

Токарев Д.И., Дроздов А.А., Морозов Е.А., Абляз Т.Р., Иванова Ю.С., Полежаев И.С. Влияние лазерного воздействия на состояние закаленной быстрорежущей стали P6M5 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 34–41. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.04

Tokarev D.I., Drozdov A.A., Morozov E.A., Ablyaz T.R., Ivanova Yu.S., Polezhaev I.S. The influence of laser exposure on the state of hardened high-speed steel P6M5. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 4, pp. 34–41. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 4, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.4.04

УДК 621.78

Д.И. Токарев, А.А. Дроздов, Е.А. Морозов, Т.Р. Абляз, Ю.С. Иванова, И.С. Полежаев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СОСТОЯНИЕ ЗАКАЛЕННОЙ
БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ P6M5**

Статья посвящена исследованию влияния лазерного воздействия большой мощности на изменение твердости и микроструктуры закаленной быстрорежущей стали P6M5 для определения возможности проведения термообработки данного материала лазерным излучением. Воздействие лазерным лучом на торцевую поверхность фрезы из закаленной быстрорежущей стали P6M5 (63–65 HRC) производилось на установке Optomec LENS 850-R. Использовался иттербиевый волоконный лазер постоянного действия YLR-1000 (мощность 1 кВт, длина волны 1070 нм). Постоянные параметры лазерной обработки: диаметр пучка 2 мм (площадь пучка 0,0314 см²); скорость прохода 0,8 см/с. Переменные параметры лазерной обработки: 1-й режим – плотность мощности 12 кВт/см² (мощность 376,8 Вт); 2-й режим – плотность мощности 16 кВт/см² (мощность 502,4 Вт). Визуально на торце фрезы остались дорожки от прохода лазерного луча, имеющие четко выраженную структуру поверхности: темная полоса шириной, равной диаметру лазерного пучка 2 мм, и длиной, равной длине прохода лазерного пучка, которую окружает светлая полоса шириной 0,5 мм, которую затем окружает темная полоса шириной 0,5 мм (прижег). Зона термического воздействия лазерного луча по глубине материала на микрофотографиях имеет вид светлой округлой зоны шириной, примерно равной диаметру лазерного пучка 2 мм, и глубиной 0,5 мм. Замеры твердости внутри зоны лазерного воздействия показали, что твердость закаленного материала фрезы P6M5 в среднем снизилась на 1–2 единицы HRC, что позволяет сделать вывод об отпуске материала. Исследование микроструктуры выявило, что снижение твердости в зоне термического воздействия произошло в результате частичного растворения карбидов вольфрама, при этом изменения структуры мартенсита не произошло. Таким образом, показана возможность проведения отпуска закаленной быстрорежущей стали P6M5 на металлическом принтере Optomec LENS 850-R путем лазерного воздействия.

Ключевые слова: лазер, иттербиевый волоконный лазер, металлический принтер, Optomec LENS 850-R, лазерное воздействие, термообработка, отпуск, быстрорежущая сталь, P6M5, зона термического воздействия, прижег, микроструктура, твердость, карбиды вольфрама, мартенсит.

D.I. Tokarev, A.A. Drozdov, E.A. Morozov, T.R. Ablyaz, Yu.S. Ivanova, I.S. Polezhaev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE INFLUENCE OF LASER EXPOSURE ON THE STATE
OF HARDENED HIGH-SPEED STEEL P6M5**

The article is devoted to the study of the effect of high-power laser action on the change of hardness and microstructure of hardened high-speed steel P6M5 to determine the possibility of heat treatment of this material by laser radiation. The laser beam impact on the end surface of the cutter from hardened high-speed steel P6M5 (63-65 HRC) was made at the Optomec LENS 850-R. The ytterbium fiber laser of constant action YLR-1000 (power 1 kW, wavelength 1070 nm) was used. The constant parameters of the laser treatment: beam diameter 2 mm (the area of the beam 0.0314 cm²); the passage speed 0.8 cm/s. The variable parameters of laser treatment: 1-st mode – a power density 12 kW/cm² (power 376.8 W); 2nd mode – power density 16 kW/cm² (power 502.4 W). Visually, at the end of the milling cutter there were tracks from the passage of the laser beam, having a clearly defined surface structure: a dark band width equal to the diameter of the laser beam 2 mm and a length equal to the length of the passage of the laser beam, which is surrounded by a light band width of 0.5 mm, which is then surrounded by a dark band width of 0.5 mm (cauterized). The zone of thermal impact of the laser beam on the depth of the material in micrographs has the form of a light round zone width, approximately equal to the diameter of the laser beam 2 mm, and a depth of 0.5 mm. Hardness measurements within the zone of laser exposure showed that the hardness of the hardened material of the milling cutter P6M5 on average decreased by 1-2 units HRC, that allows to draw a conclusion about the tempering of material. The study of the microstructure revealed that the decrease in hardness in the zone of thermal action occurred as a result of partial dissolution of tungsten carbides, while changes in the structure of martensite did not occur. Thus, the possibility of tempering of hardened high-speed steel P6M5 on a metal printer Optomec LENS 850-R by laser exposure is shown.

Keywords: laser, ytterbium fiber laser, metal printer, Optomec LENS 850-R, laser exposure, heat treatment, tempering, high speed steel, P6M5, heat treatment zone, cauterization, microstructure, hardness, tungsten carbides, martensite.

Введение

В настоящее время технологии лазерной обработки металлов находят все большее применение. На кафедре МТиКМ ПНИПУ ведутся работы по изучению технологии термообработки металлов с помощью лазерного излучения большой мощности с целью формирования необходимых физико-механических свойств и структурно-фазового состояния. Работы проводятся с использованием нового современного иттербиевого волоконного лазера постоянного действия, который имеет свои энергетические параметры, отличные от ранее использовавшихся для лазерной термообработки видов лазеров.

В настоящее время процессы термообработки лазерным излучением в основном сконцентрированы на лазерной закалке, поэтому изучение возможности отпуска лазерным излучением, в частности закаленных быстрорежущих сталей, является актуальной научной задачей.

Цель данной работы – исследование воздействия лазером постоянного действия большой мощности на изменение твердости и микроструктуры закаленной быстрорежущей стали Р6М5 для определения возможности проведения термообработки данного материала лазерным излучением.

Обзор литературы

Первые результаты исследований по лазерной закалке металлов в России появились в 1980-х годах [1]. В работах [2–6] разработаны основы технологии лазерной закалки быстрорежущих сталей. В работах [7–9] представлены сведения о лазерной закалке различных металлов, в основном конструкционных сталей. В работах [10–15] углубленно изучаются физические механизмы поверхностного упрочнения при лазерной закалке инструментальных и быстрорежущих сталей. В настоящее время научные работы в этой области продолжают в связи с появлением новых марок обрабатываемых материалов, видов лазеров и технологий лазерной обработки [16–18]. Имеется большое число современных зарубежных научных работ по различным проблемам лазерной закалки сталей [19–26]. Большинство авторов в работах до 2010-х гг. использовали лазеры импульсного действия на основе кварца (SiO_2), рубина (Al_2O_3), лазеры непрерывного действия на основе углекислого газа (CO_2). Анализ работ показал, что большинство современных исследователей используют алюмо-иттриевые лазеры с легированием неодимом (Nd:YAG) импульсного действия [20, 21, 25]. При этом исследования лазерного воздействия иттербиевым волоконным лазером (Yb:YAG) постоянного действия (CW) от-

сутствуют. Также мало представлены исследования других видов термообработки, кроме закалки.

С развитием технологий лазерной обработки металлов, в частности с появлением современных установок с лазерами большой мощности, появляются новые технологические возможности термической обработки металлов. Однако внедрение этих методов сдерживается отсутствием научной информации об их практическом применении. Актуальной проблемой остается изучение возможности отпуска с помощью лазерного воздействия закаленных быстрорежущих сталей. Ввиду этого в данной работе было исследовано влияние лазерного воздействия иттербиевым волоконным лазером (Yb:YAG) постоянного действия (CW) на состояние закаленной быстрорежущей стали Р6М5, широко применяемой для изготовления различных видов режущих инструментов.

Преимущества проведения термической обработки путем лазерного воздействия по сравнению с традиционным методом нагрева в печи [1, 17, 22] заключаются в следующем:

1. Быстрота обработки. Скорость движения лазерного луча в среднем 0,01 м/с. Таким образом, обработка длится несколько минут (в печи много часов).

2. Локальное воздействие. Возможность обработки локального участка детали, при этом остальные поверхности детали остаются в исходном состоянии (в печи вся деталь подвергается воздействию, происходит термическое коробление геометрии детали).

3. Отсутствие обезуглероженного слоя (в печи все поверхности детали после обработки имеют обезуглероженный слой, даже при использовании специальных методов, например ванны солей BaCl_2).

Режущий инструмент из быстрорежущей стали Р6М5 поставляется в уже закаленном состоянии. Классическая схема термообработки быстрорежущей стали Р6М5 [27] состоит из изотермического отжига, закалки и трехкратного отпуска (рис. 1).

Быстрорежущую сталь Р6М5 закаливают с температуры 1210–1230 °С [27]. Высокие значения температуры закалки необходимы для более полного растворения вторичных карбидов и получения при нагреве высоколегированного хромом, вольфрамом, молибденом и ванадием аустенита. Это обеспечивает получение после закалки мартенсита, устойчивого против отпуска, благодаря чему у быстрорежущей стали Р6М5 появляется теплостойкость. Для быстрорежущих сталей, имеющих много избыточных карбидов, характерно сохранение мелкого зерна даже при очень высоких значениях температуры закалки. После закалки следует трехкратный отпуск, вызывающий пре-

вращение остаточного аустенита в мартенсит и дисперсное отверждение за счет выделения карбидов.

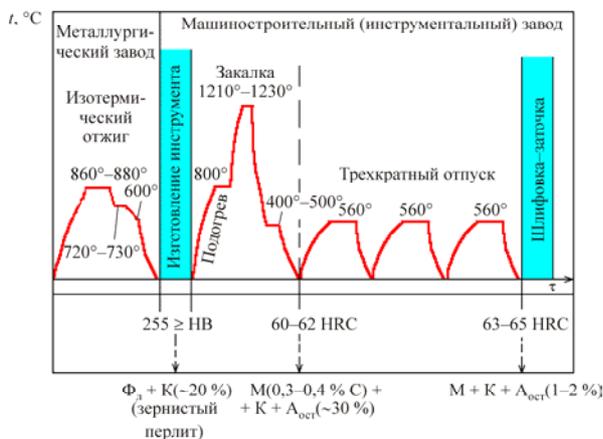


Рис. 1. Классическая схема термообработки быстрорежущей стали Р6М5: $\Phi_{л}$ – легированный феррит; К – карбид; М – мартенсит; $A_{ост}$ – остаточный аустенит

Микроструктура закаленной быстрорежущей стали Р6М5 [28] состоит из легированного мартенсита, остаточного аустенита (до 30 %) и карбидов (рис. 2). После трехкратного отпуска при температуре 560 °С количество остаточного аустенита уменьшается до 2–3 %, твердость увеличивает-ся [27].

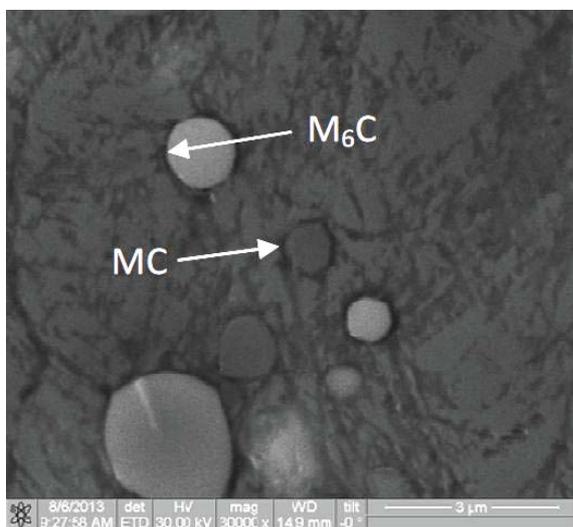


Рис. 2. Структурно-фазовый состав быстрорежущей стали Р6М5 после закалки и трехкратного отпуска

Лазерное излучение – это монохромный когерентный направленный поток фотонов с большой плотностью энергии. Лазерное излучение создает на обрабатываемой поверхности интенсивный источник тепла, в результате происходит резкий локальный нагрев в поверхностном слое металла.

Поскольку источник тепла достаточно быстро движется, происходит также и быстрое охлаждение.

Согласно источнику [29], при различных энергетических параметрах лазерного воздействия, удельной мощности E ($Вт/м^2$) и времени воздействия τ (с) происходят различные виды термической обработки (рис. 3). Приведенные параметры для процессов закалки и оплавления в целом соответствуют экспериментальным данным других исследователей [5–7]. Однако к приведенным параметрам для отжига имеется масса вопросов, связанных с классическими представлениями о физических особенностях процесса отжига [27], а именно с необходимостью длительной выдержки обрабатываемого материала при определенной высокой температуре (см. рис. 1).

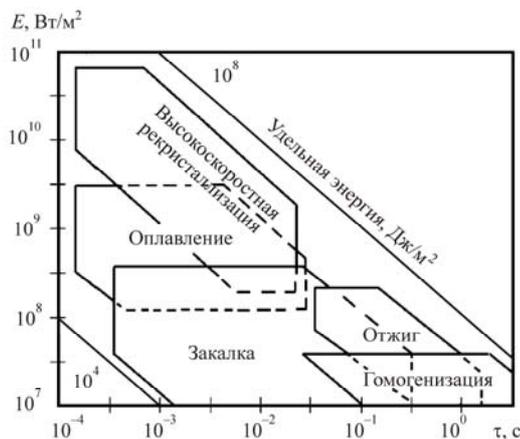


Рис. 3. Влияние энергии лазерного излучения на вид термообработки

Таким образом, существует противоречие между данными источника [29] о возможности отжига с использованием лазерного излучения и данными источника [27] о необходимости проведения отжига при длительной выдержке при определенной высокой температуре.

Таким образом, исследование влияния воздействия лазером постоянного действия большой мощности на изменение твердости и микроструктуры закаленной быстрорежущей стали Р6М5 для определения возможности проведения термообработки данного материала лазерным излучением является актуальной научной задачей.

Методика эксперимента

Для экспериментов выбрана цельная дисковая фреза из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 80 мм, шириной 3 мм.

Воздействие лазерным лучом на торцевую поверхность фрезы производилось на установке Optomes LENS 850-R. Использовался иттербиевый

волоконный лазер постоянного действия YLR-1000 (мощность 1 кВт, длина волны 1070 нм).

Постоянные параметры лазерной обработки: диаметр пучка 2 мм (площадь пучка 0,0314 см²), скорость прохода 0,8 см/с.

Переменные параметры лазерной обработки:

1-й режим – плотность мощности 12 кВт/см² (мощность 376,8 Вт);

2-й режим – плотность мощности 16 кВт/см² (мощность 502,4 Вт).

Замеры твердости проводили на приборе для измерения твердости по методу Роквелла модели ТК-2.

Образцы для металлографических исследований готовились в следующей последовательности. Из фрезы вырезали образец в форме параллелепипеда проволочным электродом на электроэрозионном проволочно-вырезном станке EcoCut Electronica. Вырезанные образцы запрессовывались в бакелит на установке для горячего прессования Лесо PR-4X. Рабочая поверхность образцов шлифовалась мелкозернистой наждачной бумагой зернистостью P240, P1000, P2000 и полировалась до зеркального блеска пастой ГОИ № 2. Рабочая поверхность образцов травилась реактивом Обергоффера (соляная кислота – 3 мл, CuCl₂·2H₂O – 0,2 г, FeCl₂ – 3 г, SnCl₂ – 0,1 г, спирт этиловый – 10 мл, вода – 100 мл; $t = 20$ °С; $\eta = 2$ мин).

Микроструктуру образцов изучали на микроскопе OLYMPUS GX51.

Результаты и обсуждение

Материал фрезы из быстрорежущей стали P6M5 после закалки и трехкратного отпуска должен составлять 63–65 HRC [27]. Замеры твердости в разных точках фрезы показали следующие значения HRC: 64, 65, 63, 64, 63, 64. Таким образом, значения твердости фрезы находятся в требуемых пределах.

На торце фрезы визуально наблюдаются две дорожки от прохода лазерного луча: на 1-м режиме дорожка ближе к внешнему диаметру фрезы, на 2-м режиме дальше к центру фрезы (рис. 4). Дорожки визуально состоят из отпечатка лазерного пучка (диаметром, равным диаметру лазерного пучка 2 мм, и длиной, равной длине прохода лазерного пучка), который окружает светлая полоса шириной 0,5 мм, которую затем окружает темная полоса шириной 0,5 мм (прижег).

Замеры твердости внутри зоны лазерного воздействия показали следующие результаты:

1-й режим – твердость имеет значения HRC: 61, 62, 64, 63, 63, 64;

2-й режим – твердость имеет значения HRC: 61, 62, 61, 63, 64, 62.

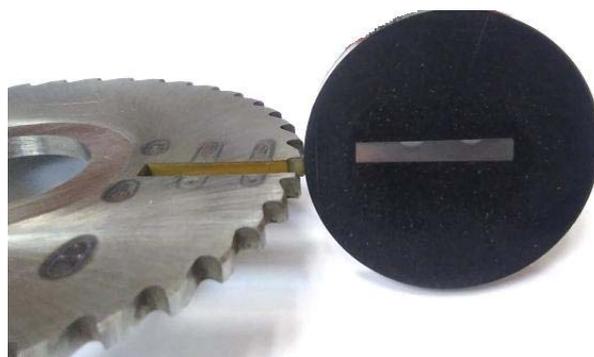


Рис. 4. Дорожки от прохода лазерного луча на фрезе P6M5

Таким образом, в результате воздействия лазерного луча твердость закаленной быстрорежущей стали P6M5 в среднем снизилась на 1–2 единицы HRC, что позволяет сделать вывод о незначительной потере твердости в результате лазерного воздействия.

Для изучения изменения структуры закаленной быстрорежущей стали P6M5 в зоне лазерного воздействия по глубине из фрезы был вырезан образец поперек дорожек от прохода лазерного луча (см. рис. 4).

В результате изучения микроструктуры зоны воздействия лазерного луча на закаленную быстрорежущую сталь P6M5 можно отметить следующие наблюдения:

1. Зона термического воздействия лазерного луча по глубине материала наблюдается визуально. На микрофотографиях наблюдается светлая округлая зона шириной, примерно равной диаметру лазерного пучка 2 мм, и глубиной 0,5 мм. Далее по периметру светлой округлой зоны наблюдается темная полоса шириной 0,1 мм (прижег). Далее наблюдается основной материал (рис. 5).

2. При переходе из зоны основного металла в зону лазерного воздействия наблюдается уменьшение количества и размеров карбидов вольфрама (рис. 6). Карбиды в виде белых сфер представляют собой Fe₃W₃C [28]. Зернистость мартенсита после воздействия лазерным лучом не изменилась. Таким образом, можно сделать вывод, что незначительное уменьшение твердости закаленной быстрорежущей стали P6M5 после воздействия лазерным лучом связано с частичным растворением карбидов вольфрама.

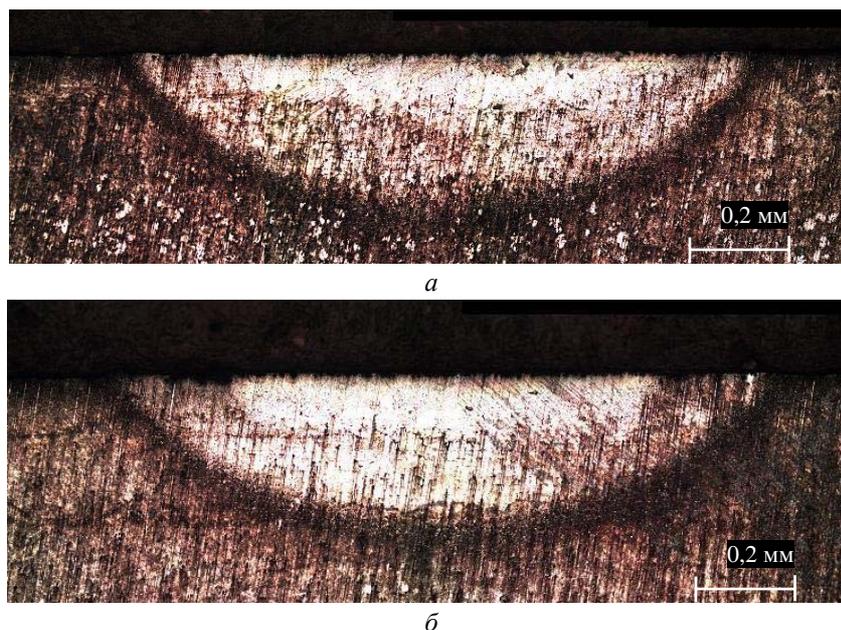


Рис. 5. Зона воздействия лазерного луча по глубине материала: *a* – 1-й режим (плотность мощности 12 кВт/см²); *б* – 2-й режим (плотность мощности 16 кВт/см²)

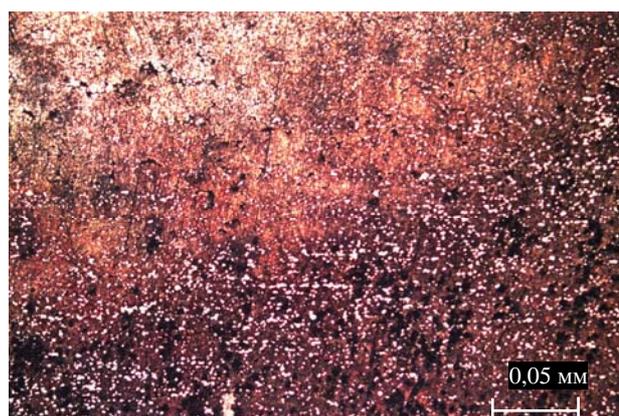


Рис. 6. Микроструктура материала фрезы P6M5

Таким образом, в результате экспериментов установлено, что при воздействии лазерным лучом на закаленную быстрорежущую сталь P6M5 произошло снижение твердости в среднем на 1–2 единицы HRC (отпуск) в результате частичного растворения карбидов вольфрама. Мартенсит сохранился без существенных изменений.

Заклучение

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность проведения отпуска закаленной быстрорежущей стали P6M5 иттербиевым волоконным лазером (Yb:YAG) постоянного действия (CW).

2. Установлено, что исходная твердость 63–65 HRC закаленной быстрорежущей стали P6M5

снизилась на 1–2 единицы HRC (отпуск) в результате воздействия лазерного луча с параметрами: диаметр пучка 2 мм (площадь пучка 0,0314 см²), скорость прохода 0,8 см/с, плотность мощности 12–16 кВт/см² (мощность 376,8–502,4 Вт). Снижение твердости в зоне термического воздействия произошло в результате частичного растворения карбидов вольфрама. Изменения структуры мартенсита не произошло.

3. Зона термического воздействия лазерного луча по глубине материала на микрофотографиях имеет вид светлой округлой зоны шириной, примерно равной диаметру лазерного пучка 2 мм, и глубиной 0,5 мм. Далее по периметру светлой округлой зоны наблюдается темная полоса шириной 0,1 мм (прижег), далее наблюдается основной материал.

Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 665 с.
2. Кулиев А.Д. Разработка процессов скоростной закалки безвольфрамовых быстрорежущих сталей с использованием лазерного нагрева: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1983. – 223 с.
3. Девойно О.Г. Технология формирования износостойкого поверхностного слоя с использованием лазерного излучения: дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 1986. – 127 с.
4. Крапошин В.С. Структура железоуглеродистых сплавов после закалки из жидкого состояния и основы технологии их термообработки при нагреве концентрированными потоками энергии: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1989. – 550 с.
5. Бровер Г.И. Физические и технологические основы процессов поверхностной термической обработки и легирования с лазерным нагревом: дис. ... д-ра техн. наук. – Ростов н/Д, 1997. – 580 с.
6. Митрофанов А.А. Повышение эксплуатационных свойств быстрорежущих инструментов методами лазерной технологии: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1998. – 198 с.
7. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / В.С. Коваленко, А.Д. Верхотуров, А.Ф. Головкин, И.А. Подчерняева. – М.: Наука, 1986. – 276 с.
8. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Основы лазерного термоупрочнения сплавов. – М.: Высшая школа, 1988. – 159 с.
9. Методы и средства упрочнения поверхности деталей машин концентрированными потоками энергии / А.П. Семенов, И.М. Ковш, И.М. Петрова [и др.]. – М.: Наука, 1992. – 404 с.
10. Бративник Е.В., Великих В.С., Картавец В.С. Применение лазерной закалки для поверхностного упрочнения инструментальных сталей // Технология и организация производства. – 1980. – № 1. – С. 42–43.
11. Дьяченко В.С., Твердохлебов Т.Н., Коростелева А.А. Особенности лазерной термообработки инструмента из быстрорежущих сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 9.1. – С. 25–28.
12. Бураков В.А., Канапенас Р-М.В., Мотеюнас А.В. Структурные особенности лазерной закалки металлорежущего инструмента // Лазерная технология / Ин-т физ. АН Литовской ССР. – Вильнюс, 1985. – Вып. 1. – С. 26–35.
13. Гуреев Д.М. Лазерная обработка быстрорежущих сталей // Механизмы динамической деформации металлов / КПТИ. – Куйбышев, 1986. – С. 102–106.
14. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущих сталей методом лазерной обработки / А.Н. Сафонов, Н.Ф. Зеленцова, Е.А. Сиденков, А.А. Митрофанов // СТИН. – 1995. – № 6. – С. 18–20.
15. Лазерная закалка инструмента из быстрорежущих сталей с предварительной химико-термической обработкой / А.Н. Сафонов, Н.Ф. Зеленцова, А.А. Митрофанов, Е.А. Сафонова // СТИН. – 1998. – № 4. – С. 18–22.
16. Кирилина А.Н. Повышение эффективности управления процессом лазерного термического упрочнения лезвийного инструмента на основе математических моделей: дис. ... канд. техн. наук. – Владимир, 2007. – 157 с.
17. Ярьско С.И. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента на основе совершенствования технологических процессов лазерного импульсного упрочнения: дис. ... д-ра техн. наук. – Самара, 2010. – 490 с.
18. Завестовская И.Н. Теоретическое моделирование процессов поверхностной обработки материалов импульсами лазерного излучения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М., 2012. – 221 с.
19. Konstantino E., Altus E. Fatigue life enhancement by laser surface treatments // Surf. Eng. – 1999. – Vol. 15. – P. 126–128. DOI: 10.1179/026708499101516461
20. Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd:YAG laser welding / F.M. Ghaini, M.J. Hamedi, M.J. Torkamany, J. Sabbaghzadeh // Scr. Materials. – 2007. – Vol. 56. – P. 955–958. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.02.019
21. Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd:YAG laser / B. Mahmoudi, M.J. Torkamany, A.R. Sabour Rouh Aghdam, J. Sabbaghzade // Mater. Des. – 2010. – Vol. 31. – P. 2553–2560. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.11.034
22. Dutta Majumdar J., Manna I. Laser material processing // Int. Mater. – 2011. – Vol. 56. – P. 341–388. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000003
23. A comparative study of high-power diode laser and CO₂ laser surface hardening of AISI 1045 steel / R. Li, Y. Jin, Z. Li, K. Qi // J. Mater. Eng. Perform. – 2014. – Vol. 23. – P. 3085–3091. DOI: 10.1007/s11665-014-1146-x
24. Farshidianfar M.H., Khajepour A., Gerlich A.P. Effect of realtime cooling rate on microstructure in laser additive manufacturing // J. Mater. Process. Technol. – 2016. – Vol. 231. – P. 468–478. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.01.017
25. Gautam G.D., Pandey A.K. Pulsed Nd: YAG laser beam drilling: a review // Opt. Laser. Technol. – 2018. – Vol. 100. – P. 183–215. DOI: org/10.1016/j.optlastec.2017.09.054
26. Laser surface hardening of 11 % Cr ferritic stainless steel and its sensitisation behaviour / J. Sundqvist, T. Manninen, H.P. Heikkinen, S. Anttila, A.F.H. Kaplan // Surf. Coat. Technol. – 2018. – Vol. 344. – P. 673–679. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.04.002
27. Гуляев А.П. Металловедение: учеб. для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
28. Структурно-фазовое состояние быстрорежущей стали Р6М5 после термической обработки / М.К. Скаков, Б.К. Рахадиллов [и др.] // Вестник КазНУ. Сер. физическая. – 2014. – № 1(48). – С. 53–59.
29. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1988. – 159 с.

References

1. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoj obrabotki: ucheb. posobie dlia vuzov [Technological processes of laser process-

ing]. Ed. A.G. Grigor'iantsa. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2006, 665 p.

2. Kuliev A.D. Razrabotka protsessov skorostnoi zakalki bezvolframovykh bystrorezhushchikh stalei s ispol'zovaniem lazernogo nagreva [Technological processes of laser processing]. Ph.D. thesis. Moscow, 1983, 223 p.

3. Devoino O.G. Tekhnologiya formirovaniia iznosostoikogo poverkhnostnogo sloia s ispol'zovaniem lazernogo izlucheniia [Technology of formation of wear-resistant surface layer using laser radiation]. Ph.D. thesis. Minsk, 1986, 127 p.

4. Kraposhin B.C. Struktura zhelezouglerodistykh splavov posle zakalki iz zhidkogo sostoianiia i osnovy tekhnologii ikh termoobrabotki pri nagreve kontsentriruvannymi potokami energii [Structure of iron-carbon alloys after quenching from a liquid state and a basis of technology of their heat treatment at heating by the concentrated streams of energy]. Abstract of doctor's degree dissertation. Moscow, 1989, 550 p.

5. Brover G.I. Fizicheskie i tekhnologicheskie osnovy protsessov poverkhnostnoi termicheskoi obrabotki i legirovaniia s lazernym nagrevom [Physical and technological basis of surface heat treatment and laser-heated alloying processes]. Abstract of doctor's degree dissertation, Rostov n/D, 1997, 580 p.

6. Mitrofanov A.A. Povysenie ekspluatatsionnykh svoystv bystrorezhushchikh instrumentov metodami lazernoi tekhnologii [Increasing the performance of high speed cutting tools by laser technology]. Ph.D. thesis, Moscow, 1998, 198 p.

7. Kovalenko B.C., Verkhoturov A.D., Golovko A.F., Podcherniaeva I.A. Lazernoe i elektroerozionnoe uprochnenie materialov [Laser and erosion hardening of materials]. Moscow: Nauka, 1986, 276 p.

8. Grigor'iants A.G., Safonov A.N. Osnovy lazernogo termouprochneniia splavov [Fundamentals of laser thermal hardening of alloys]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1988, 159 p.

9. Semenov A.P., Kovsh I.M., Petrova I.M. Metody i sredstva uprochneniia poverkhnosti de-talei mashin kontsentriruvannymi potokami energii [Methods and means of strengthening the surface of machine parts with concentrated energy flows]. Moscow: Nauka, 1992, 404 p.

10. Brativnik E.V., Velikikh B.C., Kartavtsev B.C. Primenenie lazernoi zakalki dlia poverkhnostnogo uprochneniia instrumental'nykh stalei [Application of laser hardening for surface hardening of tool steels]. *Tekhnologiya i organizatsiia proizvodstva*, 1980, no. 1, pp. 42–43.

11. D'iachenko B.C., Tverdokhlebov T.N., Korosteleva A.A. Osobennosti lazernoi termoobrabotki instrumenta iz bystrorezhushchikh stalei [Features of laser heat treatment of high-speed steel tools]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 1984, no. 9.1, pp. 25–28.

12. Burakov V.A., Kanapenas R.-M.V., Moteiunas A.B. Strukturnye osobennosti lazernoi zakalki metallovezhushchego instrumenta [Structural features of laser hardening of metal-cutting tools]. *Lazernaia tekhnologiya / In-t fiz. AN Litovskoi SSR. Vil'nius*, 1985, iss. 1, pp. 26–35.

13. Gureev D.M. Lazernaia obrabotka bystrorezhushchikh stalei [Laser treatment of high-speed steels]. *Mekhanizmy dinamicheskoi deformatsii metallov / KPII. Kuibyshev*, 1986, pp. 102–106.

14. Safonov A.N., Zelentsova N.F., Sidenkov E.A., Mitrofanov A.A. Povysenie stoikosti instrumenta iz bystrorezhushchikh stalei metodom lazernoi obrabotki [Increasing the tool life of high-speed steels by laser machining]. *STIN*, 1995, no. 6, pp. 18–20.

15. Safonov A.N., Zelentsova N.F., Mitrofanov A.A., Safonova E.A. Lazernaia zakalka instrumenta iz bistrorezhushchikh stalei s predvaritel'noi khimiko-termicheskoi obrabotkoi [Laser hardening of tools made of high-speed steels with chemical and thermal pre-treatment]. *STIN*, 1998, no. 4, pp. 18–22.

16. Kirilina A.N. Povysenie effektivnosti upravleniia protsessom lazernogo termicheskogo uprochneniia lezvii-nogo instrumenta na osnove matematicheskikh modelei [Increasing the efficiency of laser thermal hardening process control of blade tools on the basis of mathematical models]. Ph.D. thesis. Vladimir, 2007, 157 p.

17. Iares'ko S.I. Povysenie rabotosposobnosti metallovezhushchego instrumenta na osnove sovershenstvovaniia tekhnologicheskikh protsessov lazernogo impul'snogo uprochneniia [Increasing the serviceability of metal-cutting tools by improving the technological processes of laser pulse hardening]. Abstract of doctor's degree dissertation. Samara, 2010, 490 p.

18. Zavestovskaia I.N. Teoreticheskoe modelirovaniie protsessov poverkhnostnoi obrabotki materialov impul'sami lazernogo izlucheniia [Theoretical modeling of surface treatment of materials by laser pulses]. Abstract of doctor's degree dissertation. Moscow, 2012, 221 p.

19. Konstantino E., Altus E. Fatigue life enhancement by laser surface treatments. *Surf. Eng.*, 1999, vol. 15, pp. 126–128. DOI: 10.1179/026708499101516461

20. Ghaini F.M., Hamedi M.J., Torkamany M.J., Sabbaghzadeh J. Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd:YAG laser welding. *Scr. Materials*, 2007, vol. 56, pp. 955–958. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.02.019

21. Mahmoudi B., Torkamany M.J., Sabour A.R., Rouh Aghdam, J. Sabbaghzade Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd:YAG laser. *Mater. Des.*, 2010, vol. 31, pp. 2553–2560. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.11.034

22. Dutta Majumdar J., Manna I. Lasermaterial processing. *Int. Mater.*, 2011, vol. 56, pp. 341–388. DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000003

23. Li R., Jin Y., Li Z., Qi K. A comparative study of high-power diode laser and CO₂ laser surface hardening of AISI 1045 steel. *Journal Mater. Eng. Perform.*, 2014, vol. 23, pp. 3085–3091. DOI: 10.1007/s11665-014-1146-x

24. Farshidianfar M.H., Khajepour A., Gerlich A.P. Effect of realtime cooling rate on microstructure in laser additive manufacturing. *Journal Mater. Process. Technol.*, 2016, vol. 231, pp. 468–478. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.01.017

25. Gautam G.D., Pandey A.K. Pulsed Nd: YAG laser beam drilling: a review. *Opt. Laser. Technol.*, 2018, vol. 100, pp. 183–215. DOI: org/10.1016/j.optlastec.2017.09.054

26. Sundqvist J., Manninen T., Heikkinen H.P., Anttila S., Kaplan A.F.H. Laser surface hardening of 11 % Cr ferritic stainless steel and its sensitisation behavior. *Surf. Coat. Technol.*, 2018, vol. 344, pp. 673–679. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.04.002

27. Guliaev A.P. Metallovedenie [Metal Science]. 6nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1986, 544 p.

28. Skakov M.K., Rakhadilov B.K. et al. Strukturno-fazovoe sostoianie bystrorezhushchei stali R6M5 posle termicheskoi obrabotki [Structural-phase state of high speed steel P6M5 after heat treatment]. *Vestnik KazNU. Ser. fiziche-skaia.*, 2014, no. 1(48), pp. 53–59.

29. Grigor'iants A.G., Safonov A.N. Lazernaia tekhnika i tekhnologiya [Laser technology and technology]. Moscow: Vysshaia shkola, 1988, 159 p.

Получено 20.06.19

Опубликовано 26.11.19

Сведения об авторах

Токарев Денис Иванович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологии и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: den.tokarev.201@yandex.ru.

Дроздов Андрей Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры материалов, технологии и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: dron.perm@mail.ru.

Морозов Евгений Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры материалов, технологии и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: morozov.laser@gmail.com.

Абляз Тимур Ризович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, завкафедрой материалов, технологии и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Иванова Юлия Сергеевна (Пермь, Россия) – студентка кафедры материалов, технологии и конструи-

рования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: yulya.ivanova.97@inbox.ru.

Полежаев Игорь Сергеевич (Пермь, Россия) – студент кафедры материалов, технологии и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: no4nik03@gmail.com.

About the authors

Denis I. Tokarev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials Technology and Design of Machines, Perm National Research polytechnic university; e-mail: den.tokarev.201@yandex.ru.

Andrey A. Drozdov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Materials Technology and Design of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: dron.perm@mail.ru.

Evgeny A. Morozov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Materials Technology and Design of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: morozov.laser@gmail.com.

Timur R. Ablyaz (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Head of Department of Materials Technology and Design of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Yulia S. Ivanova (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Materials, Technologies and Machine Design, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: yulya.ivanova.97@inbox.ru.

Igor S. Polezhaev (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Materials, Technologies and Machine Design, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: no4nik03@gmail.com.