

Усынин Е.В., Оглезнева С.А., Морозов Е.А. Влияние режимов лазерной обработки порошковой стали ПА-ЖГр на геометрические параметры зоны лазерного воздействия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 68–75. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.08

Usynin E.V., Oglezneva S.A., Morozov E.A. The influence of laser treatment of powder steel PA-ZhGr on the geometric parameters of the laser exposure zone. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 68–75. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.08

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 21, № 3, 2019**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.3.08  
УДК 621.762

**Е.В. Усынин, С.А. Оглезнева, Е.А. Морозов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВОЙ СТАЛИ ПА-ЖГр  
НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗОНЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Объектом исследования является порошковая сталь ПА-ЖГр после лазерной обработки поверхности. Целями исследования являются изучение влияния режимов лазерной обработки на порошковую сталь и выявление зависимости геометрии и микротвердости зоны термического воздействия от параметров обработки и пористости обрабатываемого материала.

Приведены результаты исследований микроструктуры и микротвердости поверхностного слоя порошковой стали ПА-ЖГр с пористостью 4, 8, 10 % в сравнении с литой сталью У10 после лазерной обработки. Образцы пористой стали получены традиционными методами порошковой металлургии (смешивание шихты, прессование, спекание) с повторным прессованием и отжигом для получения заданной пористости. Лазерная обработка проводилась волоконным лазером мощностью 1 кВт в среде аргона с различной скоростью перемещения пятна и потоками различной мощности в виде единичных дорожек. Микротвердость измерялась на шлифах с поперечного среза образца по центру зоны лазерного воздействия. Микроструктура и геометрические размеры зоны термического влияния получены с помощью оптического микроскопа. Показана микроструктура обработанной зоны литого и пористых образцов. Обнаружено, что микротвердость обработанной поверхности не зависит от пористости стали и имеет схожие значения на поверхности обработанной зоны для всех образцов. Величина пористости влияет на микротвердость более глубоких слоев, повышая глубину упрочнения с понижением пористости. Также пористость оказывает влияние на геометрию зоны воздействия, увеличивая глубину зоны термического влияния с повышением пористости. Установлены параметры лазерной обработки поверхности пористых сталей, которые способствуют повышению микротвердости и не приводят к образованию трещин.

**Ключевые слова:** лазерная термообработка, лазерная закалка, порошковая сталь, пористость, термоупрочнение, структура, микротвердость, мощность лазера, глубина термообработки, износостойкость, сталь.

**E.V. Usynin, S.A. Oglezneva, E.A. Morozov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE INFLUENCE OF LASER TREATMENT OF POWDER STEEL PA-ZHGR  
ON THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE LASER EXPOSURE ZONE**

The object of the study is the powder steel PA-ZhGr after laser surface treatment. The aim of the study is to study the effect of laser treatment on powder steel, identifying the dependence of the geometry and microhardness of the heat-affected zone on the processing parameters and the porosity of the material being processed.

The results of studies of the microstructure and microhardness of the surface layer of the powder steel PA-ZhGr with a porosity of 4, 8, 10 % compared with cast steel U10 after laser treatment are presented. Samples of porous steel were obtained by traditional methods of powder metallurgy (mixture blending, pressing, sintering) with repeated pressing and annealing to obtain a given porosity. The laser treatment was carried out with a 1 kW fiber laser in argon with different spot moving speeds and streams of different power in the form of single tracks. Microhardness was measured at the cut of the sample at the center of the laser irradiation zone. The microstructure and geometrical dimensions of the heat-affected zone are obtained using an optical microscope. The microstructure of the treated zone of the cast and porous samples is shown. It was found that the microhardness of the treated surface does not depend on the porosity of the steel and has similar values on the surface of the treated zone for all samples. The percentage of porosity has an effect on the microhardness of the deeper layers, increasing the depth of hardening with decreasing porosity. Porosity also affects the geometry of the zone of influence, increasing the depth of the heat-affected zone with increasing porosity. The parameters of laser treatment of the surface of porous steels have been established, which contribute to the increase in microhardness and do not lead to the formation of cracks.

**Keywords:** laser heat treatment, laser hardening, powder steel, porosity, heat strengthening, structure, microhardness, laser power, heat treatment depth, wear resistance, steel.

### Введение

Увеличение износостойкости поверхности изделий является одной из актуальных проблем в машиностроении. Одним из технологических решений является упрочнение поверхности изделия за счет изменения его структуры. Упрочнение поверхности может быть достигнуто такими методами, как термические, электрохимические, диффузионные, плазменные, лазерные и т.д. [1–6].

Основной целью лазерного термоупрочнения сталей является повышение износостойкости поверхностей деталей, работающих в условиях трения. Результатом лазерной закалки является высокая твердость поверхности в сравнении с необработанной, уменьшение коэффициента трения, увеличение несущей способности поверхностного слоя и другие параметры.

Упрочнение материалов лазерным излучением достигается за счет локального нагрева участка поверхности под воздействием излучения и последующего охлаждения этого участка с высокой скоростью (лазерная закалка) в результате теплоотвода тепла вглубь металла [7].

Анализ литературы показывает, что большинство исследований лазерного воздействия изучают его влияние на литые стали [8–13], лазерная обработка порошковых изделий проводится обычно для снижения пористости поверхности, получения покрытий и восстановления деталей [14–16], а также наплавки неспеченных металлических порошков [17]. Для упрочнения поверхности порошковых сталей необходимо определение оптимальных режимов обработки. Для определения оптимальных режимов обработки требуется изучение влияния совокупности основных параметров обработки, таких как плотность мощности лазерного пятна и скорость обработки поверхности [18, 19].

### Материалы и методики исследования

Лазерную обработку поверхности проводили на образцах углеродистых сталей, содержащих 1 % углерода – литой стали У10 и порошковых сталей ПА-ЖГр с пористостью 4, 8 и 10 %. Образцы порошковых сталей изготавливались методом порошковой металлургии из порошка железа ПЖРВ 2.200.28 и графита коллоидного. Порошки смешивали в смесителе со смещенной осью вращения, прессовали в пресс-форме под давлением 400 МПа, затем отжигали в вакуумной печи при температуре 900 °С, повторно доуплотняли в пресс-форме под давлением 500 или 550 МПа и спекали окончательно в вакууме при температуре 1150 °С. Лазерную обработку поверхности проводили на образцах в форме параллелепипедов

25×25×200 мм с помощью промышленной установки для аддитивного производства Optomes LENS 850-R с волоконным лазером мощностью 1 кВт в среде аргона. Образцы устанавливались на алюминиевую плиту для лучшего теплоотвода.

Для полного факторного эксперимента [20] использовалось 9 режимов обработки (таблица), варьировали основные параметры – скорость обработки  $v$  и плотность мощности  $I$ :

$$I = \frac{W}{S},$$

где  $W$  – мощность лазера,  $S$  – площадь пятна, которую вычисляли как

$$S = \pi d^2,$$

где  $d$  – диаметр пятна.

### Режимы лазерной обработки

Режим	Мощность $W$ , Вт	Плотность мощности $I$ , Вт/см <sup>2</sup>	Площадь пучка $S$ , см <sup>2</sup>	Скорость прохода $v$ , см/с
1	98,4	8000	0,0123	0,8
2	196,8	16 000	0,0123	0,8
3	98,4	8000	0,0123	1,2
4	196,8	16 000	0,0123	1,2
5	147,6	12 000	0,0123	0,8
6	147,6	12 000	0,0123	1,2
7	98,4	8000	0,0123	1
8	196,8	16 000	0,0123	1
9	147,6	12 000	0,0123	1

Диаметр пятна нагрева в экспериментах  $d$  был 1,5; 2; 2,5 и 4 мм. Микротвердость измеряли согласно ГОСТ 9450–76 на твердомере 402MVD Knoop/ VickersTester на шлифе, выполненном с поперечного среза образца по центру зоны влияния обработки с шагом 75 мкм от поверхности.

Исследование микроструктуры и измерение геометрических параметров зоны воздействия проводились на оптическом микроскопе Axiovert 40 Mat при увеличении 5–50 крат на нетравленных и травленных в нитале шлифах.

Для получения совокупности параметров, влияющих на образование трещины, использовался параметр мощности лазера, приходящейся на единицу площади в секунду  $P$ :

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

### Результаты и обсуждение исследований

Структура сталей включала перлит и небольшое количество цементита (рис. 1). Зона оплавлен-

ния имела аустенитно-мартенситную структуру и характеризовалась отсутствием границ зерен, поверхность зоны термического влияния имела очень малую пористость. Зона воздействия беспористого образца стали У10 имела более выраженный характер и однородную структуру (см. рис. 1, в). Анализ микроструктуры позволил подразделить зону закалки на 4 зоны (рис. 2, а): I – зону оплавления с минимальной пористостью. В зоне оплавления не наблюдалось отдельных частиц порошка. Материал в этой зоне имел мартенситную структуру (рис. 2, в), наблюдались вкрапления остаточного аустенита (белого цвета). Малая пористость материала в этой зоне обусловлена выходом пор на по-

верхность во время существования жидкой фазы. Из-за высокой скорости протекания процесса ЛО все поры из зоны расплавления не успевали подняться к поверхности материала и образовалась зона II – зона оплавления с исходной пористостью. Структура в этой зоне также мартенситная, микротвердость всей зоны оплавления высокая – до 1000 HV<sub>0,05</sub> (рис. 2, б).

Зона III соответствовала закалке из твердого состояния (рис. 2, г). Структура материала в этой зоне представляла собой перлит с сеткой цемента. Микротвердость в этой зоне плавно снижалась до значений микротвердости основного материала – зоны IV.

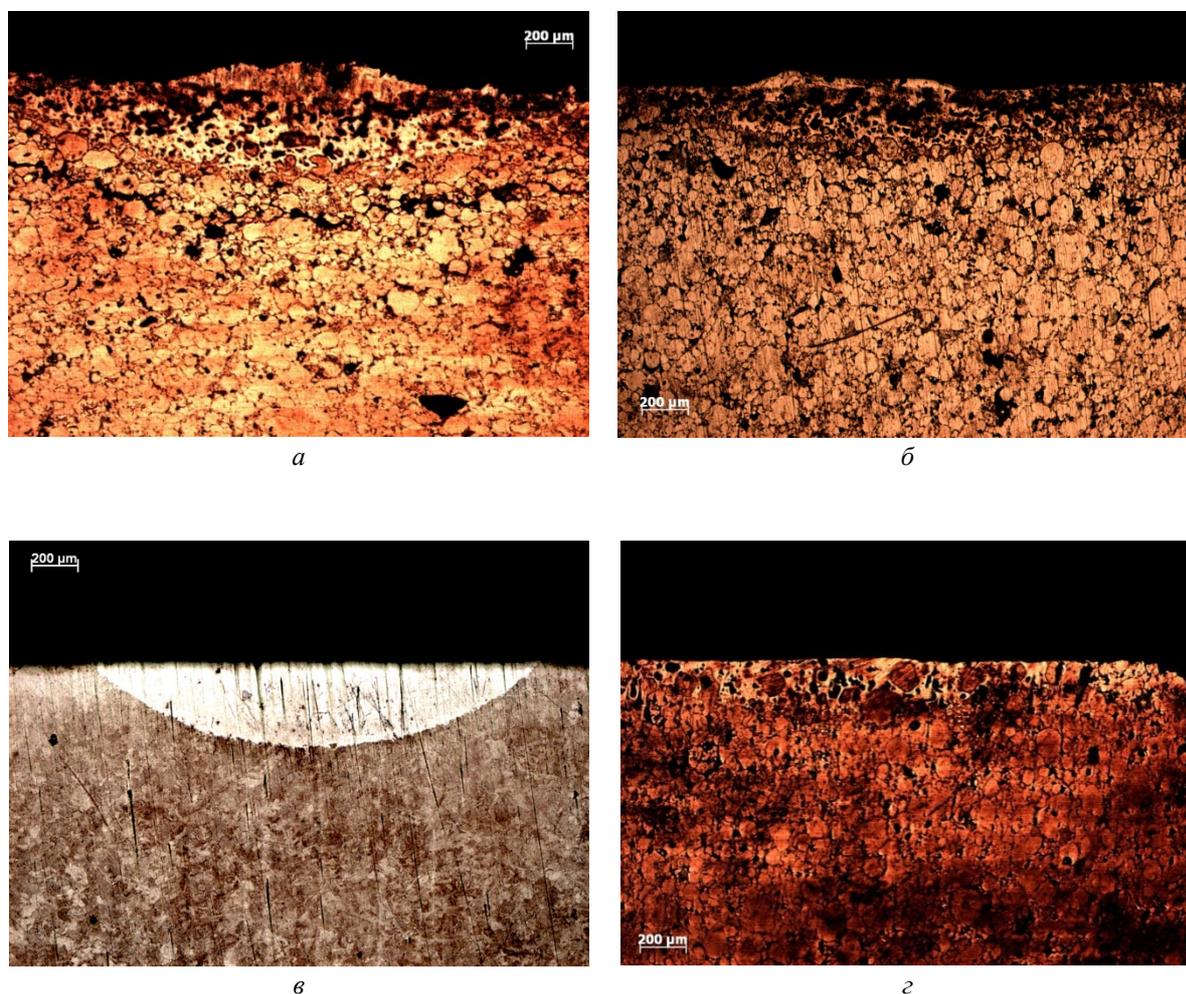


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя образцов при 5-кратном увеличении,  $d = 2$  мм: а – П – 10 %,  $I = 16$  кВт/см<sup>2</sup>,  $v = 1$  см/с; б – П – 4 %,  $I = 16$  кВт/см<sup>2</sup>,  $v = 1,2$  см/с; в – У10,  $I = 16$  кВт/см<sup>2</sup>,  $v = 0,8$  см/с; г – П – 8 %,  $I = 12$  кВт/см<sup>2</sup>,  $v = 1$  см/с

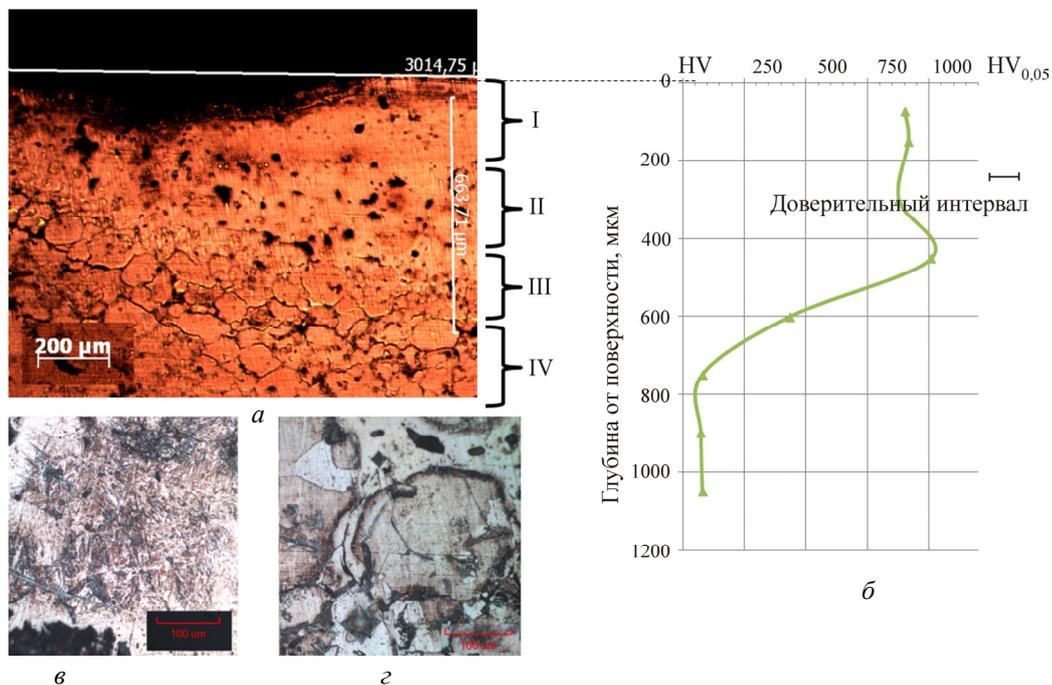


Рис. 2. Образец из ПА-ЖГР с пористостью 10 %, обработанный по режиму  $W = 16 \text{ кВт/см}^2$ ,  $V = 0,8 \text{ см/с}$ ,  $d = 2 \text{ мм}$ ,  $a$  – макроструктура,  $b$  – график изменения микротвердости,  $c$  – микроструктура зоны I,  $d$  – микроструктура зоны III

Для исследования геометрии зоны воздействия с использованием данных, полученных при полном факторном эксперименте [20], были построены трехмерные зависимости по двум изменяющимся параметрам (рис. 3).

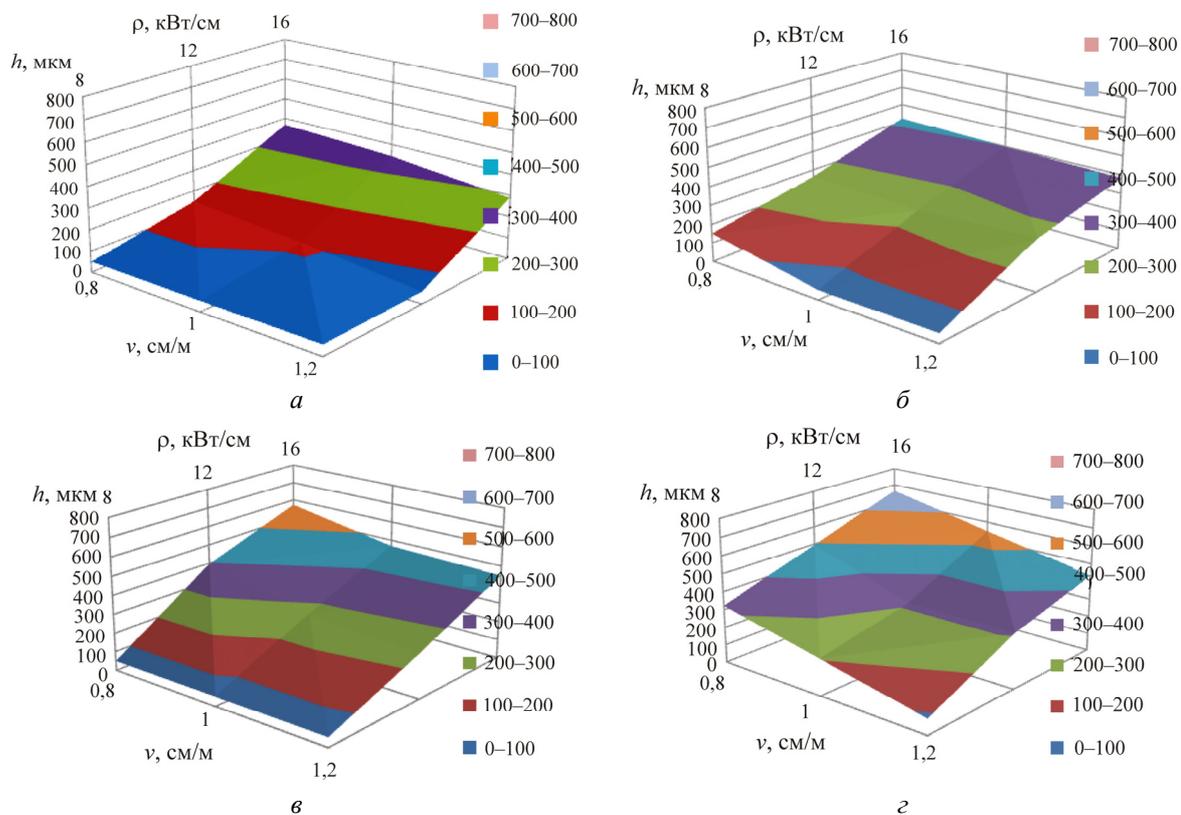


Рис. 3. Зависимость глубины воздействия  $h$  от совокупности параметров обработки при  $d = 2 \text{ мм}$ :  $a$  – У10;  $b$  – П – 4 %;  $c$  – П – 8 %;  $d$  – П – 10 %

Следует отметить увеличение глубины воздействия при увеличении плотности мощности лазерного излучения, а также при уменьшении скорости обработки. Также наблюдалось увеличение глубины воздействия с повышением пористости образца. По увеличению наклона модели по осям X и Y, характеризующим скорость обработки –  $v$  и плотность мощности –  $I$  соответственно, можно судить об увеличении влияния указанных параметров на глубину воздействия с увеличением пористости образца.

Это объясняется уменьшением рассеивания тепла вглубь материала при увеличении пористости образца, в результате чего тепловое воздействие внутри материала продлевается с увеличением пористости.

Микротвердость поверхностного слоя для любой пористости имела схожие значения, при некоторых режимах достигая 900–1000 HV. Так, например, при  $d = 2$  мм;  $I = 12$  кВт/см<sup>2</sup>;  $v = 0,8$  см/с микротвердость поверхностного слоя лежала в диапазоне 650–850 HV (рис. 4).

Стоит отметить, что при повышении пористости глубина, на которой происходило увеличение микротвердости, уменьшалась. Так, например, упрочнение беспористой стали У10 происходило

до глубины 300–350 мкм, что соответствует глубине зоны термического влияния, а порошковой при  $\Pi = 10\%$  – до глубины 200–250 мкм. Это обусловлено также лучшим теплоотводом менее пористого материала.

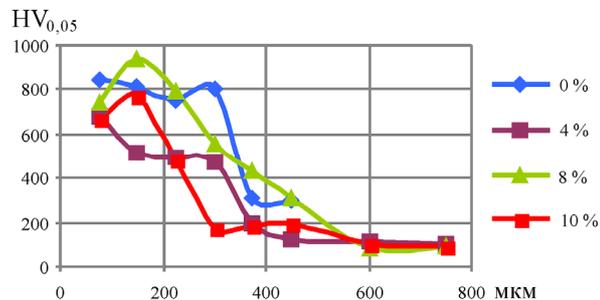


Рис. 4. График зависимости микротвердости от глубины для 0, 4, 8, 10 % пористости при  $d = 2$  мм;  $I = 12$  кВт/см<sup>2</sup>;  $v = 0,8$  см/с

В случае обработки пористых образцов возможно формирование трещины вокруг зоны термического влияния, проходящей по границам зерен (рис. 5), что негативно сказывается на прочностных характеристиках поверхности вплоть до отделения обработанной области от исходного материала.

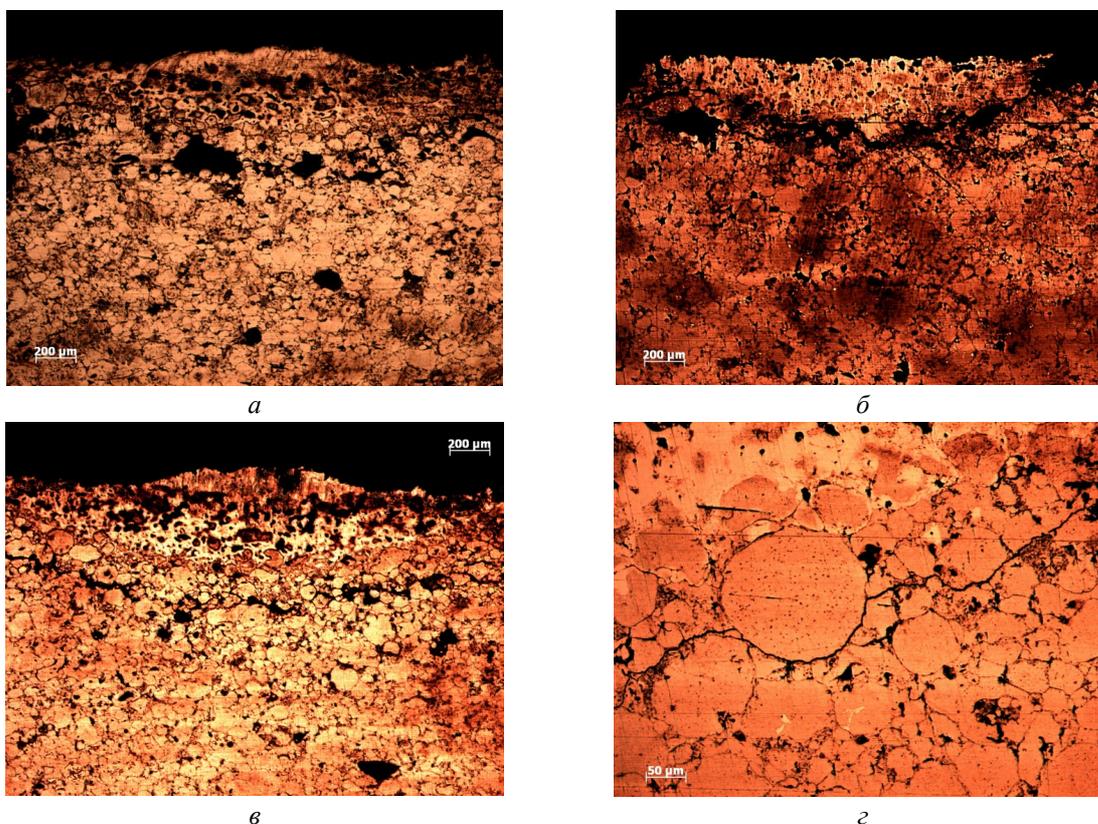


Рис. 5. Трещина вокруг зоны термического воздействия при  $d = 2$  мм: а –  $\Pi = 4\%$ ,  $I = 16$  кВт/см<sup>2</sup>,  $v = 1$  см/с; б –  $\Pi = 10\%$ ,  $I = 8$  кВт/см<sup>2</sup>,  $v = 0,8$  см/с; в –  $\Pi = 10\%$ ,  $I = 16$  кВт/см<sup>2</sup>,  $v = 1$  см/с; г –  $\Pi = 10\%$ ,  $I = 16$  кВт/см<sup>2</sup>,  $v = 0,8$  см/с

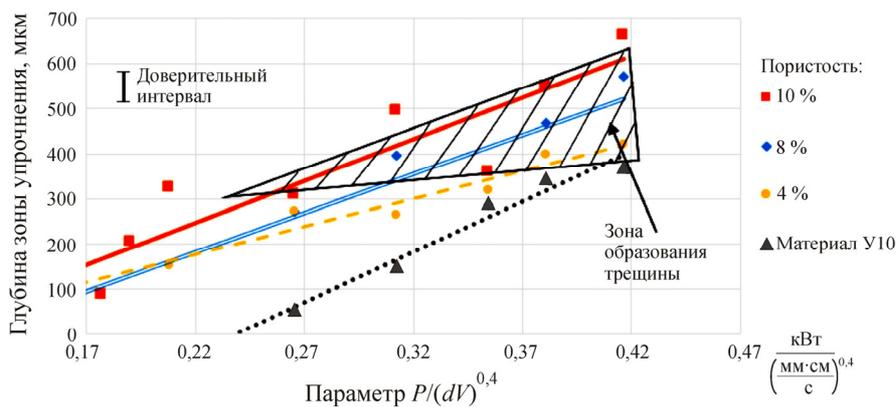


Рис. 6. Зависимость глубины упрочнения сталей от режимов ЛО: ПА-ЖГр и У10, диаметр пятна лазера 2 мм

Образование трещины обусловлено термической усадкой ванны расплава при оплавлении поверхности, термическими напряжениями на границе раздела фаз, а также конденсацией пор на границе термического воздействия. Вследствие этого режимы обработки для литых изделий не всегда применимы к пористым сталям. Исследовано влияние пористости порошковых сталей на граничные значения параметров ЛО, обеспечивающих повышение микротвердости поверхности без образования трещин в подповерхностной зоне (рис. 6).

Установлено, что для литой стали У10 ЛО может производиться с любым сочетанием режимов без риска образования трещин. Исследования порошковых сталей показали, что в зависимости от пористости параметр  $P/(dv)^{0,4}$  не должен превышать 0,4 для пористости 4 %, 0,32 для пористости 8 % и 0,24 для пористости 10 %.

### Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что с повышением пористости образца увеличиваются геометрические параметры зоны термического воздействия, а также усиливается влияние параметров лазерной обработки на геометрию зоны термического воздействия. Пористость не влияет на микротвердость поверхностного слоя, которая может достигать 900–1000 HV<sub>0,05</sub>, однако влияет на глубину упрочнения. Так, при меньшей пористости упрочнение происходит на большую глубину и для литого образца У10 глубина упрочнения соответствует глубине зоны термического влияния. Определен параметр  $P/(dv)^{0,4}$ , ниже которого не образуется трещина в пористых сталях, ухудшающая прочностные свойства поверхности.

### Список литературы

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Использование плазменных методов для модификации поверхности металлов / А.А. Хубатхузин, И.Ш. Абдуллин, А.А. Башкирцев, Э.Б. Гатина // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – С. 48–52.
3. Баландина Ю.А. Упрочнение поверхности штамповых сталей диффузионным борированием, боромеднением и борохромированием в псевдосжиженном слое // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – С. 27–30.
4. Упрочнение поверхности литой стали комплексным диффузионным насыщением бором и хромом / В.И. Мосоров, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, Д.С. Фильчаков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 2. – С. 33–36.
5. Формирование механических свойств поверхности низкоуглеродистой стали при термомеханическом упрочнении / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, О.А. Кондратова, Е.Г. Белов, В.Б. Костеров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 2. – С. 38–44.
6. Мишаков Г.А., Родинов А.И., Мясников А.М. Комплексная химико-термическая и лазерная обработка конструкционных и инструментальных сталей // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2014. – № 1. – С. 11.
7. Сафонов А.Н. Структура и микротвердость поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов после лазерной закалки // МиТОМ. – 1996. – № 2. – С. 20–24.
8. Огин П.А., Мерсон Д.Л., Ярьско С.И. Влияние мощности лазерного излучения и скорости движения луча на геометрию зоны оплавления при лазерной закалке стали 40Х // Вектор науки ТГУ. – 2016. – № 2. – С. 46–51.
9. Беляев Е.С., Тумина Е.В., Макаров Т.В. Геометрические характеристики зоны термического влияния при лазерной обработке стали 38ХНЗМФА // Theoretical & Appl. Sci. – 2017. – № 1. – С. 153–159.

10. Петрова Л.Г., Чудинова О.В. Моделирование упрочнения при разработке технологий модифицирования поверхности стали с использованием лазерного нагрева // Вестник МАДГТУ. – 2006. – № 7. – С. 22–29.

11. Григорьянц А.Г., Смирнова Н.А. Упрочнение поверхности стали 45 и литейного алюминиевого сплава АК9 излучением волоконного лазера // Технология машиностроения. – 2011. – № 11. – С. 52–56.

12. Александров В.Д. Модификация поверхности алюминиевых сплавов методом лазерной обработки // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 4. – С. 33–36.

13. Бирюков В. Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении // Фотоника. – 2012. – № 3. – С. 22–27.

14. Толочко Н.К. Применение лазеров в порошковой металлургии // Физика и химия обработки материалов. – 1995. – № 1. – С. 94–98.

15. Нино Т.П. Износостойкость пористых покрытий (спекание лазерным излучением порошковых композиций на поверхности изношенных деталей) // Инженерно-техническое обеспечение АПК: реферат. журн. – 2010. – № 4. – С. 1187.

16. Юркевич С.П., Томашевич А.В., Юркевич А.С. Восстановление деталей авиатехники методом лазерной наплавки // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 3. – С. 31–33.

17. Лазерная наплавка металлических порошков / В.Н. Петровский, В.Г. Штамм, П.С. Джумаев, В.И. Польский // Ядерная физика и инжиниринг. – 2012. – № 4. – С. 333.

18. Особенности лазерной закалки кольцевых выступов из псевдосплава сталь–медь / В.Г. Гилев, Н.В. Безматерных, Е.А. Морозов, Е.С. Русин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 179–186.

19. Беляев Е.С., Дудырева С.С., Макаров Н.В. Влияние лазерной обработки на геометрические размеры зон плавления и термического влияния при обработке спеченного пористого железа // Теоретическая и прикладная наука. – 2017. – № 2. – С. 143–154.

20. Григорьев Ю.Д. Методы оптимального планирования эксперимента: линейные модели: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2015. – 320 с.

## References

1. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki [Technological processes of laser processing]. Ed. A.G. Grigor'iantsa. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2006. 664 s.

2. Khubatkhuzin A.A., Abdullin I.Sh., Bashkirtsev A.A., Gatina E.B. Ispol'zovanie plazmennyykh metodov dlia modifikatsii poverkhnosti metallov [Use of plasma methods for metal surface modification]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, pp. 48–52.

3. Balandina Iu.A. Uprochnenie poverkhnosti shtampovykh staley diffuzionnym borirovaniem, boro-medneniem i borokhromirovaniem v psevdoszhizhennom sloe [Surface hardening of stamped steels by diffusion boring, boronizing

and boronizing in fluidized bed]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2005, pp. 27–30.

4. Mosorov V.I., Gur'ev A.M., Lygdenov B.D., Fil'chakov D.S. Uprochnenie poverkhnosti litoi stali kompleksnym diffuzionnym насыshcheniem borom i khromom [Cast steel surface hardening with complex diffusion saturation with boron and chromium]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2011, no. 2, pp. 33–36.

5. Ivanov Iu.F., Gromov V.E., Kondratova O.A., Belov E.G., Kosterov V.B. Formirovanie mekhanicheskikh svoystv poverkhnosti nizkouglerodistoi stali pri termomekhanicheskom uprochnenii [Formation of Mechanical Properties of Low Carbon Steel Surface at Thermomechanical Hardening]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2017, no. 2, pp. 38–44.

6. Mishakov G.A., Rodinov A.I., Miasnikov A.M. Kompleksnaya khimiko-termicheskaya i lazernaia obrabotka konstruktivnykh i instrumental'nykh staley [Complex chemical-thermal and laser processing of structural and tool steels]. *Vestnik NIaU MIFI*, 2014, no. 1, pp. 11.

7. Safonov A.N. Struktura i mikrotverdest' poverkhnostnykh sloev zhelezouglerodistykh splavov posle lazernoi zakalki [Structure and microhardness of surface layers of iron-carbon alloys after laser hardening]. *MiTom*, 1996, no. 2, pp. 20–24.

8. Ogin P.A., Merson D.L., Iares'ko S.I. Vliianie moshchnosti lazernogo izlucheniia i skorosti dvizheniia lucha na geometriiu zony oplavleniia pri lazernoi zakalke stali 40Kh [Effect of Laser Radiation Power and Beam Speed on the Reflow Zone Geometry during Laser Quenching of 40X Steel]. *Vektor nauki TGU*, 2016, no. 2, pp. 46–51.

9. Beliaev E.S., Tumina E.V., Makarov T.V. Geometricheskie kharakteristiki zony termicheskogo vliianiia pri lazernoi obrabotke stali 38KhN3MFA [Geometric Characteristics of Heat Influence Zone at Laser Processing of 38XN3MFA Steel]. *Theoretical & Appl. Sci.*, 2017, no. 1, pp. 153–159.

10. Petrova L.G., Chudinova O.V. Modelirovanie uprochneniia pri razrabotke tekhnologii modifitsirovaniia poverkhnosti stali s ispol'zovaniem lazernogo nagreva [Modeling of hardening during development of technologies of steel surface modification with the use of laser heating]. *Vestnik MADGTU*, 2006, no. 7, pp. 22–29.

11. Grigor'iants A.G., Smirnova N.A. Uprochnenie poverkhnosti stali 45 i liteinogo aliuminieвого сплава АК9 излучением волоконного лазера [Reinforcing the surface of steel 45 and cast aluminum alloy AK9 with fiber laser radiation]. *Tekhnologiya mashinostroeniia*, 2011, no. 11, pp. 52–56.

12. Aleksandrov V.D. Modifikatsiia poverkhnosti aliuminievykh splavov metodom lazernoi obrabotki [Modification of aluminium alloy surface by laser treatment]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2002, no. 4, pp. 33–36.

13. Biriukov V. Izmenenie struktury i svoystv staley pri lazernom uprochnenii [Changes in steel structure and properties during laser peening]. *Fotonika*, 2012, no. 3, pp. 22–27.

14. Tolochko N.K. Primenenie lazerov v poroshkovoi metallurgii [Application of lasers in powder metallurgy]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1995, no. 1, pp. 94–98.

15. Nino T.P. Iznosostoikost' poristykh pokrytii (spekanie lazernym izlucheniem poroshkovykh kompozitsii na poverkhnosti iznoshennykh detalei) [Wear resistance of porous coatings (sintering of powder compositions on the surface of worn parts by laser radiation)]. *Inzhenerno-tekhnicheskoe obe-spechenie APK: referat. zhurn.*, 2010, no. 4, pp. 1187.

16. Iurkevich S.P., Tomashevich A.V., Iurkevich A.S. Vosstanovlenie detalei aviatekhniki metodom lazernoi naplavki [Restoration of aircraft parts by laser cladding]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiia*, 2006, no. 3, pp. 31-33.

17. Petrovskii V.N., Shtamm V.G., Dzhumayev P.S., Pol'skii V.I. Lazernaia naplavka metallicheskiikh poroshkov [Laser surfacing of metal powders]. *Iadernaia fizika i inzhiniring*, 2012, no. 4, pp. 333.

18. Gilev V.G., Bezmaternykh N.V., Morozov E.A., Rusin E.S. Osobennosti lazernoi zakalki kol'tsevykh vystupov iz psevdosplava stal'-med' [Features of laser hardening of pseudo alloy steel-copper ring ledges]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 179-186.

19. Beliaev E.S., Dudyreva S.S., Makarov N.V. Vliianie lazernoi obrabotki na geometricheskie razmery zon plavleniia i termicheskogo vlianiia pri obrabotke spechenogo poristogo zheleza [Influence of laser treatment on geometric dimensions of melting zones and thermal influence during treatment of sintered porous iron]. *Teoreticheskaia i prikladnaia nauka*, 2017, no. 2, pp. 143-154.

20. Grigor'ev Iu.D. Metody optimal'nogo planirovaniia eksperimenta: lineinye modeli [Methods of optimal experiment planning: linear models]. Saint-Petersburg: Lan', 2015, 320 p.

Получено 15.05.19

Опубликовано 26.09.19

#### Сведения об авторах

**Усынин Евгений Вячеславович** (Пермь, Россия) – магистр кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: zoom16@mail.ru.

**Оглезнева Светлана Аркадьевна** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

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

#### About the authors

**Evgeny V. Usynin** (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Mechanics of Composite Materials and Constructions, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: zoom16@mail.ru.

**Svetlana A. Oglezneva** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Construction, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: osa@pm.pstu.ac.ru.

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