

ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛУЧА НА ГЕОМЕТРИЮ ЗОНЫ ОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛИ 40Х

© 2016

П.А. Огин, аспирант

Д.Л. Мерсон, доктор физико-математических наук, профессор
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

С.И. Ярьско, доктор технических наук

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара (Россия)

Ключевые слова: лазерная закалка; оптоволоконный лазер; зона оплавления; зона термического влияния.

Аннотация: Повышение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей машин, технологической оснастки и металлорежущего инструмента актуально для современной промышленности. Одним из наиболее интенсивно развивающихся методов повышения износостойкости поверхностей трения является лазерная закалка. Лазерная закалка обрабатываемой поверхности возможна из жидкого или твердого состояния. При лазерной закалке из жидкого состояния достигаются наибольшие значения глубины и ширины упрочненного слоя. Для большой номенклатуры корпусных деталей возможно применение лазерной закалки с оплавлением поверхности. В связи с этим изучение структуры зоны упрочнения и выбор режимов, при которых достигаются максимальные характеристики упрочненного слоя, актуально для реализации технологии лазерной закалки в производственных условиях. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния мощности излучения квазинепрерывного оптоволоконного иттербиевого лазера и скорости движения луча лазера на геометрию зоны оплавления стали 40Х без учета изменения геометрии зоны термического влияния. На поверхности образцов с размерами 30×10×5 мм с помощью лазерного излучателя ЛК-150/1500-QCW-АС формировали одиночный термический след с отчетливо заметной зоной оплавления, поперечное сечение которого в дальнейшем изучали при помощи микроскопа ЛабоМет-1. В результате изучения геометрических характеристик поперечного сечения зоны оплавления установлены режимы обработки, при которых изменяется внешний вид сечения зоны оплавления, определены ее ширина и глубина в зависимости от мощности лазерного излучения. Установлены режимы лазерной обработки, при которых достигается наибольшая разница между глубиной зоны оплавления и глубиной кратера, образующегося на поверхности стали.

ВВЕДЕНИЕ

Создание в приповерхностном слое сталей и сплавов структур, обладающих повышенными физико-механическими свойствами, актуально для современной промышленности при изготовлении деталей и инструмента различного назначения.

В ряде случаев целевая задача повышения ресурса конкретного типа изделия не предусматривает качественной модификации структуры используемого материала во всем его объеме, а решается путем применения методов поверхностного упрочнения. Согласно современным представлениям о природе технического ресурса, повышение уровня износостойкости деталей машин, механизмов и инструмента связано не столько с увеличением твердости контактирующих поверхностей, сколько с возможностью управления их физико-химическими свойствами в зависимости от интенсивности механического износа при изменении характера нагружения. Одним из методов, позволяющих реализовать такой подход, является лазерная упрочняющая обработка. Улучшение физико-механических свойств рабочих поверхностей, наиболее подверженных износу, обеспечивает существенный рост эксплуатационных характеристик деталей в течение всего периода работы [1].

По мере развития источников лазерного излучения (в том числе с появлением оптоволоконных лазеров) и совершенствования систем доставки излучения в зону обработки возрастают возможности лазерных технологий, используемых для улучшения физико-механических свойств изнашиваемых поверхностей. К методам лазерной модификации относятся лазерная закалка, лазерное

легирование, лазерная наплавка, лазерная аморфизация и др. [2–14]. Из них технологически более просто реализуется лазерная закалка, существенным преимуществом которой является отсутствие необходимости введения в зону обработки дополнительных легирующих элементов и присадочных материалов.

Сущность процесса лазерной закалки заключается в локальном нагреве участка поверхности материала под воздействием излучения и последующем его охлаждении со сверхкритической скоростью в результате отвода теплоты во внутренние слои металла. Процесс закалки поверхности сталей и сплавов при воздействии лазерного излучения может происходить как в твердом, так и в жидком состоянии при частичном оплавлении поверхности материала в зоне обработки. Оба эти метода могут использоваться в промышленности. Их применение, в основном, регламентируется условиями эксплуатации изделия и трудоемкостью реализации процесса закалки.

При лазерной закалке из твердого состояния (без оплавления поверхности) образуется слой с повышенными физико-механическими свойствами. В этом случае глубина зоны упрочнения при закалке импульсным и непрерывным излучением составляет 0,07–0,15 и 0,8–0,9 мм соответственно [15; 16]. Увеличение глубины упрочненного слоя возможно при обработке с оплавлением поверхности. В частности, в источнике [17] показано, что при закалке сталей и чугунов излучением иттербиевого лазера при плотности мощности более $9 \cdot 10^3$ Вт/см² и скорости движения лазерного луча менее 10 мм/с создаются условия для появления ванны расплава.

При лазерной закалке из жидкого состояния (с оплавлением поверхности) происходит образование нескольких слоев, расположение которых по глубине обусловлено распределением температуры в зоне лазерного воздействия [18]. В частности, для большинства конструкционных материалов при лазерной закалке с оплавлением поверхности характерно образование оплавленного слоя и зоны термического влияния (ЗТВ) (см. рис. 1).

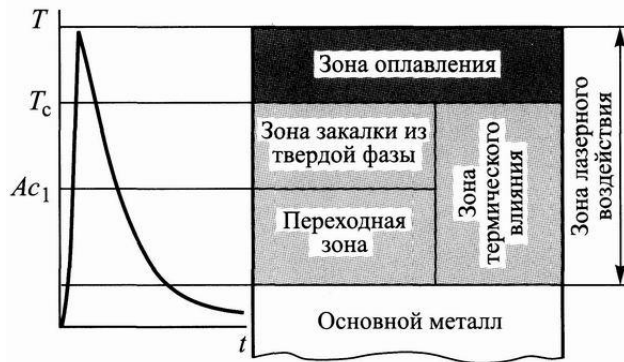


Рис. 1. Строение зоны лазерного воздействия после лазерной закалки

Этот вид закалки позволяет получать слои с повышенными физико-механическими свойствами глубиной до нескольких миллиметров. Существует ряд работ, посвященных изучению структуры материала при лазерной закалке из жидкого состояния [19–21], в связи с чем в настоящей статье преимущественно исследовались геометрические характеристики зоны оплавления в зависимости от режимов лазерной обработки излучением иттербиевого лазера.

Назначение режимов обработки, при которых достигается наибольшая разница между глубиной упрочненного слоя и толщиной слоя удаляемого материала с нару-

шенной геометрией (назовем его «технологическим слоем»), для различных конструкционных материалов является необходимым условием при разработке требований к режимам лазерной закалки из жидкого состояния при ее применении в производственных условиях.

Цель работы – изучение влияния мощности лазерного излучения и скорости движения луча лазера на геометрию зоны оплавления конструкционной стали 40Х при лазерной закалке из жидкой фазы.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для лазерной закалки использовали образцы из стали 40Х в отожженном состоянии размерами 30×10×5 мм. Изменение размеров ЗТВ при вариации режимов лазерной обработки в работе не изучалось. Анализировались размеры зоны оплавления, изменяющиеся в широких пределах при изменении мощности и скорости обработки. Шероховатость поверхности всех образцов Ra 0,63.

Эксперименты проводили с использованием лазерной машины ЛКД4-015.150, имеющей в составе оптоволоконный иттербиевый квазинепрерывный лазерный источник. Мощность лазерного излучения (P) варьировалась в пределах от 30 до 220 Вт, скорость обработки (V) – от 2 до 10 мм/с. Во всех экспериментах частота следования импульсов (f) составила 25 кГц при длительности единичного импульса (τ) 20 мкс. При лазерной обработке формировался одиночный термический след на всей поверхности образца.

Геометрию зоны оплавления на микрошлифе изучали при помощи металлографического микроскопа ЛабоМет-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изменение геометрии ванны расплава, вызванное увеличением мощности лазерного излучения при движении луча с постоянной скоростью ($V=10$ мм/с), показано на рисунке 2.

При анализе микрошлифов установлено, что при мощности лазерного излучения более 50 Вт начинается

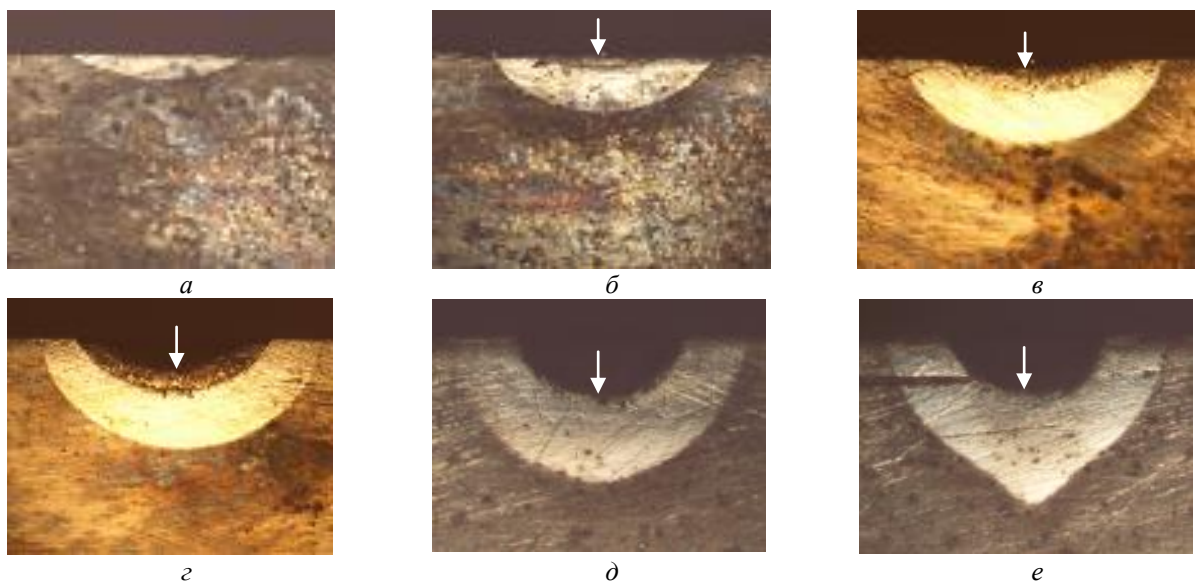


Рис. 2. Изменение геометрии ванны расплава с увеличением мощности лазерного излучения при $V=10$ мм/с: а – 30 Вт; б – 60 Вт; в – 120 Вт; г – 150 Вт; д – 190 Вт; е – 210 Вт

процесс активного перемешивания металла в ванне расплава и процесс испарения части обрабатываемого материала, о чем свидетельствует наличие кратера – технологического слоя (см. описание выше) (на рис. 2 показан стрелкой). В диапазоне мощности от 30 до 190 Вт при скорости обработки 10 мм/с поперечное сечение ванны расплава представляет сегмент окружности. Однако при мощности более 190 Вт происходит изменение формы поперечного сечения ванны расплава. Она становится подобна усеченному конусу и приближается к форме, близкой в сечении к клину (рис. 2 е).

Изменение геометрии ванны расплава, вызванное уменьшением скорости движения луча при постоянной мощности лазерного излучения ($P=100$ Вт), показано на рис. 3.

Видно, что при скорости движения луча 6 мм/с и выше зона расплава в поперечном сечении представляет собой сегмент окружности с ярко выраженным кратером – технологическим слоем (см. рис. 3 а, 3 б). При скорости движения луча менее 6 мм/с поперечное сечение ванны расплава приближается к форме клина (рис. 3 в, 3 г). Скорее всего, это связано с резким повышением плотности мощности в зоне обработки. Такая форма ванны расплава обычно характерна для начальной стадии процесса лазерного раскроя материала.

При проведении экспериментальных исследований были определены ширина зоны оплавления (рис. 4) и ее глубина (рис. 5, кривая 1), а также глубина кратера – технологического слоя (рис. 5, кривая 2) в зависимости от мощности лазерного излучения.

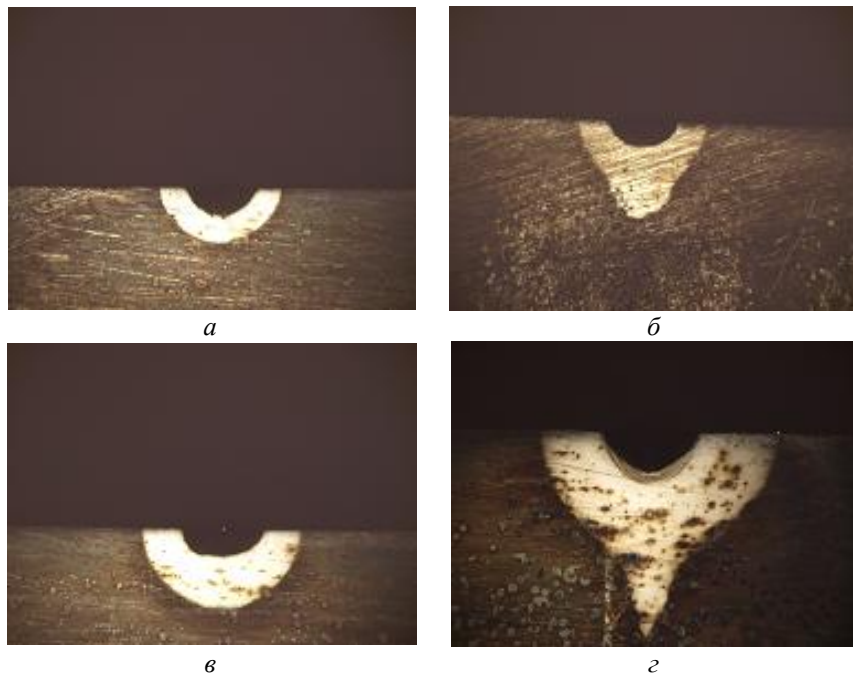


Рис. 3. Изменение геометрии ванны расплава при уменьшении скорости движения луча при $P=100$ Вт: а – $V=8$ мм/с; б – $V=6$ мм/с; в – $V=4$ мм/с; г – $V=2$ мм/с

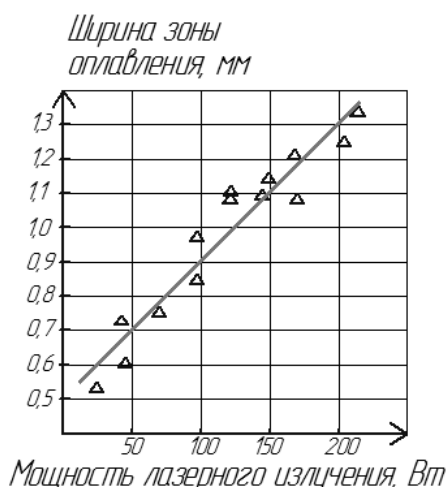


Рис. 4. Зависимость ширины зоны оплавления от мощности лазерного излучения

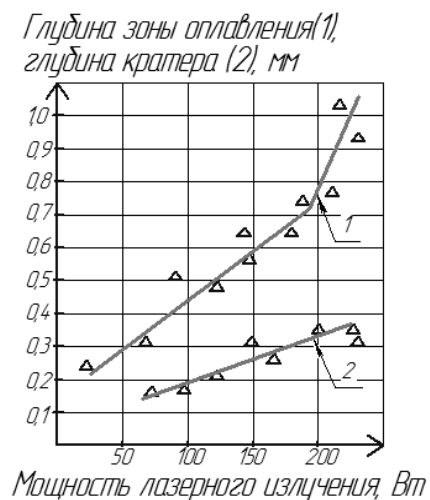


Рис. 5. Зависимость глубины зоны оплавления (1) и глубины кратера (2) от мощности лазерного излучения

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований поперечных микрошлифов зоны оплавления показывают, что геометрические характеристики зоны оплавления зависят как от мощности лазерного излучения, так и скорости движения луча лазера. При мощности от 30 до 190 Вт и скорости обработки 10 мм/с, а также при $V \geq 6$ мм/с и мощности лазерного излучения 100 Вт сечение зоны оплавления представляет сегмент окружности.

Форма сечения зоны оплавления существенным образом зависит от режимов лазерной обработки. В частности, при экспериментальных исследованиях в ряде случаев была получена форма поперечного сечения зоны оплавления, близкая к форме клина (см. рис. 2 е, 3 в и 3 г). Это, как уже отмечалось, скорее всего, обусловлено резким повышением плотности мощности в зоне обработки.

Анализ графиков (рис. 4, 5) позволяет сделать вывод, что при обработке стали 40Х целесообразно использовать режимы, при которых мощность излучения превышает 180 Вт при скорости движения луча 10 мм/с, так как в этом случае зафиксирована максимальная по ширине и глубине зона оплавления.

В результате экспериментов установлен режим обработки, при котором достигнуто наибольшее значение разницы между глубиной зоны оплавления и глубиной кратера, равное 0,4 мм при максимальной ширине обработанного участка (1,1 – 1,2) мм. Мощность лазерного излучения в этом случае составила 180 Вт. Использование такого режима при многопроходной обработке позволяет минимизировать общее количество проходов, необходимых для упрочнения заданной площади, при сохранении максимальной глубины упрочненного слоя.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что:

1) геометрия зоны расплава зависит от режимов обработки и представляет собой в поперечном сечении либо сегмент окружности, либо клин, что указывает на границы применимости рассмотренных режимов для упрочняющей обработки;

2) при мощности лазерного излучения более 190 Вт и скорости движения луча лазера 10 мм/с, а также при мощности лазерного излучения 100 Вт и скорости движения луча лазера менее 6 мм/с происходит изменение формы сечения зоны оплавления от сегмента окружности к клину; применение в производственных условиях этих режимов нежелательно, так как при этом не происходит увеличения ширины зоны оплавления, а наблюдается увеличение глубины кратера (технологического слоя);

3) наибольшая разница между глубиной зоны оплавления и глубиной кратера, равная 0,4 мм, достигается при мощности лазерного излучения 180 Вт и скорости движения луча 10 мм/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козаков А.Т., Ярьско С.И., Сидашов А.В. Модификация и анализ поверхности сталей и сплавов. Ростов н/Д.: ФГБОУ ВПО РГУПС, 2015. 378 с.

2. Скрипченко А.И. Тестирование процесса закалки сталей излучением волоконных лазеров // РИТМ. 2007. № 5. С. 52–53.
3. Попов В. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и CO₂-лазеров // Фотоника. 2009. № 4. С. 18–21.
4. Сомонов В.В., Цибульский И.А. Эффективность использования волоконных лазеров для лазерной закалки изделий в промышленности // Металлообработка. 2014. № 1. С. 9–12.
5. 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.
6. 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.
7. Горынин В., Кондратьев С., Попов В. Лазерное модифицирование трибологических свойств сталей и цветных сплавов // Фотоника. 2010. № 3. С. 26–33.
8. Чирков А. Лазерно-плазменное наноструктурирование поверхностных слоев сталей при атмосферных условиях // Фотоника. 2008. № 4. С. 28–31.
9. Синяков К.А. Влияние скорости нагрева на структуру и свойства инструментальных сталей // Инструмент и технологии. 2008. № 5. С. 151–158.
10. Бирюков В. Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением // Фотоника. 2009. № 3. С. 14–17.
11. Бирюков В. Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении // Фотоника. 2012. Т. 33. № 3. С. 22–27.
12. 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.
13. Grum J. Comparison of different techniques of laser surface hardening // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2007. Vol. 24. P. 17–25.
14. Пинахин И.А., Тоескин С.А. Выбор режимов объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) по износостойкости режущих инструментов // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 2. С. 78–81.
15. Ярьско С.И., Горяинов Д.С. Формирование температурного поля в режущем клине инструмента при импульсной упрочняющей лазерной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 7. С. 30–36.
16. 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.
17. 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.

18. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
19. Гилев В.Г., Морозов Е.А., Пуртов И.Б., Русин Е.С. Исследование микроструктуры и микротвердости зон лазерного оплавления чугуна НИРЕЗИСТ ЧН16Д7ГХ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 6-1. С. 227–233.
20. Огин П.А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2. С. 130–135.
21. 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.
10. Biryukov V. Surface Recovery and Strengthening with Laser Emission. *Fotonika*, 2009, no. 3, pp. 14–17.
11. Biryukov V. Steels Structure and Properties Variations in the Process of Laser Hardening. *Fotonika*, 2012, vol. 33, no. 3, pp. 22–27.
12. 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.
13. Grum J. Comparison of different techniques of laser surface hardening. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, vol. 24, pp. 17–25.
14. Pinakhin 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.
15. Yaresko S.I., Goryainov D.S. Formation of a temperature field in a cutting wedge of the tool at pulse laser hardening. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2012, no. 7, pp. 30–36.
16. Sitkina L.P., Yaresko S.I. The efficiency of laser hardening processing technology in tool manufacture. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 9, no. 7, pp. 40–43.
17. Malyshev V.I., Boychenko O.V., Ogin P.A. Modification of steel and iron surface using fiber optic laser. *Sbornik nauchnykh trudov Sworld*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 56–61.
18. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Technical processes of laser treatment]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2006. 664 p.
19. Gilev V.G., Morozov E.A., Purtoev I.B., Rusin E.S. Microstructure and microhardness research of ni-rezist cast iron after laser surface melting. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 6-1, pp. 227–233.
20. Ogin P.A. The structure and characteristics of the overlap areas during the laser hardening of steels and irons. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2, pp. 130–135.
21. Magin D.Yu., Kostromin S.V. The study of structure and properties of high-resistance hot-working steel after bulk heat treatment and laser surface hardening. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2013, no. 4, pp. 256–261.

REFERENCES

1. Kozakov A.T., Yaresko S.I., Sidashov A.V. *Modifikatsiya i analiz poverkhnosti staley i splavov* [Modification and analysis of steels and alloys surface]. Rostov-on-Don, FGBOU VPO RGUPS Publ., 2015. 378 p.
2. Skripchenko A.I. Testing of the process of steel hardening by fiber lasers emission. *RITM*, 2007, no. 5, pp. 52–53.
3. Popov V. Laser Hardening Steels. Comparison of Fiber and CO₂ Lasers. *Fotonika*, 2009, no. 4, pp. 18–21.
4. Somonov V.V., Tsibulskiy I.A. The efficiency of the use of fiber lasers for laser hardening products in the industry. *Metalloobrabotka*, 2014, no. 1, pp. 9–12.
5. 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.
6. 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.
7. Gorynin V., Kondratev S., Popov V. Laser Modification of Tribological Behavior of Steel and Nonferrous Alloys. *Fotonika*, 2010, no. 3, pp. 26–33.
8. Chirkov A. Laser-plasma steel surface layer nanostructuring under atmosphere conditions. *Fotonika*, 2008, no. 4, pp. 28–31.
9. Sinyakov K.A. The influence of heating rate on the structure and properties of instrument steels. *Instrument i tekhnologii*, 2008, no. 5, pp. 151–158.

**THE INFLUENCE OF LASER EMISSION AND BEAM VELOCITY ON THE GEOMETRY
OF FLASHING ZONE DURING LASER HARDENING OF 40H STEEL**

© 2016

P.A. Ogin, postgraduate student

D.L. Merson, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

S.I. Yaresko, Doctor of Sciences (Engineering)

Samara branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara (Russia)

Keywords: laser hardening; fiber optic laser; fluxed zone; heat-affected zone.

Abstract: The improvement of operating characteristics of the working surfaces of machine parts, tooling and metal cutting tools is important for the modern industry. Laser hardening is one of the most intensively developing methods of improvement of friction surfaces wear resistance. Laser hardening of treated surface is possible from liquid or solid state. The largest values of depth and width of a hardened layer are achieved when laser hardening from the liquid state. The application of laser hardening with surface flashing is possible for a large range of body parts. In this regard, the study of hardened zones structure and the selection of modes that cause the maximum hardened layer characteristics are important for the implementation of laser hardening technology under factory conditions. The paper presents the results of experimental study of the influence of the emission power of the quasi-continuous fiber optic ytterbium laser and laser beam velocity on the geometry of 40H steel flashing zone, not including changes in heat-affected zone geometry. Using the LK-150/1500-QCW-AC laser emitter, the authors formed on the surface of 30×10×5 mm samples the isolated thermal wake with distinctively noticeable fluxed zone and then studied the cross-section of this wake using the LaboMet-1 microscope. In the result of the study of fluxed zone cross-section geometric characteristics, the authors determined the treatment modes at which the fluxed zone cross-section appearance changed and defined its width and depth depending on the laser emission power. Laser treatment modes are defined when the largest difference between the fluxed zone depth and the depth of the crater formed on steel surface is achieved.