M. Kutsuna // *Surface Engineering*. – 2003. – Vol. 19, No. 2. – P. 134–136.
6. Mordike, B. L. Improvement of Wear Properties by Laser Surface Treatment / B. L. Mordike // *Laser Treatment of Materials. ECLAT'90 : Proc. 3rd European Conf.* // Eds. H. W. Bergmann, R. Kupfer. – Germany, 1990. – Vol. 1. – P. 371–376.
7. Сафонов, А. Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением / А. Н. Сафонов // *МитОМ*. – 1999. – № 1. – С. 7–10.
8. 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. – С. 56–65.
9. Огин, П. А. Влияние мощности лазерного излучения и скорости движения луча на геометрию зоны оплавления при лазерной закалке стали 40X / П. А. Огин, Д. Л. Мерсон, С. И. Ярьско // *Вектор науки ТГУ*. – 2016. – № 2 (36). – С. 46–51. – DOI: 10.18323/2073-5073-2016-2-46-51.
10. Структурные фазовые превращения в быстрорежущей стали при лазерной закалке с оплавлением поверхности многоканальным СО₂ лазером / Л. Е. Афанасьева, И. А. Барабанова, Е. В. Ботьянов [и др.] // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2013. – № 8 (104). – С. 10–13.
11. Гуреев, Г. Д. Совмещение лазерного и ультразвукового воздействий для термообработки поверхности стали / Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки*. – 2007. – № 1 (14). – С. 90–95.
12. Патент RU 2375465, МПК C21D1/09, C21D7/06. Способ поверхностного упрочнения : № 2008131983 : заявл. 01.08.2008 : опубл. 10.12.2009 / Кукин С. Ф., Девойно О. Г., Баркун А. А., Кукин А. С. – 7 с.
13. Патент ВУ 12978, МПК C21D1/09, C21D1/78. Способ поверхностного упрочнения изделия из железоуглеродистого или титанового сплава : № 20080514 : заявл. 18.04.2008 : опубл. 30.04.2010 / Кукин С. Ф., Девойно О. Г., Баркун А. А., Кукин А. С. – 6 с.
14. Бровер, А. В. Особенности лазерной упрочняющей обработки деталей машин и инструмента / А. В. Бровер // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2008. – № 6 (42). – С. 12–16.
15. Лазерная установка с оптоволоконной приставкой и процессы сварки изделий из нержавеющей стали / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, С. В. Шалупаев, С. Н. Юркевич // *Материалы. Технологии. Инструменты*. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 84–87.
16. Патент RU 34426, МПК В23К 26/00, В23К 26/02, В23К 26/03, В23К 26/067. Установка для лазерной обработки : № 2003117186/20 : заявл. 11.06.2003; опубл. 10.12.2003. / Бренько А. А., Мышковец В. Н., Максименко А. В., Рыбин В. И., Тучин А. Н., Юркевич С. Н., Прищепов Е. Г. – 11 с.
17. Оборудование для лазерной технологии обработки материалов / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Г. А. Баевич, В. В. Грищенко // *Технологии, оборудование, качество. Белорусский промышленный форум-2006 : материалы 9 международного симпозиума, Минск, 16–19 мая 2006 г.* – Минск, 2006. – С. 87.
18. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 / А. Я. Григорьев, Д. М. Гуцев, А. П. Зозуля [и др.] // *Трение и износ*. – 2014. – Т. 35, № 6. – С. 664–669.
19. Reciprocating MTU2K7 Millitribometer / A. Ya. Grigoriev, D. M. Gutsev, A. P. Zozulya [et al.] // *Journal of Friction and Wear*. – 2014. – Vol. 35, No. 6. – P. 455–459.
20. Влияние лазерной закалки на триботехнические свойства стали 45 / Е. Г. Акунец, Д. М. Гуцев, В. Г. Кудрицкий [и др.] // *Трение и износ*. – 2025. – Т. 46, № 2. – С. 111–120.
21. Коваленко, В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, В. С. Черненко. – Киев : Тэхника, 1990. – 190 с.

References

1. Vedernikova, I. I. Primeneniye lazernogo modifitsirovaniya dlya uprochneniya rabochih poverhnoстей detalej mashin / I. I. Vedernikova, V. A. Poletaev // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2019. – № 15. – S. 18–25.
2. Grigoriyanc, A. G. Tekhnologicheskie processy lazernoj obrabotki : uchebnoe posobie / A. G. Grigoriyanc, I. N. Shiganov, A. I. Misyurov ; pod red. A. G. Grigoriyanc. – M. : MGTU im. Baumana, 2006. – 664 s.
3. Astapchik, S. A. Lazernye tekhnologii v mashinostroeni i metalloobrabotke / S. A. Astapchik, V. S. Golubev, A. G. Maklakov. – Minsk : Belorusskaya nauka, 2008. – 250 s.

4. Inzheneriya poverhnostej konstrukcionnyh materialov s ispol'zovaniem plazmennyh i puchkovykh tekhnologij / A. V. Belyj, A. S. Kalinichenko, O. G. Devojno, V. A. Kukareko. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2017. – 456 s.
5. Surface Hardening of Gears by Laser Beam Processing / H. Zhang, Y. Shi, C.Y. Xu, M. Kutsuna // Surface Engineering. – 2003. – Vol. 19, No. 2. – P. 134–136.
6. Mordike, B. L. Improvement of Wear Properties by Laser Surface Treatment / B. L. Mordike // Laser Treatment of Materials. ECLAT'90 : Proc. 3rd European Conf. // Eds. H. W. Bergmann, R. Kupfer. – Germany, 1990. – Vol. 1. – P. 371–376.
7. Safonov, A. N. Izuchenie struktury i tverdosti poverhnosti zhelezouglerodistykh splavov posle ih oplavleniya lazernym izlucheniem / A. N. Safonov // MiTOM. – 1999. – № 1. – S. 7–10.
8. Ocenka vliyaniya parametrov rezhima lazernoj zakalki na kachestvo poverhnosti i poverhnostnogo sloya detalej stankov (obzor) / S. V. Petrochenko, C. Hao, S. YUj, K. CHzhao // Omskij nauchnyj vestnik. – 2024. – № 1. – S. 56–65.
9. Ogin, P. A. Vliyanie moshchnosti lazernogo izlucheniya i skorosti dvizheniya lucha na geometriyu zony oplavleniya pri lazernoj zakalke stali 40X / P. A. Ogin, D. L. Merson, S. I. YAres'ko // Vektor nauki TGU. – 2016. – № 2 (36). – S. 46–51. – DOI: 10.18323/2073-5073-2016-2-46-51.
10. Strukturnye fazovye prevrashcheniya v bystrorezhushchej stali pri lazernoj zakalke s oplavleniem poverhnosti mnogokanal'nym SO2 lazerom / L. E. Afanas'eva, I. A. Barabonova, E. V. Botyanov [i dr.] // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2013. – № 8 (104). – S. 10–13.
11. Gureev, G. D. Sovmeshchenie lazernogo i ultrazvukovogo vozdeystvij dlya termoobrabotki poverhnosti stali / G. D. Gureev, D. M. Gureev // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki. – 2007. – № 1 (14). – S. 90–95.
12. Patent RU 2375465, MPK S21D1/09, S21D7/06. Sposob poverhnostnogo uprochneniya : № 2008131983 : zayavl. 01.08.2008 : opubl. 10.12.2009 / Kukin S. F., Devojno O. G., Barkun A. A., Kukin A. S. – 7 s.
13. Patent BY 12978, MPK S21D1/09, S21D1/78. Sposob poverhnostnogo uprochneniya izdeliya iz zhelezouglerodistogo ili titanovogo splava : № 20080514 : zayavl. 18.04.2008 : opubl. 30.04.2010 / Kukin S. F., Devojno O. G., Barkun A. A., Kukin A. S. – 6 s.
14. Brover, A. V. Osobennosti lazernoj uprochnyayushchej obrabotki detalej mashin i instrumenta / A. V. Brover // Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya. – 2008. – № 6 (42). – S. 12–16.
15. Lazernaya ustanovka s optovolokonnoj pristavkoj i processy svarki izdelij iz nerzhavayushchej stali / V. N. Myshkovec, A. V. Maksimenko, S. V. SHalupaev, S. N. YUrkevich // Materialy. Tekhnologii. Instrumenty. – 2003. – T. 8, № 4. – S. 84–87.
16. Patent RU 34426, MPK V23K 26/00, V23K 26/02, V23K 26/03, V23K 26/067. Ustanovka dlya lazernoj obrabotki : № 2003117186/20 : zayavl. 11.06.2003; opubl. 10.12.2003. / Bren'ko A. A., Myshkovec V. N., Maksimenko A. V., Rybin V. I., Tuchin A. N., YUrkevich S. N., Prishchepov E. G. – 11 s.
17. Oborudovanie dlya lazernoj tekhnologii obrabotki materialov / V. N. Myshkovec, A. V. Maksimenko, G. A. Baevich, V. V. Grishchenko // Tekhnologii, oborudovanie, kachestvo. Belorusskij promyshlennyj forum-2006 : materialy 9 mezhdunarodnogo simpoziuma, Minsk, 16–19 maya 2006 g. – Minsk, 2006. – S. 87.
18. Vozvratno-postupatel'nyj millitribometr MTU-2K7 / A. YA. Grigor'ev, D. M. Gucev, A. P. Zozulya [i dr.] // Trenie i iznos. – 2014. – T. 35, № 6. – S. 664–669.
19. Reciprocating MTU2K7 Millitribometer / A. Ya. Grigor'ev, D. M. Gutsev, A. P. Zozulya [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2014. – Vol. 35, No. 6. – P. 455–459.
20. Vliyanie lazernoj zakalki na tribotekhnicheskie svoystva stali 45 / E. G. Akunec, D. M. Gucev, V. G. Kudrickij [i dr.] // Trenie i iznos. – 2025. – T. 46, № 2. – S. 111–120.
21. Kovalenko, V. S. Uprochnenie i legirovanie detalej mashin luchom lazera / V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, V. S. CHemenko. – Kiev : Tekhnika, 1990. – 190 s.

Материал поступил 13.02.2026, одобрен 24.02.2026, принят к публикации 11.03.2026