

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.785:669.14.018.29

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-102-112>

Научная статья



Влияние текстурных эффектов на работоспособность лазерно-облученного инструмента

Г.И. Бровер, Е.Е. Щербакова ✉

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, п. Гагарина, 1

✉ sherbakovaee@mail.ru

Аннотация

Введение. Лазерная поверхностная обработка изделий машиностроения позволяет увеличить их долговечность. Однако процесс лазерного упрочнения не отличается стабильностью получаемых результатов, так как при выборе режимов и схем облучения конкретных изделий не учитываются текстурные эффекты в зонах лазерного воздействия. Это приводит к преждевременному износу и даже разрушению рабочих поверхностей облученных изделий. Поэтому целью работы явилось исследование механизма влияния строения лазерно-закаленного слоя на эксплуатационные свойства инструмента.

Материалы и методы. Материалами для данного исследования послужили инструментальные стали Р6М5 и Р18. Импульсное лазерное облучение проводилось на технологической установке «Квант-16» с плотностью мощности излучения 70–250 МВт/м². Использовались сканирующая зондовая и оптическая микроскопия, рентгеноструктурный и дюрметрический методы анализа структуры сталей. Определялись значения прочности сталей на изгиб и ударную вязкость до и после лазерной обработки.

Результаты исследования. Экспериментально доказано, что упрочнять следует участки рабочих поверхностей изделий, подверженные максимальному износу и находящиеся при эксплуатации под действием сжимающих напряжений. Показано, что текстурные эффекты в зонах лазерной обработки приводят к понижению коэффициентов трения и способствуют повышению износо- и адгезионной стойкости поверхностных слоев сталей.

Обсуждение и заключения. Результаты проведенных исследований позволяют осуществлять рациональный выбор режимов и схем поверхностной лазерной обработки изделий различного функционального назначения и гарантированно обеспечивать их работоспособность. Определены возможности повышения конструкционной прочности и свойств инструмента за счет проведения лазерного легирования поверхностных слоев сталей из порошковых покрытий и проведения после лазерного облучения стабилизирующего отпуска.

Ключевые слова: лазерное облучение, легированные стали, структура, свойства, износостойкость, адгезионная стойкость.

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их усовершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Бровер Г.И., Щербакова Е.Е. Влияние текстурных эффектов на работоспособность лазерно-облученного инструмента. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(2):102–112. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-102-112>

© Г.И. Бровер, Е.Е. Щербакова, 2023

Influence of Texture Effects on the Laser-Irradiated Tool Performance

Galina I Brover, Elena E Shcherbakova✉

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ sherbakovaee@mail.ru

Abstract

Introduction. Laser surface treatment of mechanical engineering products makes it possible to increase their durability. However, the laser hardening process is not good at the consistency of results, since choosing the irradiation modes and schemes of specific products, texture effects in the zones of laser exposure are not taken into account. This leads to premature wearing and even destructing the working surfaces of irradiated products. Therefore, the work objective is to study the mechanism of influence of the structure of the laser-hardened layer on the operational properties of the tool.

Materials and Methods. The materials for this study were tool steels: R6M5 and R18 (according to the EN 10027 standard tool steels: 1.3355, 1.3343). Pulsed laser irradiation was carried out at the technological device Kvant-16 with a radiation power density of 70–250 MW/m². Scanning probe and optical microscopy, X-ray diffraction and durometric methods for analyzing the steels structure were used. The values of steel strength in bending and impact strength were determined before and after laser treatment.

Results. It has been experimentally proven that it is necessary to strengthen the sections of the products working surfaces that are subject to maximum wear and are under the action of compressive stresses during operation. It is shown that textural effects in the laser treatment zones lead to a decrease in the friction coefficients and contribute to an increase in the wear and adhesion resistance of the steels surface layers.

Discussion and Conclusion. The results of the research carried out make it possible to rationally select the surface laser processing modes and schemes of products for various functional purposes and ensure their operability with a guarantee. The possibilities increasing the structural strength and properties of the tool due to laser alloying the surface layers of powder-coated steels and stabilizing tempering after laser irradiation are determined.

Keywords: laser irradiation, alloy steels, structure, properties, wear resistance, adhesion resistance.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers, whose critical assessment of the submitted materials and suggestions contributed to a significant improvement in the quality of this article.

For citation. Brover GI, Shcherbakova EE. Influence of Texture Effects on the Laser-Irradiated Tool Performance. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):102–112. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-102-112>

Введение. В настоящее время на машиностроительных предприятиях большое внимание уделяется вопросам повышения работоспособности инструмента и технологической оснастки, особенно из высоколегированных дорогостоящих сталей.

Проведенный анализ литературных источников показал, что в процессе эксплуатации инструмент испытывает высокие контактные напряжения и давления на рабочие поверхности [1–4]. Кроме того, работе изделий различного функционального назначения сопутствуют нагрев и напряжения изгиба, а также ударные нагрузки или вибрации.

Поэтому стали для изготовления инструмента в целях предотвращения преждевременного разрушения рабочих поверхностей должны иметь высокие значения не только твердости, износо- и теплостойкости, но и прочности при достаточном уровне вязкости. Лазерное облучение инструмента и оснастки, наряду с другими способами поверхностного упрочнения, позволяет увеличить их долговечность, но процесс лазерной обработки не отличается стабильностью получаемых результатов [5–9]. Связано это с тем, что недостаточно четко определены критерии выбора режимов и схем лазерного облучения изделий различного назначения. В частности, не рассмотрена степень влияния текстурных эффектов, возникающих при лазерной обработке с оплавлением поверхности, на конструкционную прочность сталей.

Для решения этих задач необходимы испытания на изгиб, ударную вязкость, износо- и адгезионную стойкость облученных образцов.

Результаты таких экспериментов позволят осуществлять рациональный выбор параметров процесса поверхностной лазерной обработки.

Целью данной статьи являлось исследование влияния строения лазерно-закаленного слоя на эксплуатационные свойства инструмента.

Материалы и методы. Материалами для данного исследования послужили инструментальные стали Р6М5 и Р18.

Импульсное лазерное облучение проводилось на технологической установке «Квант-16» с плотностью мощности излучения 70–250 МВт/м². Идентификация фазового состава и изучение структуры материалов после лазерной обработки осуществлялись металлографическим, сканирующим зондовым, рентгеновским дюриметрическим методами.

Металлографические исследования проводились на микроскопах МИМ-7 и «Neophot-21». Рентгеноструктурный анализ осуществлялся на дифрактометре типа ДРОН. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 0,49 Н. Прочность образцов на изгиб определялась с использованием машины ИМ-4А, ударная вязкость образцов без надреза — на маятниковом копре КМ-5Т.

Результаты исследования. Металлофизическими исследованиями установлено, что при лазерной обработке сталей на поверхности формируется упрочненный слой, состоящий в общем случае из оплавленной зоны закалки из жидкого состояния и нижележащей зоны закалки из твердого (аустенитного) состояния [10–12].

Оплавляют материал для увеличения общей глубины закаленного слоя или при проведении лазерного легирования облучаемых зон. В последнем случае это вызвано необходимостью оплавления легирующего покрытия и тонкого поверхностного слоя стали.

Особое внимание в работе уделялось изучению особенностей структурообразования сталей в зоне лазерной закалки из жидкого состояния.

Экспериментально установлено, что эта зона имеет дендритное строение (рис. 1 а). Причем дендриты направлены определенным образом — в сторону теплоотвода от облучаемой поверхности в глубину закаленного слоя. Общая толщина упрочненного слоя составляет 80–100 мкм, средняя твердость металла поверхностных слоев — 10–10,5 ГПа.

Рентгеноструктурный анализ показал (рис. 1 б), что в зонах оплавления присутствуют следующие фазы: α -фаза (мартенсит), некоторое количество γ -фазы (остаточный аустенит) и размытые рефлексы неп полностью растворившихся карбидов.

При этом наблюдается аномальное соотношение интенсивностей дифракционных линий (200) и (111) аустенита в зонах лазерной закалки из жидкого состояния (рис. 1 б, кривая 2), по сравнению с зоной закалки из твердого (аустенитного) состояния (рис. 1 б, кривая 1).

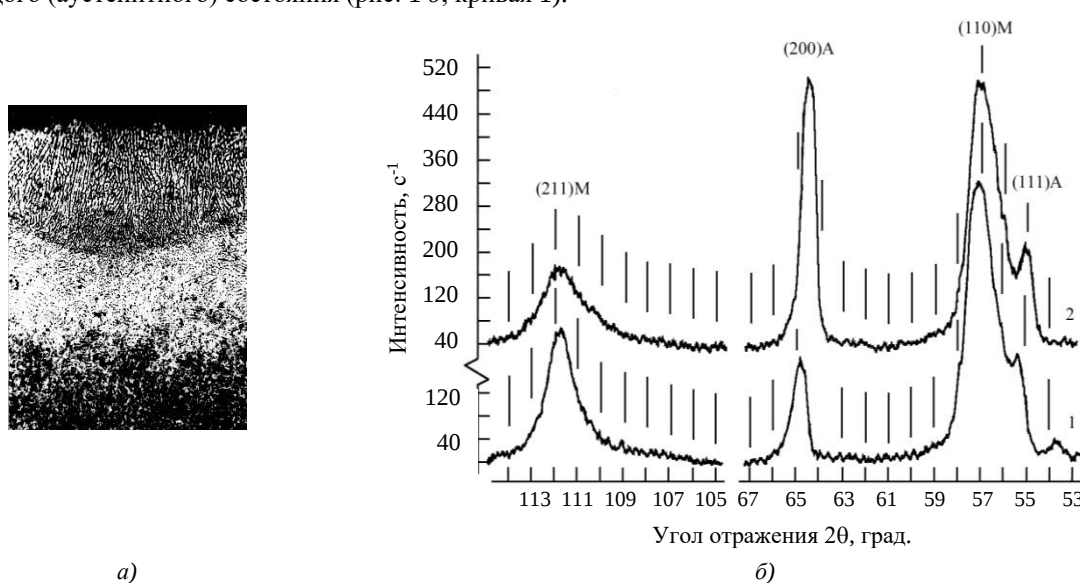


Рис. 1. Зона лазерной закалки из жидкого состояния: а — расположение дендритов в зоне на стали Р6М5; б — фрагменты рентгенограмм стали после лазерной обработки без оплавления (кривая 1) и с оплавлением поверхности (кривая 2)

Это свидетельствует о появлении в поверхностных облученных слоях текстурных эффектов.

Формирование текстуры аустенита связано, видимо, с преимущественной ориентировкой его субзерен в поверхностном слое материалов, возникающей за счет направленной кристаллизации металла после окончания лазерного импульса.

Описанный эффект оказывает положительное влияние на свойства изделий после лазерной обработки. В частности, текстура понижает коэффициенты трения в парах трения, особенно, если тип текстуры согласуется с видом напряженного состояния упрочненных изделий в условиях эксплуатации [13].

В работе рассмотрены некоторые возможности использования текстуры, вызывающей анизотропию свойств в поверхностных слоях сталей, как фактора повышения технологических характеристик облученных изделий.

С этой целью были проведены испытания на изгиб и ударную вязкость образцов из стали Р6М5, облученных на разных режимах и по разным схемам, то есть определялась конструкционная прочность лазерно-облученных сталей.

При выборе методов и методик экспериментов исходили из того, что испытания на изгиб создают в образцах напряженное состояние, близкое к возникающему при работе металлообрабатывающего инструмента. Использовались образцы размером 4×6×55 мм.

Применение образцов нестандартного сечения вызвано необходимостью ужесточения степени влияния тонкого упрочненного слоя на измеряемые свойства.

Перед облучением стали подвергали стандартной термической обработке. Для снятия внутренних напряжений после шлифовки образцов в размер производился отпуск при 400°C, а также визуальный контроль на отсутствие трещин или других дефектов. Одна грань образцов (6×55 мм) была подвергнута лазерному облучению с плотностью мощности излучения 70–150 МВт/м², то есть без оплавления и с оплавлением поверхности образцов. Часть образцов подвергалась лазерному легированию из порошковых обмазок, содержащих дисперсные частички древесного угля с последующим нагревом до температуры 550 °С.

Следует отметить, что при испытаниях лазерно-закаленный слой находился под действием сжимающих или растягивающих напряжений в зависимости от его расположения относительно нагружающего элемента.

В результате испытаний установлено, что в случае действия на облученный слой сжимающих напряжений прочность образцов практически не снижается (таблица 1). В случае воздействия растягивающих напряжений увеличивается склонность образцов к хрупкому разрушению. Это, видимо, связано с тем, что растягивающие изгибающие нагрузки инициируют зарождение и распространение трещин в оплавленных поверхностных слоях стали по междендритным прослойкам.

Таблица 1

Механические характеристики стали Р6М5 до и после лазерной обработки

Режим обработки	$\sigma_{изг} \times 10, \text{ МПа}$		$\alpha \times 10^{-1}, \text{ МДж/м}^2$	
	сжатие	растяжение	сжатие	растяжение
Стандартная термическая обработка (закалка и отпуск)	272±7	270±7	3,2±0,2	3,1±0,2
Лазерная закалка без оплавления поверхности	258±7	32±7	2,8±0,2	0,2±0,2
Лазерная закалка с оплавлением поверхности	238±7	30±7	2,7±0,2	0,3±0,2
Лазерная закалка и отпуск при 550°C	257±7	31±7	2,8±0,2	0,4±0,2
Лазерное легирование из угольного порошка	291±7	33±7	2,9±0,2	0,4±0,2
Лазерное легирование из угольного порошка и отпуск при 550°C	302±7	32±7	3,0±0,2	0,2±0,2

Можно сделать вывод, что для стабилизации конструкционной прочности облученных изделий необходимо подвергать упрочнению участки их рабочей части, которые подвержены при эксплуатации действию сжимающих нагрузок.

Особый интерес, с точки зрения повышения эксплуатационных свойств лазерно-упрочненных изделий, представляют результаты экспериментов, полученные на лазерно-легированных из угольного порошка образцах.

При металлофизических исследованиях выявлены особенности микроструктуры зон лазерного легирования из порошковых покрытий, содержащих активированный уголь (рис. 2).

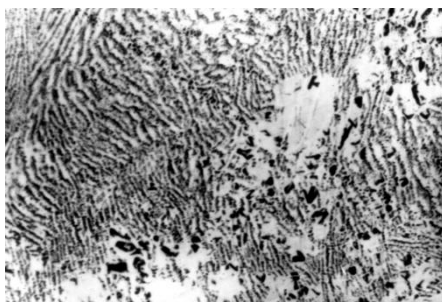


Рис. 2. Структура расплава в закаленной из жидкого состояния стали Р6М5 при лазерном легировании из порошка, содержащего частички угля, ×500

В частности, хорошо заметны дисперсные частички угля, которые располагаются в облученном металле на границах растущих дендритов. Одновременно с текстурными эффектами присутствие графитовых пластин в облученных зонах понижает коэффициенты трения на рабочих поверхностях изделий, выполняя роль твердой смазки [14].

Как видно из таблицы, при действии сжимающих напряжений наиболее эффективно повышают прочность облученных изделий лазерное легирование и последующий отпуск при температуре 550 °С.

Дополнительный вклад отпуска в повышение свойств, в частности твердости, поверхностных слоев стали Р6М5 связан с эффектом дисперсионного твердения в облученных и, тем более, легированных слоях стали. Для подтверждения эффективности проведения процесса лазерного упрочнения и легирования инструмента, с учетом текстурных эффектов в поверхностных слоях [15, 16], в работе проведены натурные испытания на износостойкость резцов из стали Р18 в условиях резания деталей из стали 45.

Резцы из стали Р18 подвергались объемной закалке и отпуску, а также различным вариантам поверхностной обработки: лазерной закалке с оплавлением и без оплавления поверхности, лазерному легированию из порошковых обмазок, содержащих дисперсные включения карбидов вольфрама.

Лазерное облучение осуществлялось по задней грани рабочей части резца, которая при резании подвергается действию сжимающих напряжений. Как показано в статье выше, это исключает хрупкое разрушение режущих кромок инструмента. Проведенные эксперименты по выбору степени перекрытия облученных пятен показали, что коэффициент перекрытия облученных зон должен быть не менее 0,7–0,8. Глубина упрочненного слоя составляла 80–100 мкм, средняя твердость металла поверхностных слоев — 11–11,5 ГПа.

Степень износа оценивалась по величине площадки износа на задней грани резца при одинаковом пути резания для разных вариантов поверхностного упрочнения.

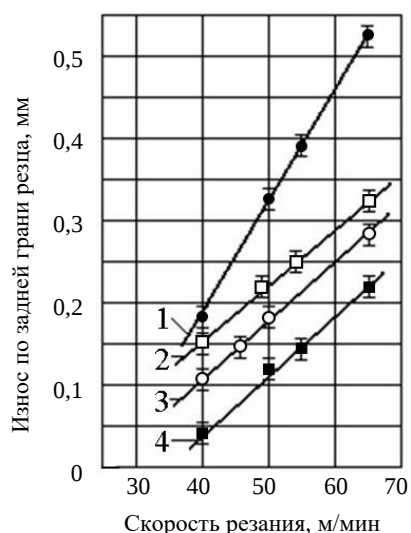


Рис. 3. Износостойкость резцов из стали Р18 после объемной термообработки (кривая 1), лазерной закалки без оплавления (кривая 2), с оплавлением поверхности (кривая 3), лазерного легирования карбидами вольфрама (кривая 4)

Как видно на рис. 3, при всех скоростях резания наблюдается уменьшение износа в 1,5–2 раза у резцов, подвергнутых лазерному упрочнению. Причем минимальный износ достигается в случае лазерного легирования рабочих поверхностей резца карбидами вольфрама. При этом в поверхностных слоях резцов формируются структуры, представляющие собой текстурированную матрицу с вплавленными твердыми частицами карбидами вольфрама WC.

О протекании процесса лазерного легирования поверхности стали Р18 карбидами вольфрама, имеющими высокую твердость (до 15–17 ГПа), свидетельствуют присутствующие на рентгенограммах рефлексы WC, а также результаты проведенных исследований покрытий после лазерной обработки, полученные на сканирующем зондовом микроскопе. На рис. 4 а хорошо различимы выступающие над поверхностью образца частички карбидов [17, 18].

В работе были получены количественные характеристики поверхностных слоев сталей после лазерного вплавления из покрытий частиц WC. Для этого использовали компьютерную программу обработки изображений (КОИ), результаты анализа приведены на рис. 4 б.

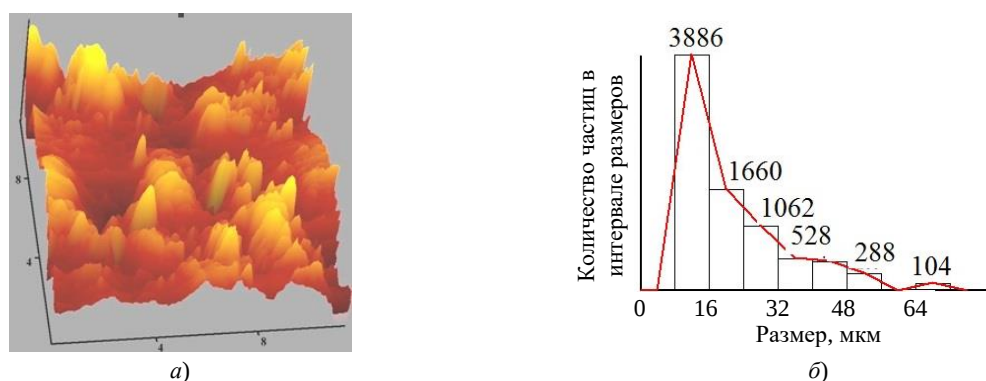


Рис. 4. Сканированное изображение поверхности стали P18: а — после лазерного сплавления карбидов вольфрама; б — гистограммы распределения частиц WC по размерам

Как видно на рис. 4, в поверхностных слоях сталей присутствуют в основном включения размерами 5–10 мкм.

Массив результатов экспериментального определения износостойкости резцов после лазерного легирования, обработанный в программе «Statistica», представлен на рис. 5. Из анализа рисунка можно сделать вывод, что минимальный износ резцов наблюдается после облучения с плотностью мощности излучения 110–130 МВт/м². Белыми точками на рис. 5 обозначены результаты экспериментальной проверки регрессионного моделирования процессов, протекающих в зонах лазерной обработки сталей.

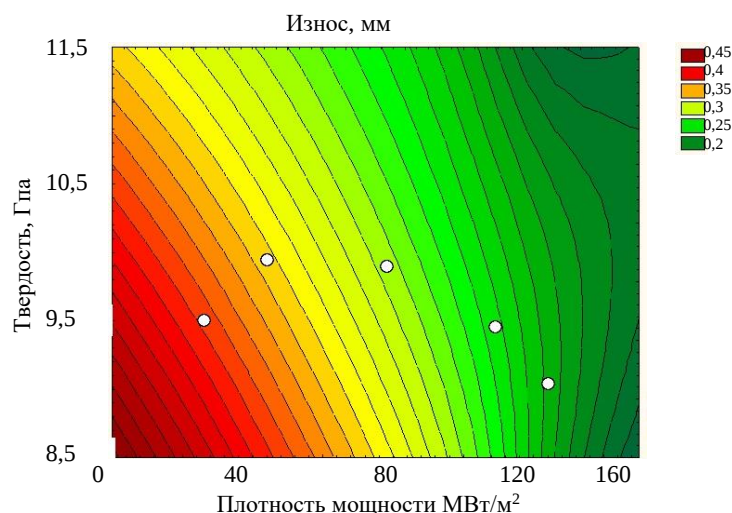


Рис. 5. Карты регрессионного моделирования износостойкости резцов из стали P18 в зависимости от плотности мощности лазерного излучения и твердости поверхностных слоев стали

Полученные результаты имеют практическую значимость, поскольку позволяют гарантированно назначать режимы лазерной обработки для получения требуемой твердости и износостойкости, то есть работоспособности облучаемых изделий.

Следует отметить, что немаловажное значение для гарантированного повышения долговечности изделий, особенно инструмента, имеет адгезионная устойчивость рабочих поверхностей против «налипания» обрабатываемого материала. Это изменяет геометрические размеры рабочих поверхностей, приводит к увеличению действующих в парах трения нагрузок и напряжений, вызывающих разрушение поверхностных слоев изделий.

В работе определялись возможности повышения эксплуатационных свойств лазерно-закаленной инструментальной стали, находящейся в контакте с цветными алюминиевыми сплавами.

Образцы из стали P6M5 подвергали стандартной объемной термообработке и последующей лазерной закалке с плотностью мощности излучения 100–120 МВт/м² для получения на поверхности текстурованного состояния сталей. При проведении лазерного легирования использовали покрытия, содержащие карбиды вольфрама.

Испытания на трение и адгезионную устойчивость проводили на машине МИ-1М по схеме «диск – колодка». Контртелом являлись алюминиевые сплавы, обладающие разной твердостью и вязкостью. Сплав АД31 имел

твердость НВ 32, Д16 — НВ 70 и АМг6 — НВ 90. Повреждения и следы схватывания на поверхностях трения фиксировали с помощью микроскопа МБС-2.

В качестве критерия для оценки склонности к схватыванию инструментальной стали и алюминиевого сплава выбрана величина удельной нагрузки, приложенной к паре трения и приводящая к значительному увеличению коэффициента трения за счет налипания алюминиевого сплава на поверхность стального образца, то есть за счет адгезионного процесса [19, 20].

Как видно на рис. 6 а и б, при контакте лазерно-облученной инструментальной стали с алюминиевыми сплавами типа АМг6 и Д16 перенос алюминиевых сплавов на сталь практически отсутствует. Коэффициенты трения составляют 0,07–0,09, в сравнении с объемно закаленными образцами, для которых коэффициенты трения достигают значений более 0,10. Причем в контакте со сплавом Д16 для них наблюдается скачкообразный рост коэффициентов трения, начиная с удельных нагрузок в паре трения свыше 6 МПа. Это свидетельствует о протекании адгезионных процессов.

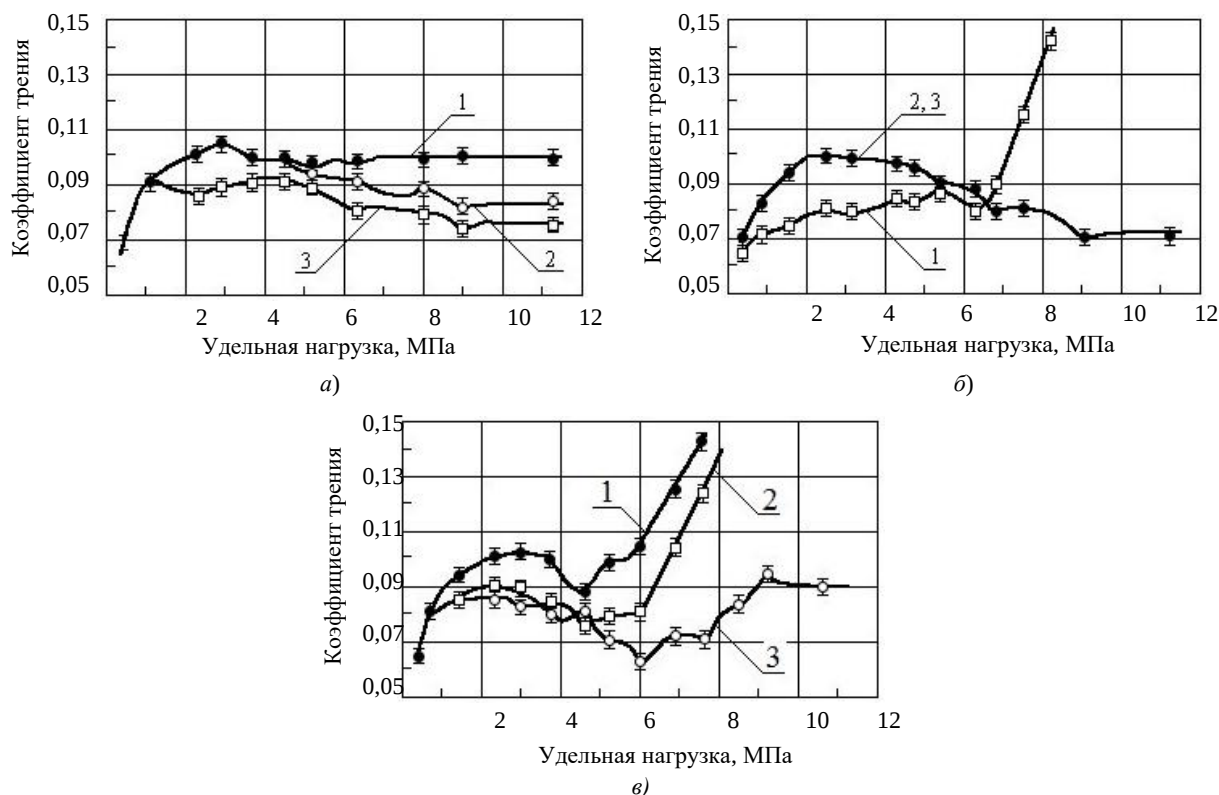


Рис. 6. Коэффициенты трения при контакте стали Р18 со сплавами а — АМг6; б — Д16; в — АД31 до лазерной обработки (кривые 1), после лазерной закалки (кривые 2), после лазерного легирования карбидами вольфрама (кривые 3)

Следует отметить, что в парах трения со сплавом АД31, имеющем самую низкую твердость, у необлученных стальных образцов наблюдается катастрофический рост коэффициентов трения при удельных нагрузках 4,5 МПа, а у лазерно-закаленных сталей при более высоких нагрузках в парах трения — 6 МПа (рис. 6 в). Только лазерно-легированные образцы имеют в этих условиях высокое сопротивление адгезии [21].

Повышение адгезионной стойкости при лазерном облучении связано с достижением не только высокой твердости (11–11,5 ГПа) текстурированного поверхностного слоя, но и как в случае лазерного легирования еще и с вплавлением из покрытий твердых дисперсных карбидов вольфрама.

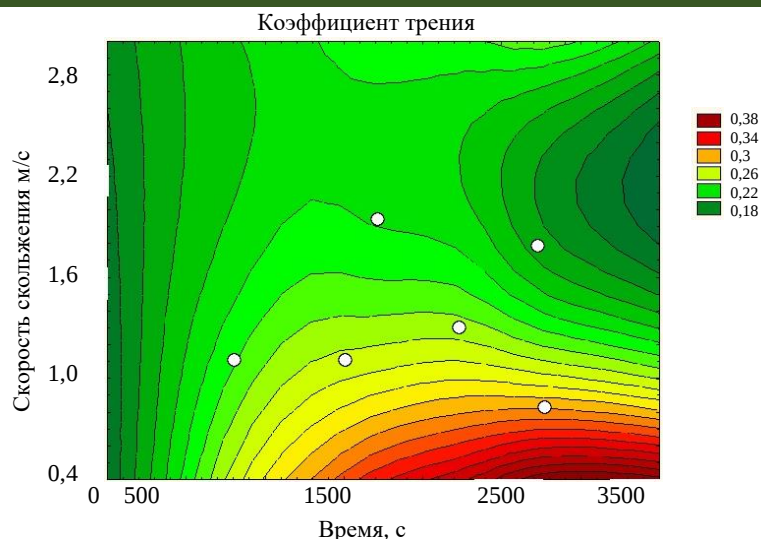


Рис. 7. Регрессионное моделирование значений коэффициентов трения в парах трения «облученная инструментальная сталь — алюминиевый сплав»

С целью прогнозирования и выбора необходимых коэффициентов трения, обеспечивающих заданные величины износо- и адгезионной стойкости стали P18 в контакте с алюминиевыми сплавами после лазерного облучения, в работе проведено регрессионное моделирование результатов экспериментов с помощью программы «Statistica» (рис. 7).

Обсуждение и заключения. В работе экспериментально установлено, что улучшению основных свойств и повышению работоспособности облученных сталей способствуют, в том числе, такие особенности структурного состояния облученных поверхностных слоев сталей, как текстурные эффекты в α - и γ -фазах. Это особенно значимо, если тип текстуры согласуется с видом напряженного состояния упрочненных изделий в условиях эксплуатации.

Установлено, что упрочнять необходимо рабочие поверхности изделий, находящиеся при эксплуатации под действием сжимающих нагрузок. Предпочтительная ориентировка структур лазерной обработки уменьшает склонность поверхностных слоев облученных изделий к хрупкому разрушению, снижает коэффициенты трения в трибосистемах по сравнению с традиционным объемным упрочнением стали на 20–30 %. При этом повышается также и стабильность коэффициентов трения в процессе эксплуатации облученных изделий. Это обстоятельство является важным в обеспечении стационарности процессов в зоне трения, создает предпосылки для интенсификации режимов эксплуатации пар трения.

Практическое использование полученных в работе результатов позволяет путем целенаправленного выбора схем и параметров режима лазерного облучения получать на поверхности структуры, обладающие заданными износо- и адгезионной стойкостью в условиях внешнего нагружения при эксплуатации.

Определена возможность повышения конструкционной прочности и эксплуатационных свойств инструмента за счет проведения лазерного легирования из порошковых покрытий и проведения отпуска после лазерного облучения.

Список литературы

1. Tingting G., Suiyuan C., Xueting C., et al. Effect of laser incident energy on microstructures and mechanical properties of 12CrNi2Y alloy steel by direct laser deposition. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2): 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.024>
2. AlMangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;728:424–435. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
3. Keshavarzkermani A., Sadowski M., Ladani L. Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;736:297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>
4. Su Y., Wang Z., Luet H., et al. Improved wear resistance of directed energy deposited Fe-Ni-Cr alloy via closed-loop controlling laser power. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;75:802–813. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.047>
5. Бровер А.В., Бровер Г.И., Пустовойт В.Н. Повышение эксплуатационных свойств и качества химических покрытий на сталях и сплавах лазерной обработкой. *Вестник Донского государственного технического университета*. 2015;1:62–67. <https://doi.org/10.12737/10388>

6. Zhang K., Deng J., Ding Z., et al. Improving dry machining performance of TiAlN hard-coated tools through combined technology of femtosecond laser-textures and WS₂ soft-coatings. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;30:492–501. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.018>
7. Li S., Chen H., Ting L., et al. Tribological properties of laser surface texturing modified GCr15 steel under graphene/5CB lubrication. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;18:3598–3611. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.030>
8. Fernández-Lucio P., Villarrón-Osorno I., Pereira Neto O., et al. Effects of laser-textured on rake face in turning PCD tools for Ti6Al4V. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:177–188. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.004>
9. Chu Q., Hao S.J., Li W.Y., et al. Impact of shoulder morphology on macrostructural forming and the texture development during probeless friction stir spot welding. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;12:2042–2054. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.013>
10. Keshavarzkermani A., Sadowski M., Ladani L. Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;736:297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>
11. Yu Z., Zheng Y., Chen J., et al. Effect of laser remelting processing on microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel during laser direct metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;284:116738. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116738>
12. Brover G.I., Shcherbakova E.E. Aspects of Structure Formation in Surface Layers of Steel after Laser Alloying from Various Coatings. *Metallurgist*. 2022;66:672–680. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01375-2>
13. Mao B., Siddaiah A., Menezes P.L., et al. Surface texturing by indirect laser shock surface patterning for manipulated friction coefficient. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;257:227–233. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.041>
14. Yan H., Chen Z., Zhao J. et al. Enhancing tribological properties of WS₂/NbC/Co-based self-lubricating coating via laser texturing and laser cladding two-step process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):9907–9919. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.001>
15. Wang T., Wang C., Li J., et al. Microstructure and wear properties of laser-clad NiCo alloy coating on Inconel 718 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;879:160412. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160412>
16. Jiang P.F., Zhang C.H., Zhang S., et al. Microstructure evolution, wear behavior, and corrosion performance of alloy steel gradient material fabricated by direct laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11702–11716. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.074>
17. Liu S., Li Y., Wang Y., et al. Selective laser melting of WC-Co reinforced AISI 1045 steel composites: microstructure characterization and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:1821–1835. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.158>
18. Brover G.I. Shcherbakova E.E. Features of Steel Structure Formation in Areas of High-Speed Laser Hardening from Liquid State. *Metallurgist*. 2022;66:529–538. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01357-4>
19. Liu L., Wang D., Deng G., et al. Laser additive manufacturing of a 316L/CuSn10 multimaterial coaxial nozzle to alleviate spattering adhesion and burning effect in directed energy deposition. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;82:51–63. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.038>
20. Liu Y.-X., Zhang C.-C., Wang R.-Z., et al. Quantitative evaluations of improved surface integrity in ultrasonic rolling process for selective laser melted in-situ TiB₂/Al composite. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;77:412–425. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.026>
21. Meng X., Zhang K., Guo X., et al. Preparation of micro-textures on cemented carbide substrate surface by plasma-assisted laser machining to enhance the PVD tool coatings adhesion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116870. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116870>

References

1. Tingting G, Suiyuan C, Xueting C, et al. Effect of laser incident energy on microstructures and mechanical properties of 12CrNi2Y alloy steel by direct laser deposition. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(2):395–402. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.024>
2. AlMangour B, Grzesiak D, Yang J-M. Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017;728:424–435. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
3. Keshavarzkermani A, Sadowski M, Ladani L. [Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation.](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130) *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;736:297–305.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>

4. Su Y, Wang Z, Luet H, et al. Improved wear resistance of directed energy deposited Fe-Ni-Cr alloy via closed-loop controlling laser power. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;75:802–813. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.047>

5. Brover AV, Brover GI, Pustovoyt VN. Improving quality and performance properties of chemical coatings on steels and alloys by laser treatment. *Vestnik of Don State Technical University*. 2015;1:62–67. <https://doi.org/10.12737/10388> (In Russ.).

6. Zhang K, Deng J, Ding Z, et al. Improving dry machining performance of TiAlN hard-coated tools through combined technology of femtosecond laser-textures and WS₂ soft-coatings. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;30:492–501. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.10.018>

7. Li S, Chen H, Ting L, et al. Tribological properties of laser surface texturing modified GCr15 steel under graphene/5CB lubrication. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;18:3598–3611. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.030>

8. Fernández-Lucio P, Villarón-Osorno I, Pereira Neto O, et al. Effects of laser-textured on rake face in turning PCD tools for Ti6Al4V. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:177–188. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.004>

9. Chu Q, Hao SJ, Li WY, et al. Impact of shoulder morphology on macrostructural forming and the texture development during probeless friction stir spot welding. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;12:2042–2054. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.013>

10. Keshavarzkermani A, Sadowski M, Ladani L. Direct metal laser melting of Inconel 718: Process impact on grain formation and orientation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;736:297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.130>

11. Yu Z, Zheng Y, Chen J, et al. Effect of laser remelting processing on microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel during laser direct metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;284:116738. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116738>

12. Brover GI, Shcherbakova EE Aspects of Structure Formation in Surface Layers of Steel after Laser Alloying from Various Coatings. *Metallurgist*. 2022;66:672–680. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01375-2>

13. Mao B, Siddaiah A, Menezes PL, et al. Surface texturing by indirect laser shock surface patterning for manipulated friction coefficient. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;257:227–233. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.041>

14. Yan H, Chen Z, Zhao J, et al. Enhancing tribological properties of WS₂/NbC/Co-based self-lubricating coating via laser texturing and laser cladding two-step process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):9907–9919. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.001>

15. Wang T, Wang C, Li J, et al. Microstructure and wear properties of laser-clad NiCo alloy coating on Inconel 718 alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;879:160412. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160412>

16. Jiang PF, Zhang CH, Zhang S, et al. Microstructure evolution, wear behavior, and corrosion performance of alloy steel gradient material fabricated by direct laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11702–11716. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.074>

17. Liu S, Li Y, Wang Y, et al. Selective laser melting of WC-Co reinforced AISI 1045 steel composites: microstructure characterization and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:1821–1835. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.158>

18. Brover GI Shcherbakova EE. Features of Steel Structure Formation in Areas of High-Speed Laser Hardening from Liquid State. *Metallurgist*. 2022;66:529–538. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01357-4>

19. Liu L, Wang D, Deng G, et al. Laser additive manufacturing of a 316L/CuSn10 multimaterial coaxial nozzle to alleviate spattering adhesion and burning effect in directed energy deposition. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;82:51–63. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.038>

20. Liu Y-X, Zhang C-C, Wang R-Z, et al. Quantitative evaluations of improved surface integrity in ultrasonic rolling process for selective laser melted in-situ TiB₂/Al composite. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;77:412–425. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.026>

21. Meng X, Zhang K, Guo X, et al. Preparation of micro-textures on cemented carbide substrate surface by plasma-assisted laser machining to enhance the PVD tool coatings adhesion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116870. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116870>

Об авторах:

Бровер Галина Ивановна, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, abrover@mail.ru

Щербакова Елена Евгеньевна, доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, кандидат технических наук (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), bsherbakovaee@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Г.И. Бровер — постановка задачи, выбор методов и методик исследований, участие в проведении металлофизических экспериментов и в обсуждении их результатов, построение математической и компьютерной модели. Е.Е. Щербакова — критический обзор литературных источников по теме исследования, участие в проведении металлофизических экспериментов и в обсуждении их результатов.

Поступила в редакцию 01.04.2023.

Поступила после рецензирования 27.04.2023.

Принята к публикации 27.04.2023.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Galina I. Brover, professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Eng.), abrover@mail.ru

Elena E. Shcherbakova, associate professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), bsherbakovaee@mail.ru

Claimed contributorship:

GI Brover: problem statement, selection of research methods and techniques, participation in conducting metallophysical experiments and in discussion of their results, construction of a mathematical and computer model. EE Shcherbakova: critical review of literature sources on the subject of research, participation in conducting metallophysical experiments and in discussion of their results.

Received 01.04.2023.

Revised 27.04.2023.

Accepted 27.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.