

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЗОН ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

© 2015

*П.А. Огин*, аспирант кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

*Ключевые слова:* оптоволоконный лазер; зона термического влияния; лазерная закалка; термоупрочнение; микротвердость.

*Аннотация:* В статье рассмотрена проблема повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей машин, оснастки и металлорежущего инструмента. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области является термическая обработка изнашиваемых поверхностей за счет воздействия концентрированными тепловыми потоками, создаваемыми лучом лазера. Наиболее перспективными с технологической точки зрения представляются современные оптоволоконные лазеры. Изучение и прогнозирование структуры зон перекрытия при многопроходной лазерной обработке является важным элементом подготовки технологического процесса и напрямую влияет на выбор режимов обработки. Приводятся результаты экспериментального исследования влияния параметров лазерной обработки оптоволоконным лазером на состояние поверхностного слоя зон перекрытия при многопроходной термической обработке сталей и чугунов. В экспериментальных исследованиях использовали оптоволоконный лазер ЛКД4-015.150. Обработку производили в непрерывном режиме с частичным оплавлением поверхности обработки. Режимы обработки выбирали исходя из данных работы «Модификация поверхности сталей и чугунов при помощи оптоволоконного лазера». В качестве образцов использовали пластины размерами 15x15x3 мм из стали X12МФ и чугуна СЧ21. После обработки торцовую поверхность каждого образца шлифовали на минимальных режимах для исключения повторного термического влияния на структуру, после чего на ней изготавливали микрошлифы. В качестве травителя использовали 4 %-ный спиртовой раствор азотной кислоты HNO<sub>3</sub>. Твердость измеряли при помощи микротвердомера Shimadzu HМV-2. Структуру образцов изучали на микроскопе Zeiss AXIO Observer.D1m, а также на электронном сканирующем микроскопе Zeiss LEO1455VP. В ходе работы произведен анализ структуры зон перекрытия, измерена их микротвердость. Представлены расчетная схема и формула расчета коэффициента перекрытия при многопроходной обработке.

### ВВЕДЕНИЕ

Узлы и механизмы современных машин работают в условиях повышенного износа. Его интенсивность напрямую зависит от качества предварительной обработки поверхности трения. Поэтому формирование специальных структур в поверхностном слое изнашиваемых поверхностей деталей машин, повышающих их износостойкость, является актуальной задачей. Одним из перспективных направлений в данной области является модификация изнашиваемой поверхности при помощи лазера [1–3]. При решении различных триботехнических задач лазерный луч обладает рядом преимуществ перед традиционными технологиями, к которым относятся стандартные методы термической обработки, технологии пластического деформирования и др.[3].

За прошедшие годы было выполнено большое количество исследований по лазерной термообработке. Для исследований применялись как широко изученные СО<sub>2</sub> и твердотельные лазеры, так и современные оптоволоконные и диодные лазеры. Технологиям упрочнения при помощи твердотельных или газоразрядных СО<sub>2</sub>-лазеров посвящено множество работ [4–16]. К числу явных недостатков этих лазеров, в сравнении с современными оптоволоконными лазерами, можно отнести низкий КПД луча в зоне обработки, применение для доставки луча в зону обработки сложных оптических систем, низкую плотность мощности обработки, а также большое пятно контакта в зоне обработки [17–19].

Возможность обеспечения закалки локальной зоны является неоспоримым преимуществом лазерной обработки. Однако локальность обработки является как преимуществом лазерной обработки, так и недостатком. Если требуется обеспечить закалку достаточно большой области, обработку лазером производят с пе-

рекрытием. При этом очень важно обеспечить требуемые характеристики зон перекрытия.

Целью работы являлось определение влияния параметров лазерной упрочняющей обработки оптоволоконным лазером на структуру и свойства зон перекрытия инструментальной стали X12МФ и серого чугуна СЧ21.

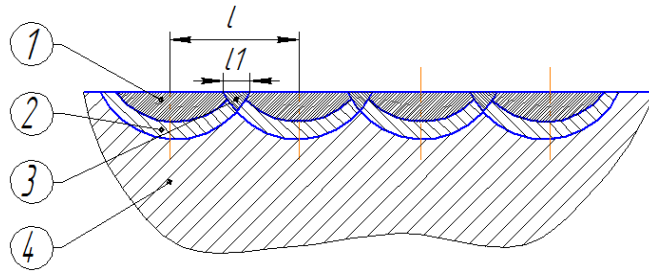
### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе экспериментального исследования изучали процесс лазерной закалки с перекрытием образцов из стали X12МФ, а также чугуна СЧ21 с помощью оптоволоконного иттербиевого квазинепрерывного лазера ЛКД4-015.150 в режиме непрерывного действия. Изучали влияние плотности мощности излучения  $E$  и коэффициента перекрытия на микроструктуру и свойства зон перекрытия области обработки. Плотность мощности была равна  $4,5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>, а перекрытие составило 10 %. Обработку образцов проводили с частичным оплавлением поверхности.

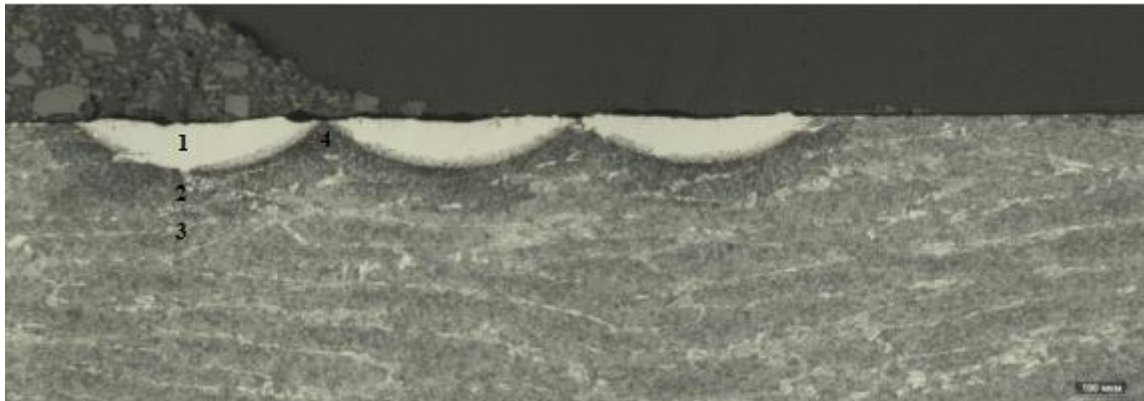
После обработки торцовую поверхность образца шлифовали на минимальных режимах для исключения повторного термического влияния на структуру, после чего на ней изготавливали микрошлифы. Твердость измеряли микротвердомером Shimadzu HМV-2. Структуру образцов изучали на микроскопе Zeiss AXIO Observer.D1m, а также на электронном сканирующем микроскопе Zeiss LEO1455VP.

Для обеспечения требуемого перекрытия лазерный луч смешали на величину  $l_1$ , которую рассчитывали согласно формуле

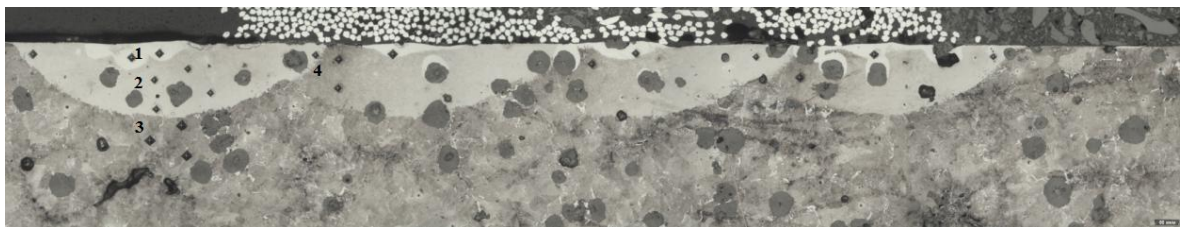
$$x = \frac{(l - l_1) \cdot 100}{l}.$$



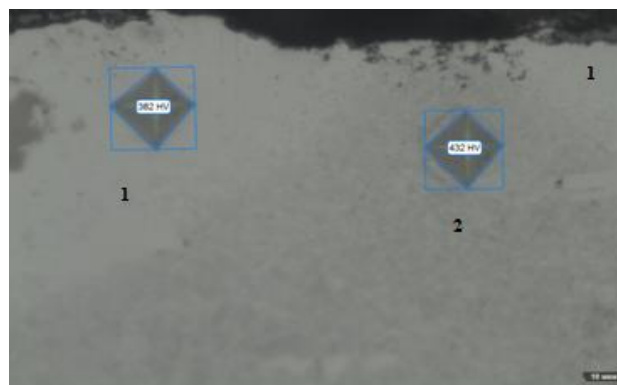
**Рис. 1.** Схема лазерного упрочнения с перекрытием.  
1 – зона оплавления; 2 – зона термического влияния; 3 – зона перекрытия; 4 – основной материал



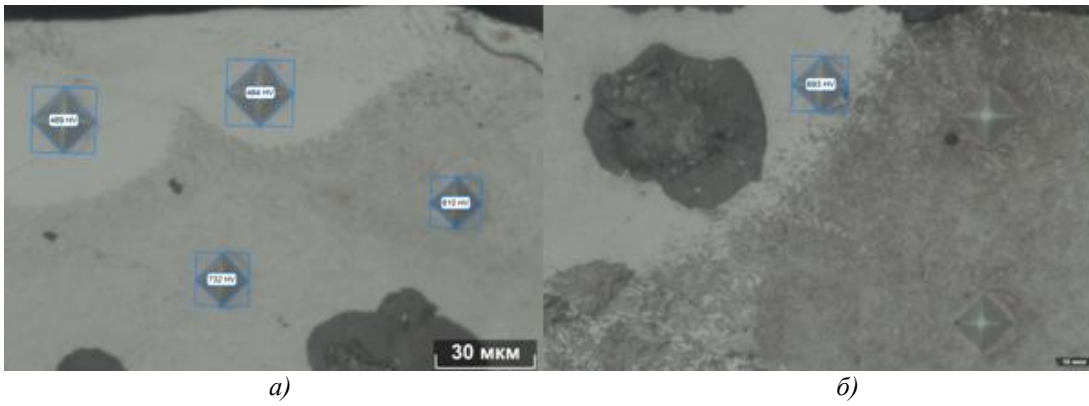
**Рис. 2.** Поперечное сечение зоны лазерной обработки стали X12MФ.  
 $E=4,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ , перекрытие 10 %  
1 – зона оплавления; 2 – ЗТВ; 3 – основная структура; 4 – переходная зона



**Рис. 3.** Поперечное сечение зоны лазерной обработки чугуна СЧ21.  
 $E=4,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ , перекрытие 10 %  
1 – зона оплавления; 2 – ЗТВ; 3 – основная структура; 4 – переходная зона

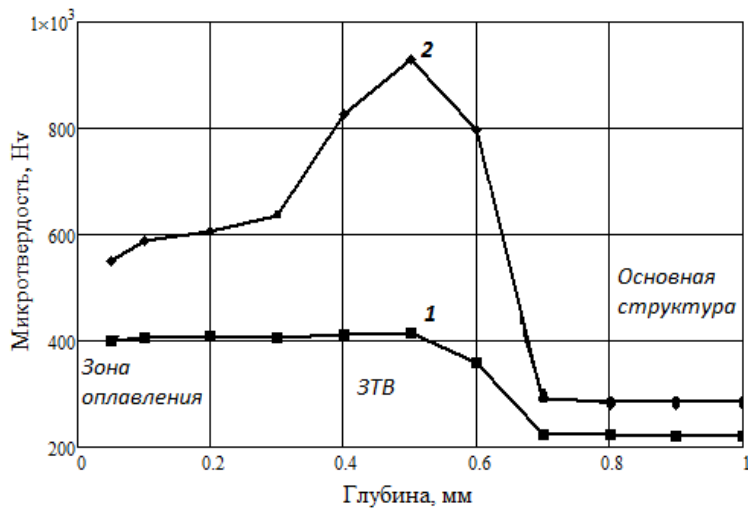


**Рис. 4.** Поперечное сечение переходной зоны образца стали X12MФ.  
1 – зона оплавления; 2 – переходная зона



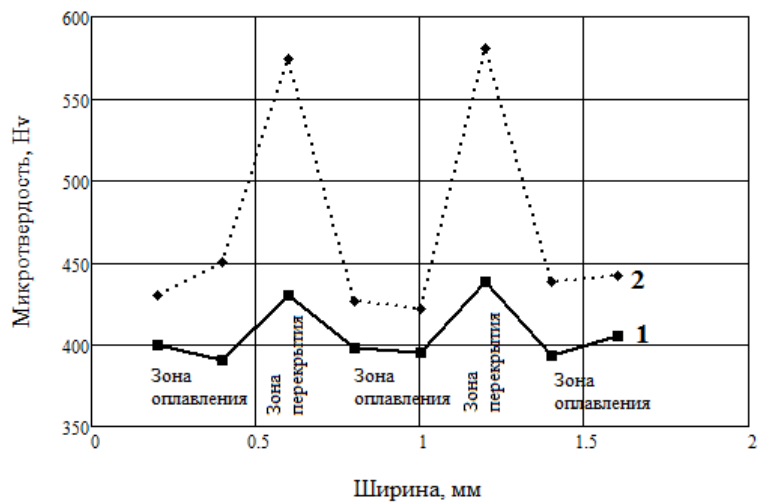
**Рис. 5.** Поперечное сечение переходных зон образца чугуна СЧ21:

а) – в непосредственной близости к зоне оплавления; б) – место стыка двух обрабатываемых участков



**Рис. 6.** Распространение микротвердости вглубь образца.

1 – X12MФ; 2 – СЧ21



**Рис. 7.** Распространение микротвердости по ширине обработанного участка.

1 – X12MФ; 2 – СЧ21

Схема лазерной обработки с требуемым перекрытием показана на рис. 1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 и 3 показаны поперечные сечения зоны обработки для стали Х12МФ (рис. 2) и чугуна СЧ21 (рис. 3). На рис. 4 показано поперечное сечение переходной зоны образца из стали Х12МФ. На рис. 5 показано поперечное сечение переходных зон образца чугуна СЧ21.

Измерение микротвердости образцов производили вглубь образца и вдоль поверхности на расстоянии 0,3 мм. Рис. 6 и 7 иллюстрируют полученные в ходе измерений значения.

Как видно из рис. 2, при равном тепловложении на поверхности стали Х12МФ характерно наличие ярко выраженной зоны оплавления, представляющей собой дендритную структуру глубиной до 170 мкм с микротвердостью 380–420 Нв. Далее следует зона термического влияния с микротвердостью 400 Нв. При схожих параметрах обработки доля оплавленной зоны чугуна СЧ21 невелика, состоит из ледебурита с микротвердостью 460–540 Нв. Зона термического влияния представляет собой реечный мартенсит с небольшим количеством аустенита остаточного и имеет микротвердость до 930 Нв. Зоны перекрытия образцов имеют структуру зон термического влияния с равной микротвердостью.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительные исследования переходных зон [20, 21] указывали на наличие в них троостита, характерного для зоны отпуска, имеющего пониженную микротвердость, в сравнении с зонами лазерной закалки. Это связано с малой плотностью энергии в зоне лазерного воздействия. При повторном лазерном воздействии в переходной зоне из-за большой протяженности по ширине температура не успевает повторно достичь величин, характерных для образования закалочных структур, и поэтому возникает зона отпуска.

Исследуемые переходные зоны имеют общую структуру с зоной термического влияния. Микротвердость переходных зон равна микротвердости ЗТВ. Это обуславливается более высокой плотностью мощности лазерного излучения, введенной в зону обработки. Однако для стали характерна небольшая разница микротвердости зоны оплавления, зоны термического влияния и переходной зоны между двумя обработанными участками. Для чугуна характерно наличие ярко выраженной границы между микротвердостью составляющих элементов зоны обработки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования зон перекрытия образцов из сталей и чугунов после лазерной закалки позволили сделать заключение о возможности применения оптоволоконных лазеров для повышения эксплуатационных характеристик деталей машин, технологической оснастки и металлорежущего инструмента. Отсутствие зон отпуска в переходных участках говорит о возможности закалки участка обрабатываемой поверхности по всей ширине обработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев В.И., Бойченко О.В., Огин П.А. Модификация поверхности сталей и чугунов при помощи оптоволоконного лазера // Сборник научных трудов Sworld. 2014. Т. 7. № 4. С. 56–61.
2. Огин П.А., Васькин К.Я. Повышение ресурса мелкогабаритного инструмента за счет модификации изнашиваемых поверхностей при помощи оптоволоконного лазера // IV Резниковские чтения: труды междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. Тольятти: ТГУ, 2015. С. 143–145.
3. Григорьянц А.Г., Щиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
4. Пинахин И.А., Тоекин С.А. Выбор режимов объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) по износостойкости режущих инструментов // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 2. С. 78–81.
5. Ярьско С.И., Горяинов Д.С. моделирование процесса лазерного упрочнения режущего инструмента // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 921–926.
6. Ярьско С.И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2001. Т. 3. № 1. С. 27–37.
7. Ситкина Л.П., Ярьско С.И. Эффективность технологии лазерной упрочняющей обработки в инструментальном производстве // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 7. С. 40–43.
8. Lee J.-H., Jang J.-H., Joo B.-D., Son Y.-M., Moon Y.-H. Laser surface hardening of AISI H13 tool steel // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2009. Vol. 19. № 4. P. 917–920.
9. Kim J.-D., Lee M.-H., Lee S.-J., Kang W.-J. Laser transformation hardening on rod-shaped carbon steel by Gaussian beam // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2009. Vol. 19. № 4. P. 941–945.
10. Горынин В., Кондратьев С., Попов В. Лазерное модифицирование трибологических свойств сталей и цветных сплавов // Фотоника. 2010. № 3. С. 26–32.
11. Магин Д.Ю., Костромин С.В. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 256–261.
12. Чирков А. Лазерно-плазменное наноструктурирование поверхностных слоев сталей при атмосферных условиях // Фотоника. 2008. № 4. С. 28–30.
13. Синяков К.А. Влияние скорости нагрева на структуру и свойства инструментальных сталей // Инструмент и технологии. 2008. № 5. С. 151–158.
14. Бирюков В. Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением // Фотоника. 2009. № 3. С. 14–17.
15. Бирюков В. Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении // Фотоника. 2012. № 3. С. 22–27.

16. Adel K.M., Dhia A.S., Ghazali M.J. The effect of laser surface hardening on the wear and friction characteristics of acicular bainitic ductile iron // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2009. Vol. 4. № 2. P. 167–171.
17. Скрипченко А.И. Тестирование процесса закалки сталей излучением волоконных лазеров // *РИТМ*. 2007. № 5. С. 52–53.
18. Попов В. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и CO<sub>2</sub>-лазеров // *Фотоника*. 2009. № 4. С. 18–21.
19. Сомонов В.В., Цибульский И.А. Эффективность использования волоконных лазеров для лазерной закалки изделий в промышленности // *Металлообработка*. 2014. № 1. С. 9–12.
20. Майоров В.С. Лазерное упрочнение металлов // *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. С. 439–469.
21. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
- Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2013, vol. 9, no. 7, pp. 40–43.
8. Lee J.-H., Jang J.-H., Joo B.-D., Son Y.-M., Moon Y.-H. Laser surface hardening of AISI H13 tool steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2009, vol. 19, no. 4, pp. 917–920.
9. Kim J.-D., Lee M.-H., Lee S.-J., Kang W.-J. Laser transformation hardening on rod-shaped carbon steel by Gaussian beam. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2009, vol. 19, no. 4, pp. 941–945.
10. Gorinin V., Kondratiev S., Popov V. Laser Modification of Tribological Behavior of Steel and Nonferrous Alloys. *Fotonika*, 2010, no. 3, pp. 26–32.
11. Magin D.U., Kostromin S.V. Investigation of structure and properties of high heat resistant steel after heat treatment and laser surface hardening. *Trudi Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2013, no. 4, pp. 256–261.
12. Chirkov A. Laser-plasma steel surface layer nanostructuring under atmosphere conditions. *Fotonika*, 2008, no. 4, pp. 28–30.
13. Sinyakov K.A. Influence of heating rate on the structure and characteristics of tool steels. *Instrument i tekhnologii*, 2008, no. 5, pp. 151–158.
14. Birukov V. Surface Recover and Strengthening with Laser Emission. *Fotonika*, 2009, no. 3, pp. 14–17.
15. Birukov V. Steels Structure and Properties Variations in the Process of Laser Hardening. *Fotonika*, 2012, no. 3, pp. 22–27.
16. Adel K.M., Dhia A.S., Ghazali M.J. The effect of laser surface hardening on the wear and friction characteristics of acicular bainitic ductile iron. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2009, vol. 4, no. 2, pp. 167–171.
17. Skripchenko A.I. Testing of the process of steel hardening by fiber lasering. *RITM*, 2007, no. 5, pp. 52–53.
18. Popov V. Laser Hardening Steels. Comparison of Fiber and CO<sub>2</sub> Lasers. *Fotonika*, 2009, no. 4, pp. 18–21.
19. Somonov V.V., Cybulsky I.A. The efficiency of the use of fiber lasers for laser hardening products in the industry. *Metalloobrabotka*, 2014, no. 1, pp. 9–12.
20. Mayorov V.S. Laser hardening of metals. *Lazernie tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemi fundamentalnykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok*. Moscow, FIZMATLIT publ., 2009, pp. 439–469.
21. Grigoryants A.G. *Osnovi lazernoy obrabotki materialov* [Basic principles of laser processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989, 304 p.

## REFERENCES

1. Malyshev V.I., Boychenko O.V., Ogin P.A. Steel and iron surface modification using the fiber optic laser. *Sbornik nauchnikh trudov Sworld*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 56–61.
2. Ogin P.A., Vaskin K.Ya. Improvement of small-size tool resource by means of wearing surfaces modification using the fiber optic laser. *Trudi mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "IV Reznikovskie chteniya"*. Tolyatti, TGU publ., 2015, pp. 143–145.
3. Grigoryants A.G., Shchiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Technical processes of laser treatment]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman publ., 2006, 664 p.
4. Pinahin I.A., Toeskin S.A. Selecting surround pulsed laser hardening (VPLH) for wear of cutting tools. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 78–81.
5. Yaresko S.I., Goryainov D.S. The laser hardening of the cutting tool modelling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 921–926.
6. Yaresko S.I. Wear and wear resistance analysis of hard alloy tools after laser treatment. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2001, vol. 3, no. 1, pp. 27–37.
7. Sitkina L.P., Yaresko S.I. Efficiency of laser hardening processing technology in tool production. *Izvestiya*

**THE STRUCTURE AND CHARACTERISTICS OF THE OVELAP AREAS  
DURING THE LASER HARDENING OF STEELS AND IRONS**

© 2015

*P.A. Ogin*, post-graduate student of the Department «Equipment and technology of machinery production»  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* fiber optic laser; heat-affected zone; laser hardening; thermohardening; microhardness.

*Abstract:* The article considers the issue of wear resistance improvement of working surfaces of the parts of machines, equipment and metal cutting tools. One of the most prospective directions in this field is the thermal treatment of wearing surfaces by means of the action of focused heat flows created by laser light. Modern fiber optic lasers are the most advanced from technology viewpoint. The research and estimation of the structure of the overlap areas during multi-pass laser operation are the key elements of preparing of technology process and influences directly the selection of treatment modes. The author gives the results of experimental research of the influence of fiber optic laser treatment parameters on the state of surface layer of the overlap areas during the multi-pass heat treatment of steels and irons. LKD4-015.150 fiber optic laser was used for experimental research. The treatment was performed in the continuous mode with the partial fusion of processed surface. The process mode was selected according to the data of the work “Modification of steel and iron surfaces using the fiber optic laser”. X12MF steel and SCh21 iron plates 15x15x3 mm in size were used as the samples. After treatment, end surface of each sample was burnished at minimal modes in order to eliminate the additional thermal influence on the structure; after that, microslices were produced on the surface. 4-% alcohol solution of hydrogen nitrate (HNO<sub>3</sub>) was used as an etchant. The hardness was measured using the Shimadzu HMV-2 microhardness tester. The samples’ structure was studied using the Zeiss AXIO Observer.D1m microscope and the Zeiss LEO1455VP electron scanning microscope. During this research, the author carried out the analysis of the overlap areas structure and measured their microhardness. The article displays the computational scheme and calculation formula of engagement factor during the multi-pass processing.