

Морозов Е.А., Оглезнева С.А. Технологические рекомендации по лазерной закалке порошкового псевдосплава ЖГр1Д15 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 72–77. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.09

Morozov E.A., Oglezneva S.A. Technological recommendations about laser heat treatments of powder pseudo-alloy FeCu15. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2018, vol. 20, no. 4, pp. 72–77. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.09

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 20, № 4, 2018

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science

<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.09

УДК 621.785.54

Е.А. Морозов, С.А. Оглезнева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ ПОРОШКОВОГО ПСЕВДОСПЛАВА ЖГр1Д15

Целью исследования является повышение эксплуатационных характеристик порошковых псевдосплавных материалов с помощью поверхностной термической обработки. Такие материалы обладают уникальными свойствами, например самосмазыванием в условиях сухого трения, высоким коэффициентом теплопроводности, высокой электроэрозионной стойкостью. Недостатком порошковых псевдосплавов является их относительно низкая прочность. Рассмотрен способ поверхностного упрочнения высокоэнергетической обработкой – лазерным излучением. Описана методика проведения экспериментальных исследований, рассмотрен способ получения порошкового материала, его химический состав, показано используемое оборудование. Приведены результаты исследований микроструктуры и микротвердости поверхностного слоя порошкового псевдосплава сталь–медь после лазерной термической обработки волоконным лазером постоянного действия с максимальной мощностью 1 кВт, указаны режимы ЛТО, оценено влияние параметров ЛТО на характеристики закаленного слоя, приведена номограмма для выбора технологических режимов ЛТО (мощность лазерного излучения, диаметр пучка и скорость перемещения), позволяющих получить требуемую микротвердость и глубину закаленного слоя, задаваясь определенным значением плотности мощности. Правильность назначения технологических режимов с помощью номограммы проверена экспериментальными исследованиями. Показано распределение микротвердости по глубине закаленного слоя, а также зависимость микротвердости от глубины упрочненной зоны на различных режимах ЛТО. Установлено, что микротвердость поверхностного слоя после ЛТО достигает 900–1000 HV (67–69 HRC), что значительно превышает показатели твердости, получаемые классической объемной термообработкой (43–45 HRC). Это связано с более высокими скоростями нагрева и охлаждения при использовании лазерного излучения в качестве источника нагрева.

Ключевые слова: лазерная термообработка, закалка, волоконный лазер, лазер постоянного действия, диаметр лазерного луча, плотность мощности, порошковая металлургия, псевдосплав сталь–медь, микроструктура, микротвердость, номограмма.

E.A. Morozov, S.A. Oglezneva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

TECHNOLOGICAL RECOMMENDATIONS ABOUT LASER HEAT TREATMENTS OF POWDER PSEUDO-ALLOY FEC1CU15

The purpose of the study is to improve the performance characteristics of powder pseudo-alloy materials using surface heat treatment. Such materials have unique properties, for example, self-lubrication under dry friction conditions, high thermal conductivity coefficient, and high electro-erosion resistance. The disadvantage of powder pseudo-alloys is their relatively low strength. The paper considers the method of surface hardening by high-energy treatment - laser radiation. The paper describes the method of experimental research, describes the method of obtaining powder material, its chemical composition, shows the equipment used. The results of studies of the microstructure and microhardness of the surface layer of steel-copper powder pseudo-alloy after laser heat treatment (LHT) of a continuous-wave fiber laser with a maximum power of 1 kW are given, LHT modes are indicated, the influence of LHT parameters on the characteristics of the hardened layer is evaluated, a nomogram is given for selection technological regimes of LHT (laser radiation power, beam diameter and speed of movement), allowing to obtain the required microhardness and depth of the hardened layer by specifying a certain power density value. The correctness of the appointment of technological regimes using nomograms verified by experimental studies. The distribution of microhardness over the depth of the hardened layer, as well as the dependence of the microhardness on the depth of the hardened zone in various LHT modes, is shown. It has been established that the microhardness of the surface layer after LHT reaches 900-1000 HV (67-69 HRC), which significantly exceeds the hardness values obtained by classical volumetric heat treatment (43-45 HRC), which is associated with higher heating and cooling rates when using laser radiation as a heat source.

Keywords: laser heat treatment, hardening, fiber laser, continuous laser, laser beam diameter, power density, powder metallurgy, steel-copper pseudo-alloy, microstructure, microhardness, nomogram.

Одним из способов повышения эксплуатационных свойств порошковых псевдосплавов является варьирование массового соотношения компонентов (компонентами исследуемого материала являются железо, графит, медь) или введение различных добавок [1–6]. Целью настоящей работы

является улучшение характеристик псевдосплавного порошкового материала ЖГр1Д15 путем разработки научно-технологических рекомендаций по выбору режимов лазерной термической обработки (далее – ЛТО) с целью получения требуемых геометрических и прочностных характеристик обработанного поверхностного слоя.

Типичным режимом термообработки порошкового псевдосплава сталь–медь типа ЖГр1Д15 является закалка от температуры 780 °С. При этом достигается твердость 45 HRC [7]. Повышение температуры закалики приводит к снижению твердости из-за образования остаточного аустенита.

При скоростных поверхностных методах термообработки, таких как лазерная закалка, возможно достижение более высоких значений твердости, а оптимальные режимы закалики обычно подбирают экспериментально для каждого материала и типа лазера.

Анализ литературы показывает, что наиболее значимыми параметрами, оказывающими влияние на процессы, протекающие при лазерной термической обработке материалов, полученных традиционными методами (литье, прокат и т.д), и на свойства обработанных материалов, являются мощность лазера, плотность мощности лазерного излучения и скорость перемещения лазера. Важное значение также имеют вид распределения мощности и форма пучка лазера (круглая или прямоугольная), длина волны и тип лазера, шероховатость поверхности, свойства и структура обрабатываемого материала [8–15].

Несмотря на значительное количество работ по лазерной термообработке материалов, ее влияние на отдельные классы материалов, такие, например, как псевдосплавы сталь–медь, получаемые методами порошковой металлургии, практически не изучалось. Работы по ЛТО порошковых сталей обычно имеют цель снизить пористость приповерхностных слоев обрабатываемых изделий оплавлением или упрочнить поверхность наплавкой износостойких составов [16]. Кроме того, для развития практических применений этой технологии в машиностроении необходимо проведение исследований и на более сложных по геометрии объектах.

Исследуемый материал – ЖГрД15, его химический состав: 1 % С, 15 % Си, остальное железо. Часть образцов представляла собой детали (направляющие аппараты) ступеней погружных многоступенчатых насосов производства ЗАО «Новомет-Пермь», изготовленные методом порошковой металлургии. Модельные образцы того же состава и структуры имели форму и размеры, имитирующие форму и размеры кольцевых выступов на верхних дисках направляющих аппаратов, которые вместе с шайбами рабочих колес образуют пару

трения осевых подшипников ступени. Модельные образцы имели вид кольцевых выступов шириной 4,5 мм, внешним диаметром 49 мм и высотой ~2,5 мм, выполненных на диске толщиной 2,5 мм из того же материала.

Заготовки образцов получены традиционными методами порошковой металлургии: прессованием смеси порошков железа и графита и спеканием в атмосфере диссоциированного аммиака с одновременной пропиткой медью, ее содержание, определенное на приборе РЭМ-100У с рентгеноспектральным микроанализатором, составило 14,2 мас. %. Структура образцов состоит в основном из пластинчатого перлита различной дисперсности, включений меди, небольшого количества феррита. Твердость материала после спекания составляет 70–100 HRB, микротвердость обычно в пределах 250–300 HV. Кольцевые выступы на образцах для ЛТО получены токарной обработкой предварительно спеченных заготовок.

Для лазерной термической обработки применяли систему OPTOMEC LENS 850-R с волоконным лазером YLR-1000 IPG Photonics с пятном круглого сечения и гауссовым распределением мощности. Обработка проводилась в среде высокочистого аргона с содержанием кислорода до 0,001 % по объему.

Выбор параметров лазерной обработки проводили с учетом данных работ [17–19]. При планировании эксперимента задавали следующие параметры: мощность лазера P , плотность мощности $\frac{P}{S}$, $S = \pi d^2$, где d – диаметр пятна лазерного пучка в месте падения на обрабатываемую поверхность, и скорость перемещения лазерного пучка по поверхности V . Размер пятна регулировали изменением расстояния от фокальной плоскости лазера до обрабатываемой поверхности. Расчет характеристик лазерного луча проводим по ГОСТу¹.

Образцы после обработки лазерным излучением разрезали перпендикулярно поверхности образца на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Electronica EcoCut и исследовали с поверхности и по глубине обработанного слоя. После получения образца необходимого размера и профиля его обрабатывали на шкурках с различной дисперсностью абразива и полировали на сушке с добавкой алмазной полировальной пасты. Микроструктуру наплавленного слоя выявляли травлением в 4%-ном

¹ GOST R ISO 11146-1-2008. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Part 1. Stigmatic and simple astigmatic beams. URL: http://standartgost.ru/g/ГОСТ_P_ИСО_11146-1-2008#page-1.

растворе азотной или пикриновой кислоты. Полученную структуру исследовали на микроскопе Olympus GX-51 при увеличении $\times 50-1000$.

Твердость с поверхности и по глубине наплавленного слоя измеряли на автоматическом микротвердомере Durascan 70 при нагрузке 50 г с шагом 50 мкм по линии, перпендикулярной поверхности образца в середине лазерной дорожки. В случае попадания планируемого отпечатка на включения меди или видимый с поверхности дефект точку индентации смещали в сторону. Подготовку поверхности образцов для измерения твердости проводили так же, как и для металлографического анализа. Количество замеров делали достаточное для проведения статистической обра-

ботки результатов. Определяли среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонение.

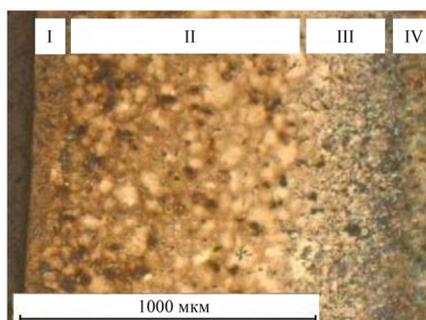
Режимы и результаты ЛТО приведены в таблице. Средние значения микротвердости поверхностного слоя на глубине до 350 мкм колеблются в пределах 765–934 HV, значения глубины слоя с высокой микротвердостью $L_{ЗТВ}^1$ – в пределах 0,34–1,25 мм.

На рис. 1, а приведена микроструктура исследуемого материала после обработки лазером по режиму $W = 1$ кВт, $W/S = 8$ кВт/см², $d = 3,99$ мм, $v = 12$ мм/с (опыт № 11). Твердость на поверхности кольцевого выступа, измеренная по методу Роквелла, составляет 55,5 HRC.

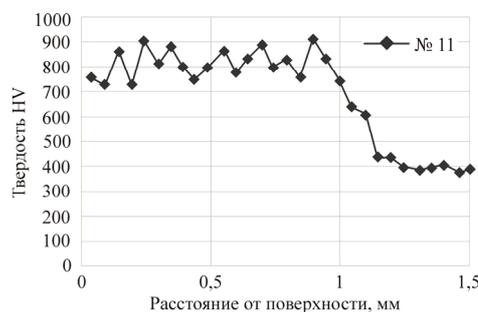
Условия проведения режимов лазерной обработки и результаты

Номер опыта	P , кВт	W/S^* , кВт/см ²	d , мм	V , м/мин	$L_{пл}$, мкм	$L_{ЗТВ}^1$, мм	$L_{ЗТВ}^2$, мм	HV ^{**}
1	0,9	16	2,68	0,72	–	0,94		764
2	0,9	8	3,79	0,6	–	1,1		760
3	0,8	16	2,52	0,6	–	0,64	0,83	894
4	0,8	8	3,57	0,72	–	0,91		811
5	0,7	16	2,36	0,72	–	0,62		928
6	0,7	8	3,34	0,6	–	0,69		934
7	0,6	16	2,19	0,6	–	0,34		854
8	0,6	8	3,09	0,72	–	0,77		883
9	1,0	12	3,2	0,72	139	0,92	0,98	807
10	1,0	12	3,2	0,48	287	1,21	1,36	765
11	1,0	8	3,99	0,72	90	1,02	0,96	810
12	1,0	8	3,99	0,48	170	1,25	1,35	800

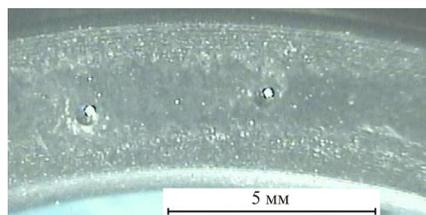
Примечание. $L_{пл}$ – зона полного оплавления; $L_{ЗТВ}^1$ – глубина слоя с микротвердостью выше, чем 700 HV; $L_{ЗТВ}^2$ – глубина до границы с перлитной структурой; ** – средняя величина микротвердости по замерам в диапазоне 0–350 мкм.



а



б



в

Рис. 1. Структура и микротвердость поверхностного слоя (а, б) и вид поверхности псевдосплава сталь–медь (в) после обработки лазером по режиму № 11 $P = 1$ кВт, $P/S = 8$ кВт/см², $d = 3,99$ мм, $V = 0,72$ м/мин. Твердость 55,5 HRC

По результатам, приведенным в таблице, явно просматривается обратно пропорциональная зависимость между микротвердостью и глубиной упрочненной зоны (рис. 2).

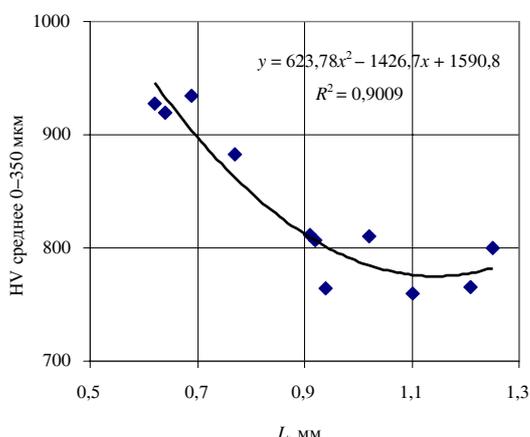


Рис. 2. Аппроксимация полиномом второй степени зависимости средней микротвердости поверхностного слоя HV от глубины упрочненной зоны L

Полином второй степени достаточно точно описывает полученную зависимость, на это указывает коэффициент детерминации R^2 . На основании проведенных исследований и полученной зависимости разработана комплексная номограмма (рис. 3) для выбора режимов ЛТО порошкового псевдосплава ЖГр1Д15.

Для выявления взаимосвязи между свойствами закаленного слоя и режимами ЛТО применен интегральный критерий [20], объединяющий мощность P, диаметр d и скорость V перемещения лазерного луча:

$$K = P/(dv)^{0,4}.$$

Номограмма позволяет выбрать такие параметры обработанной поверхности, как среднюю микротвердость на глубине до 350 мкм и глубину зоны упрочнения. Назначая указанные параметры и задавая плотностью мощности 8 или 16 кВт/см², можно определить мощность лазера, диаметр и скорость перемещения лазерного луча, которые обеспечивают заданные характеристики обработанного слоя.

Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность разработанной методики.

Список литературы

1. Анциферов В. Н., Акименко В. Б., Гревнов Л.М. Порошковые легированные стали. – М.: Металлургия. – 1991. – 318 с.
2. Соловьева Е.В., Довыденков В.А. Свойства материалов на основе железа, полученных инфильтрацией, легированные Ni и Mo // Современное материаловедение: традиции отечественных научных школ и инновационный подход: сб. докл. Всерос. молодеж. науч.-техн. конф. / ВИАМ. – 2017. – С. 198–202.
3. Дьячкова Л.Н., Керженцева Л.Ф., Витязь П.А. Влияние состава стального каркаса псевдосплавов сталь–медь, получаемых инфильтрацией, на их триботехнические свойства // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 4. – С. 364–370.
4. Привалова Н.Н., Довыденков В.А. Материал, инфильтрованный медью, для изготовления подшипников скольжения // Восемнадцатые Вавилонские чтения. Социальные, естественные и технические системы в современном мире: состояние, противоречия, развитие: материалы междунар. междисциплинар. науч. конф.: в 2 ч. / под ред. В.П. Шалаева. – 2015. – С. 274–276.

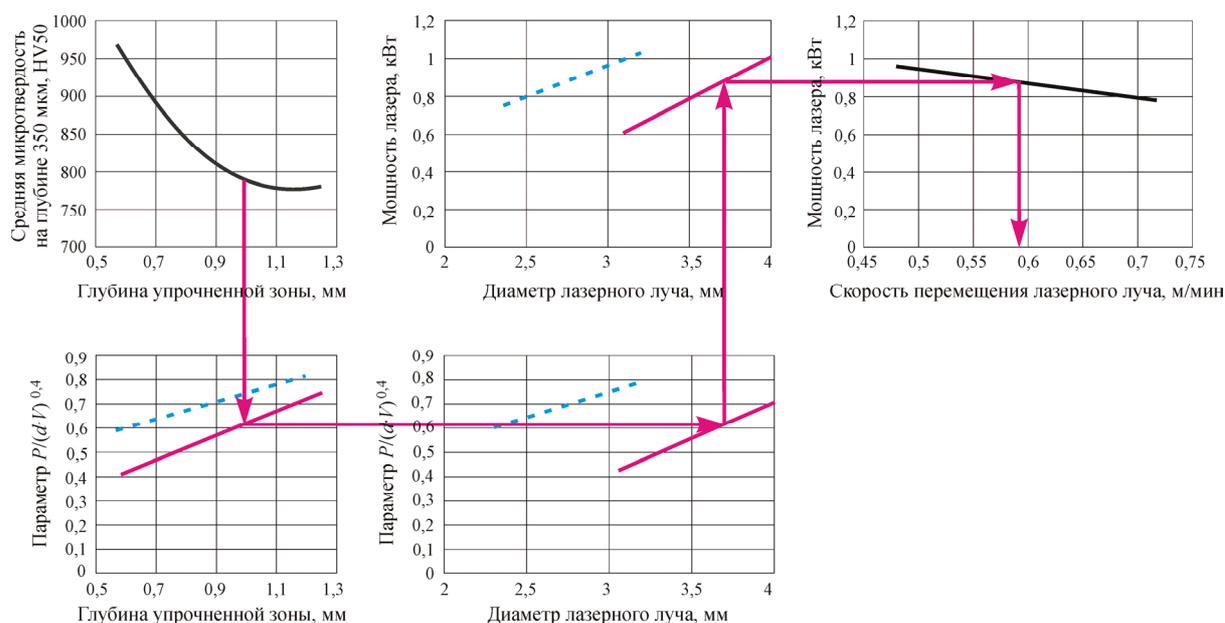


Рис. 3. Номограмма для назначения режимов ЛТО. Плотность мощности: - - - 16 кВт/см²; — 8 кВт/см²

5. Изучение особенностей формирования структуры и свойств порошковых псевдосплавов на основе меди, модифицированных добавками наночастиц ZNO и TIN / Ю.И. Гордеев, А.К. Абкарян, А.В. Суровцев, А.А. Лепешев // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2017. – № 4. – С. 19–28.

6. Привалова Н.Н., Алибеков С.Я. Антифрикционный материал для подшипников скольжения // Россия в пространстве глобальных трансформаций: в фокусе наук о человеке, обществе, природе и технике: материалы междунар. междисцип. науч. конф. / под ред. В.П. Шаляева. – 2016. – С. 342–344.

7. Шацов А.А. Оптимизация состава и режимов термообработки композиционного материала сталь–медь // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1998. – № 5. – С. 52–56.

8. Григорьянц А.Г., Васильцов В.В. Пространственная структура излучения мощных волноводных и волоконных лазеров для технологий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2012. – № 6. – С. 5–33.

9. Qui F., Kujanpää V. Transformation hardening of medium-carbon steel with a fiber laser: the influence of laser power and laser power density // *Mechanika (Mechanics)*. – 2011. – Vol. 17, № 3. – P. 318–323.

10. Goia F., de Lima M. Surface hardening of an AISI D6 cold work steel using a fiber laser // *J. of ASTM Int.* – 2011. – Vol. 8, № 2. – P. 315–318.

11. Safonov A.N. Structure and microhardness of the surface layers of iron-carbon alloys after laser heat treatment // *Metal Science and Heat Treatment*. – 1996. – Vol. 38, № 1–2. – P. 68–74.

12. Астапчик С.А., Бабушкин В.Б., Ивашко В.С. Структурные и фазовые превращения в сталях и сплавах при лазерной термической обработке // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1991. – № 2. – С. 2–5.

13. Крапошин В.С. Влияние остаточного аустенита на свойства сталей и чугунов после поверхностного оплавления // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1994. – № 2. – С. 2–5.

14. Крапошин В.С., Крапошина И.Ф. Влияние параметров лазерного облучения на размеры облученных зон для стали 45 // *Физика и химия обработки материалов*. – 1989. – № 6. – С. 19–24.

15. Qui F., Kujanpää V. Transformation hardening of medium carbon steel with a fiber laser / *Mechanika (Mechanics)*. – 2011. – Vol. 17, № 3. – P. 318–323.

16. Анциферов В.Н., Шмаков А.М., Штенников С.В. Свойства модифицированных сталей // *Порошковая металлургия*. – 1992. – № 7. – С. 76–79.

17. Исследование микроструктуры и рельефа поверхности при лазерной термической обработке тонкостенного цилиндра из порошкового псевдосплавов сталь–медь / В.Г. Гилев, Е.А. Морозов, А.С. Денисова, А.М. Ханов // Изв. Самарского научного центра. – 2012. – Т. 14, № 4(5). – С. 1212–1217.

18. Laser surface hardening of frictional pairs made from steel-copper pseudoalloy / V.G. Gilev, E.A. Morozov, P.N. Kilina, L.D. Sirotenko // *Russian Engineering Research*. – 2016. – Vol. 36, № 2. – P. 152–155.

19. Laser quenching of axial bearings in submersible multistage pumps made of steel-brass pseudo-alloy / V. Gilev, E. Morozov, A. Khanov, T. Ablyaz // *Int. J. of Appl. Eng. Research*. – 2015. – Vol. 10, № 20. – P. 40861–40868.

20. Крапошин В.С., Шахлевич К.В., Бирюков В.П. Лазерное расплавление поверхности луча со сканированием луча // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1988. – № 11. – С. 57–59.

References

1. Antsiferov V. N., Akimenko V. B., Grevnov L.M. *Poroshkovye legirovannye stali [Powder alloy steels]*. Moscow: Metallurgiya, 1991, 318 p.

2. Solov'eva E.V., Dovydenkov V.A. *Svoistva materialov na osnove zheleza, poluchennykh infil'tratsiei, legirovannye NI i MO [Properties of iron-based infiltrated materials alloyed with NI and MO]. *Sovremennoe materialovedenie: traditsii otechestvennykh nauchnykh shkol i innovatsionnyi podkhod: sbornik dokladov Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. VIAM, 2017, pp. 198–202.*

3. D'iachkova L.N., Kerzhentseva L.F., Vitiaz' P.A. *Vliianie sostava stal'nogo karkasa pсевдосплавов stal'–med', poluchaemykh infil'tratsiei, na ikh tribotekhnicheskie svoistva [Influence of steel-copper pseudo-alloy steel frame composition, obtained by infiltration, on their tribotechnical properties]. *Trenie i iznos*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 364–370.*

4. Privalova N.N., Dovydenkov V.A. *Material, infil'trovannyi med'iu, dlia izgotovleniia podshipnikov skol'zheniia [Copper Infiltrated Material for Plain Bearing]. *Vosemnaidsatye Vavilovskie chteniia. Sotsial'nye, estestvennye i tekhnicheskie sistemy v so-vremennom mire: sostoianie, protivorechiia, razvitie: materialy mezhdunarodnoi mezhdistsiplinarnoi nauchnoi konferentsii*. Ed. V.P. Shalaeva, 2015, pp. 274–276.*

5. Gordeev Iu.I., Abkarian A.K., Surovtsev A.V., Lepeshev A.A. *Izuchenie osobennostei formirovaniia struktury i svoistv poroshkovykh pсевдосплавов na osnove medi, modifitsirovannykh dobavkami nanochastits ZNO i TIN [Studying the features of the formation of the structure and properties of powder pseudo-alloys based on copper, modified by the addition of nanoparticles ZNO and TIN]. *Izvestiia vuzov. Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia*, 2017, no. 4, pp. 19–28.*

6. Privalova N.N., Alibekov S.Ia. *Antifriktsionnyi material dlia podshipnikov skol'zheniia [Antifriction material for sliding bearings]. *Rossiiia v prostranstve global'nykh transformatsii: v fokuse nauk o cheloveke, obshchestve, prirode i tekhnike: materialy mezhdunarodnoi mezhdistsiplinarnoi nauchnoi konferentsii*. Ed. V.P. Shalaeva, 2016, pp. 342–344.*

7. Shatsov A.A. *Optimizatsiia sostava i rezhimov termoobrabotki kompozitsionnogo materiala stal'–med' [Optimization of composition and regimes of thermal treatment of composite material steel–copper] // Изв. вузов. Цветная металлургия]. *Izvestiia vuzov. Tsvetnaia metallurgii*, 1998, no. 5, pp. 52–56.*

8. Grigor'iants A.G., Vasil'tsov V.V. Prostranstvennaia struktura izlucheniia moshchnykh volnovodnykh i volokonnykh lazerov dlia tekhnologii [Spatial radiation structure of high-power waveguide and fiber lasers for technology]. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni N.E. Baumana. Mashinostroenie*, 2012, no. 6, pp. 5–33.

9. Qui F., Kujanpää V. Transformation hardening of medium-carbon steel with a fiber laser: the influence of laser power and laser power density. *Mechanika (Mechanics)*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 318–323.

10. Goia F., de Lima M. Surface hardening of an AISI D6 cold work steel using a fiber laser. *Journal of ASTM International*, 2011, vol. 8, no. 2, pp. 315–318.

11. Safonov A.N. Structure and microhardness of the surface layers of iron-carbon alloys after laser heat treatment. *Metal Science and Heat Treatment*, 1996, vol. 38, no. 1–2, pp. 68–74.

12. Astapchik S.A., Babushkin V.B., Ivashko B.C. Strukturnye i fazovye prevrashcheniia v staliakh i splavakh pri lazernoi termicheskoi obrabotke [Structural and phase transformations in steels and alloys during laser heat treatment]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*. 1991, no. 2, pp. 2–5.

13. Kraposhin B.C. Vliianie ostatochnogo austenita na svoistva stali i chugunov posle poverkhnostnogo oplavleniia [Effect of residual austenite on the properties of steels and cast irons after surface melting]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 1994, no. 2, pp. 2–5.

14. Kraposhin B.C., Kraposhina I.F. Vliianie parametrov lazernogo oblucheniia na razmery obluchennykh zon dlia stali 45 [Influence of laser irradiation parameters on the size of irradiated zones for steel 45]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1989, no. 6, pp. 19–24.

15. Qui F., Kujanpää V. Transformation hardening of medium carbon steel with a fiber laser. *Mechanika (Mechanics)*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 318–323.

16. Antsiferov V.N., Shmakov A.M., Shtennikov S.V. Svoistva modifitsirovannykh stali [Properties of modified steels]. *Poroshkovaia metallurgiiia*, 1992, no. 7, pp. 76–79.

17. Gilev V.G., Morozov E.A., Denisova A.S., Khanov A.M. Issledovanie mikrostruktury i rel'efa po-verkhnosti pri lazernoi termicheskoi obrabotke tonko-stennogo tsilindra iz poroshkovogo psevdosplava stal'-med' [Study of the microstructure and relief of the surface during laser heat treat-

ment of a thin-wall steel-copper pseudo-alloy powder cylinder]. *Izvesyiia Samarskogo nauchnogo tsentra*, 2012, vol. 14, no. 4(5), pp. 1212–1217.

18. Gilev V.G., Morozov E.A., Kilina P.N., Sirotenko L.D. Laser surface hardening of frictional pairs made from steel-copper pseudoalloy. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 2, pp. 152–155.

19. Gilev V., Morozov E., Khanov A., Ablyaz T. Laser quenching of axial bearings in submersible multistage pumps made of steel-brass pseudo-alloy. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 20, pp. 40861–40868.

20. Kraposhin B.C., Shakhlevich K.V., Biriukov V.P. Lazernoe rasplavlenie poverkhnosti lucha so skanirivaniem lucha [Laser melting of the surface of the beam with scanning the beam]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 1988, no. 11, pp. 57–59.

Получено 23.10.2018

Опубликовано 20.12.18

Об авторах

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

Оглезнева Светлана Аркадьевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: director@pm.pstu.ac.ru.

About the authors

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

Svetlana A. Oglezneva (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of the Materials, Technologies and Design of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: director@pm.pstu.ac.ru.