

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ НА СТРУКТУРУ, СВОЙСТВА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕЛКОРАЗМЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

© 2015

П.А. Огин, аспирант

Д.Л. Мерсон, доктор физико-математических наук, профессор

Л.А. Кондрашина, начальник лаборатории

К.Я. Васькин, кандидат технических наук, доцент

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: оптоволоконный лазер; зона термического влияния; лазерная закалка; термоупрочнение; микротвердость; износостойкость; режущий инструмент.

Аннотация: В статье рассмотрена проблема повышения износостойкости мелкоразмерного металлорежущего инструмента. Одним из наиболее перспективных путей решения этой проблемы является термическая обработка высококонцентрированными потоками энергии, создаваемыми лучом лазера. Современные оптоволоконные лазеры сочетают в себе высокую плотность мощности лазерного излучения с возможностью доставки луча лазера в наиболее труднодоступные области для обработки за счет использования оптического волокна. Изучение и прогнозирование свойств и структуры модифицируемой зоны является важным элементом подготовки технологического процесса и позволяет подобрать оптимальные режимы лазерной обработки.

В работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния параметров лазерной модификации на состояние и свойства поверхностного слоя образцов из быстрорежущей стали Р6М5. Получены зависимости глубины и ширины зоны термического влияния от мощности лазерного излучения. Произведены измерения микротвердости различных участков обработанной поверхности, подробно изучена получаемая структура для различных режимов лазерной модификации. Выявлено повышение микротвердости при лазерной модификации оптоволоконным лазером при работе в квазинепрерывном режиме. Установлена граница между режимами лазерной модификации с оплавлением и без него для инструментальной стали Р6М5. В качестве практического приложения полученных результатов была проведена оценка износостойкости мелкоразмерного инструмента в зависимости от предложенных режимов. Установлены режимы лазерной модификации, позволяющие повысить стойкость спиральных сверл малого диаметра в 5 и более раз. Результаты испытаний свидетельствуют о невозможности использования некоторых рассматриваемых режимов для модификации рабочих поверхностей инструмента ввиду катастрофического износа обработанной поверхности и разрушения режущей кромки в процессе резания.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях экономического кризиса предприятия, связанные с обработкой материалов резанием, испытывают трудности с закупкой иностранного металлорежущего инструмента. Нестабильность валютного рынка заставляет все большее количество предприятий обращать внимание на недорогой инструмент, изготавливаемый в нашей стране. В этой связи изготовление отечественного инструмента с улучшенными характеристиками является актуальной задачей. В последнее время активно развивается направление модификации рабочих поверхностей инструмента при помощи луча лазера [1–14].

Высокие показатели энергоэффективности процесса лазерной обработки, отсутствие дополнительных требований к процессу лазерной модификации (вакуум, вода, защитные газы и др.), а также возможность обработки труднодоступных участков инструмента сложной формы за счет доставки луча по оптическому волокну открывают доступ к внедрению процесса лазерной модификации при производстве различной номенклатуры продукции [15–19]. Высокая плотность мощности наряду с локальностью зоны обработки позволяет производить обработку малогабаритных деталей, в том числе мелкоразмерного инструмента [19–23].

Целью работы являлось определение влияния параметров лазерной упрочняющей обработки оптоволоконным лазером при работе в квазинепрерывном режиме на структуру и свойства зоны обработки стали

Р6М5. Одной из решаемых задач стала апробация рассмотренных в исследовании режимов лазерной модификации применительно к мелкоразмерному инструменту, в частности к спиральным сверлам малого диаметра (до 1 мм).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты по изучению влияния технологических параметров лазерной модификации на структуру и режущие свойства инструмента проводили на примере одной из наиболее распространенных инструментальных сталей – Р6М5 с помощью оптоволоконного иттербиевого квазинепрерывного лазера ЛКД4-015.150 в режиме квазинепрерывного действия. Мощность лазерного излучения варьировали от 10 Вт до 100 Вт. Скорость движения луча V составляла 10 мм/с, частота следования импульсов f составляла 25 кГц. В качестве образцов использовали пластины с размерами $12 \times 12 \times 3$ мм из стали Р6М5 в отожженном состоянии.

После лазерной обработки торцовую поверхность каждого образца для получения микрошлифов шлифовали на минимальных режимах, позволяющих исключить термическое влияние на структуру. В качестве травителя использовали реактив Марбле. Микротвердость измеряли при помощи прибора ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 200 гс. Структуру образцов изучали на микроскопе Zeiss Axiovert 40 MAT с моторизованным столиком и системой металлографического анализа

Thixomet Pro, а также на электронном сканирующем микроскопе Zeiss Sigma.

После анализа данных были выбраны режимы, по которым были обработаны спиральные сверла из быстрорежущей стали Р6М5 в состоянии поставки. Производили лазерную модификацию по задней поверхности сверла с одной или двух сторон. После этого конусную часть сверла срезали на электроэрозионном станке PG Industrial DK7740 и производили подготовку шлифов, а также измерение микротвердости по описанной выше процедуре. Кроме этого, обработанные и в состоянии поставки сверла подвергали испытанию на износостойкость. Для этого в пластине из нержавеющей стали 12Х18Н10Т производили сверление глухих отверстий на величину не менее 3 диаметров сверла. Испытания проводились на фрезерном станке с ЧПУ Millstar MV660 при частоте вращения $n=800$ об/мин, подаче $s=0,04$ мм/об. Оценивали количество просверленных отверстий до наступления критического износа по задней поверхности, равного $h=0,1$ мм, либо поломки сверла.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и 2 показана структура поперечных сечений зоны обработки лазерным лучом разной мощности. Как видно из рисунка 1, при мощности луча 40 Вт в зоне обработки оплавление полностью отсутствует. Зона термического влияния (ЗТВ) состоит из легированного мартенсита с карбидными включениями (об-

ласть 2 на рис. 1). Этот режим можно использовать при модификации рабочих поверхностей металлорежущего инструмента, в том числе мелкогабаритного, для которого нежелательно оплавление. При этом режиме не происходит критического увеличения микротвердости ЗТВ по сравнению с основным материалом, следовательно, на их границе не должно происходить и существенного снижения когезионных связей.

Рис. 2 иллюстрирует поперечное сечение зоны обработки при прохождении луча с мощностью 60 Вт. В отличие от предыдущего случая, в зоне обработки ярко выражено 3 участка: 3 – зона оплавления, представляющая собой мартенсит, сформировавшийся в результате закалки из расплава, микротвердостью 1020–1050 кгс/мм²; 2 – ЗТВ, состоящая преимущественно из мартенсита отпуска с микротвердостью до 930 кгс/мм², а также 1 – основная структура – аустенит плюс карбиды с микротвердостью порядка 650 кгс/мм². Использование этого режима позволяет получить более высокие показатели микротвердости и, соответственно, более высокую износостойкость в сравнении с предыдущим режимом.

На рисунке 3 показаны зависимости ширины (рис. 3 а) и глубины (рис. 3 б) зоны термического влияния от мощности лазерного излучения.

Как видно из представленных зависимостей, глубина и ширина ЗТВ практически пропорциональны мощности лазерного излучения, причем возрастание размеров зоны термического влияния при выбранных режимах обработки начинается при мощности свыше 10 Вт.

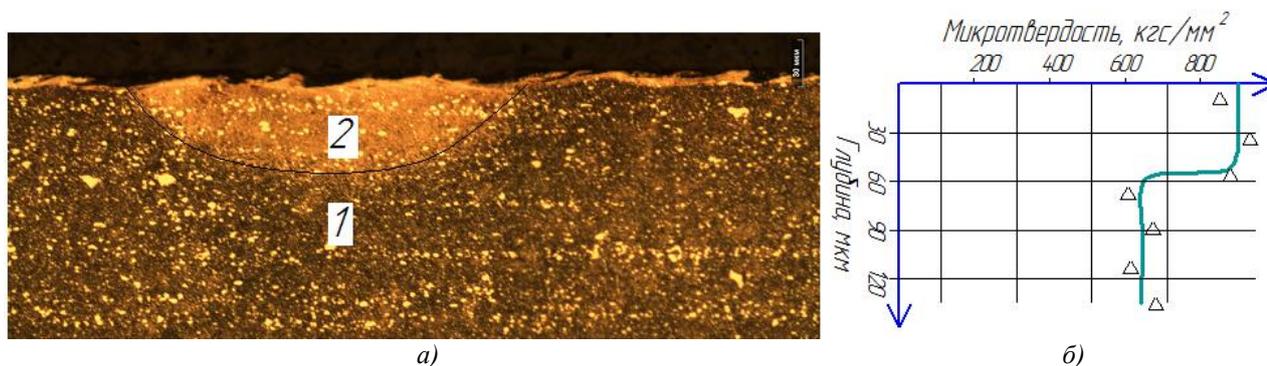


Рис. 1. Структура (а) и распределение микротвердости (б) в поперечном сечении зоны лазерной обработки $P=40$ Вт, $V=10$ мм/с, $f=25$ кГц. 1 – структура основы, 2 – ЗТВ

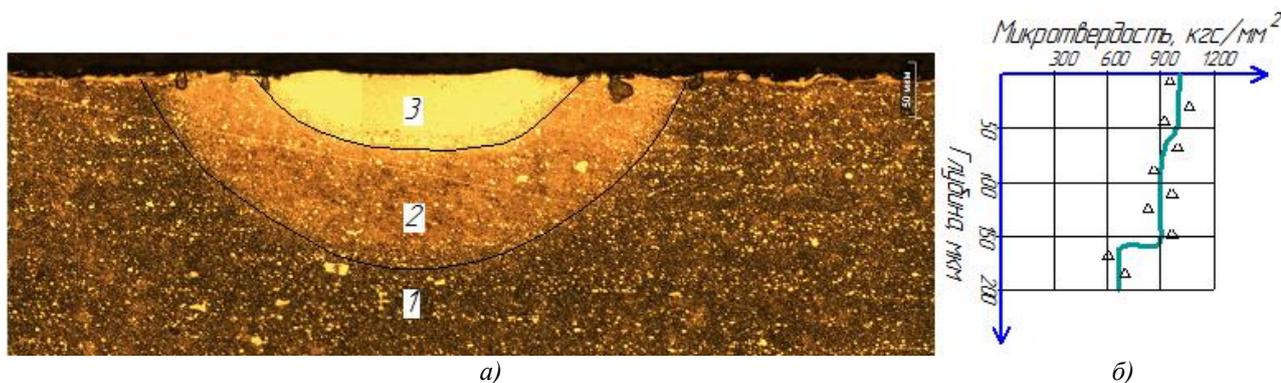


Рис. 2. Структура (а) и распределение микротвердости (б) в поперечном сечении зоны лазерной обработки $P=60$ Вт, $V=10$ мм/с, $f=25$ кГц. 1 – структура основы, 2 – ЗТВ, 3 – зона оплавления

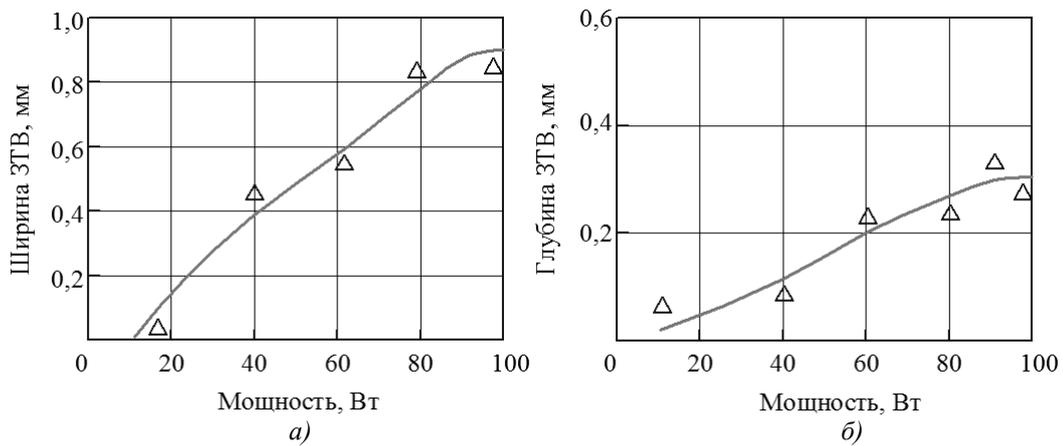


Рис. 3. Зависимости ширины (а) и глубины (б) ЗТВ от мощности лазерного излучения

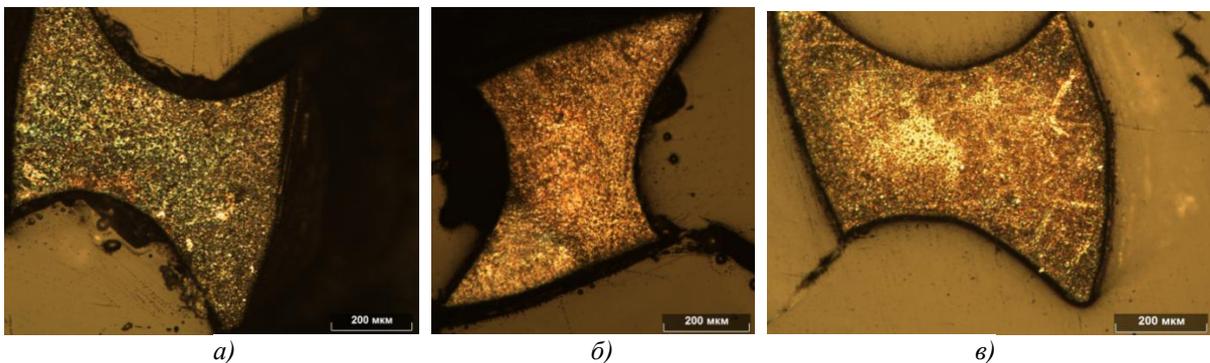


Рис. 4. Поперечные сечения спиральных сверл после модификации: без обработки (а); обработка с одной стороны (б); обработка с двух сторон (в)

Основной задачей лазерного упрочнения режущего инструмента является повышение его стойкости. Наибольшую эффективность лазерной модификации можно ожидать при обработке мелкогабаритного инструмента, т. к. глубина упрочненной зоны практически соответствует величине критического износа инструмента. В связи с этим в ходе работы исследовано влияние режимов лазерной модификации на величину износа спиральных сверл малого диаметра.

Режимы лазерной модификации выбирались таким образом, чтобы не было оплавления поверхности. Результаты лазерной модификации спиральных сверл приведены на рис. 4. На рис. 4 а показано поперечное сечение сверла без обработки. Рис. 4 б иллюстрирует поперечное сечение сверла при односторонней лазерной модификации задней поверхности при обработке с режимами: $P=30 \text{ Вт}$, $V=1,5 \text{ мм/с}$, $f=15 \text{ кг/ц}$. На рис. 4 в показано поперечное сечение сверла после двухсторонней обработки задней поверхности с режимами: $P=35 \text{ Вт}$, $V=1,5 \text{ мм/с}$, $f=15 \text{ кг/ц}$.

Как следует из рис. 4 в, небольшое увеличение мощности лазерного излучения (с 30 до 35 Вт) в границах режима без оплавления поверхности в сочетании с двухсторонней обработкой позволяет провести модификацию инструмента по всей площади сечения. Применительно к инструменту, в частности к мелкогабаритным спиральным сверлам, превышение указанных режимов отрица-

тельно сказывается на его работе. Инструмент, при обработке которого наблюдается даже небольшое оплавление, обладает повышенной хрупкостью поверхностного слоя, из-за чего после обработки уже нескольких отверстий режущая кромка скалывается по границе сопряжения зон 1 и 2 (рис. 2).

Результаты стойкостных испытаний приведены на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Использование высококонцентрированных источников энергии позволяет повысить микротвердость поверхностного слоя быстрорежущей стали Р6М5 в 1,5...2 раза.

2. При выбранных режимах обработки закаленная зона со структурой мартенсита начинает формироваться при мощности лазерного излучения свыше 10 Вт, причем ее ширина и глубина возрастают практически прямо пропорционально увеличению мощности излучения.

3. Повышение мощности лазерного излучения свыше 50 Вт приводит к оплавлению поверхности. Именно на этих режимах достигается максимальная микротвердость в поверхностном слое – 1050 кгс/мм². Однако

в этом случае значительно снижается адгезия между слоями зоны оплавления и зоны термического влияния.

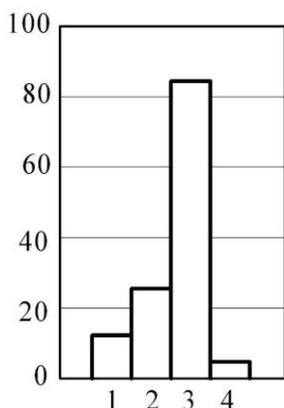


Рис. 5. Стойкость спиральных сверл в зависимости от режима обработки:

- 1 – без обработки; 2 – обработка с одной стороны;
3 – обработка с двух сторон;
4 – обработка с частичным оплавлением

4. Для каждого типа-размера обрабатываемого изделия необходимо подбирать конкретные режимы лазерной модификации. В частности, в настоящей работе с помощью выбранных режимов удалось повысить износостойкость мелкогабаритных спиральных сверл до 8 раз. Однако в случае неверного выбора режима лазерного термоупрочнения может происходить оплавление обработанной поверхности инструмента, приводящее к резкому снижению стойкости инструмента и разрушению режущей кромки сверла в процессе эксплуатации.

5. Наибольшая стойкость сверл наблюдается в случае модификации по задней поверхности с двух сторон, в результате которой достигаются оптимальные физико-механические свойства поверхностного слоя режущих кромок режущего инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Огин П.А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2-2. С. 130–135.
- Мальшев 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.
- Григорьянц А.Г., Щиганов И.Н., Мисюров А.И. Технические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- Горынин В., Кондратьев С., Попов В. Лазерное модифицирование трибологических свойств сталей и цветных сплавов // Фотоника. 2010. № 3. С. 26–33.
- Магин Д.Ю., Костромин С.В. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 256–261.
- Чирков А. Лазерно-плазменное наноструктурирование поверхностных слоев сталей при атмосферных условиях // Фотоника. 2008. № 4. С. 28–31.
- Бирюков В. Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением // Фотоника. 2009. № 3. С. 14–17.
- Бирюков В. Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении // Фотоника. 2012. № 3. С. 22–27.
- 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.
- Скрипченко А.И. Тестирование процесса закалки сталей излучением волоконных лазеров // РИТМ. 2007. № 5. С. 52–53.
- Попов В. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и CO₂-лазеров // Фотоника. 2009. № 4. С. 18–21.
- Сомонов В.В., Цибульский И.А. Эффективность использования волоконных лазеров для лазерной закалки изделий в промышленности // Металлообработка. 2014. № 1. С. 9–12.
- Майоров В.С. Лазерное упрочнение металлов // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. С. 439–469.
- Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
- Огин П.А., Левашкин Д.Г. Концепция «носитель-оптоволоконный лазер» как единый комплекс для автоматизации технологических процессов // IV Резниковские чтения: труды междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. Тольятти: ТГУ, 2015. С. 362–365.
- 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.
- 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.
- 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.

22. Синяков К.А. Влияние скорости нагрева на структуру и свойства инструментальных сталей // *Инструмент и технологии*. 2008. № 5. С. 151–158.
 23. Огин П.А., Васькин К.Я. Повышение ресурса мелкокоразмерного 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.
- REFERENCES**
1. Ogin P.A. The structure and characteristics of the overlap areas during the laser hardening of steels and irons. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2, pp. 130–135.
 2. Malyshev V.I., Boychenko O.V., Ogin P.A. Steel and iron surface modification using the feber optic laser. *Sbornik nauchnykh trudov Sworld*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 56–61.
 3. Grigoryants A.G., Shchiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Technical processes of laser treatment]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman Publ., 2006. 664 p.
 4. Sitkina L.P., Yaresko S.I. Efficiency of laser hardening processing technology in tool production. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 9, no. 7, pp. 40–43.
 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. Gorinin V., Kondratiev S., Popov V. Laser Modification of Thribological Behaiver of Steel and Nonferrous Alloys. *Fotonika*, 2010, no. 3, pp. 26–33.
 8. Magin D.Yu., Kostromin S.V. Investigation of structure and properties of high heat resistant steel after heat treatment and laser surface hardening. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2013, no. 4, pp. 256–261.
 9. Chirkov A. Laser-plasma steel surface layer nanostructuring under atmosphere conditions. *Fotonika*, 2008, no. 4, pp. 28–31.
 10. Birukov V. Surface Recovery and Strengthening with Laser Emission. *Fotonika*, 2009, no. 3, pp. 14–17.
 11. Birukov V. Steels Structure and Properties Variations in the Process of Laser Hardening. *Fotonika*, 2012, 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. Skpipchenko A.I. Testing of the process of steel hardening by fiber lasering. *RITM*, 2007, no. 5, pp. 52–53.
 14. Popov V. Laser Hardening Steels. Comparison of Fiber and CO2 Lasers. *Fotonika*, 2009, no. 4, pp. 18–21.
 15. 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.
 16. Mayorov V.S. Laser hardening of metals. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamentalnykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, pp. 439–469.
 17. Grigoryants A.G. *Osnovy lazernoy obrabotki materialov* [Basic principles fo laser processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 304 p.
 18. Ogin P.A., Levashkin D.G. “Carrier-fiber optic laser” conception as a single complex for technological processes automation. *Trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii “IV Reznikovskie chteniya”*. Togliatti, TGU Publ., 2015, part 1, pp. 362–365.
 19. 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.
 20. Yaresko S.I., Goryainov D.S. The laser hardening of the cutting tool modeling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 921–926.
 21. 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.
 22. Sinyakov K.A. Influence of heating rate on the structure and characteristics of tool steels. *Instrument i tekhnologii*, 2008, no. 5, pp. 151–158.
 23. Ogin P.A., Vaskin K.Ya. Improvement of small-size tool resource by means of wearing surfaces modification using the fiber optic laser. *Trudy mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii “IV Reznikovskie chteniya”*. Togliatti, TGU Publ., 2015, part 1, pp. 143–145.

**THE INFLUENCE OF LASER MODIFICATION MODES ON THE STRUCTURE, PROPERTIES
AND WEAR RESISTANCE OF SMALL-SIZED TOOL MADE OF HIGH-SPEED R6M5 STEEL**

© 2015

P.A. Ogin, postgraduate student

D.L. Merson, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor

L.A. Kondrashina, Head of Laboratory

K.Y. Vaskin, PhD (Engineering), Associate Professor,
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: fiber optic laser; heat-affected zone; laser hardening; thermohardening; microhardness; wear resistance; cutting tools.

Abstract: The paper considers the issue of wear resistance improvement of small-sized cutting tools. One of the advanced ways to solve this problem is the heat treatment using the highly concentrated energy flows created by laser beam. Modern fiber optic lasers combine high power density of laser radiation with the possibility of laser beam delivery to the most hard-to-reach treated areas by using optic fiber. The study and forecasting of the properties and the structure of a modified zone are the most important elements of technological process preparing and allow selecting optimal modes of laser treatment.

The paper gives the results of experimental study of the influence of laser modification parameters on the state and properties of the surface layer of the high-speed R6M5 steel samples. The authors obtained the dependences of heat-affected zone depth and width on the laser radiation power, measured the microhardness of various areas of treated surface and studied in details the structure obtained for various laser modification modes. The study revealed the increase in microhardness resulting from the fiber optic laser modification during the quasi-continuous operation and set the boundary between the modes of laser modification with flashing and without it for R6M5 tool steel. As the practical application of the results obtained, the authors carried out the evaluation of small-sized tools wear resistance according to the suggested modes and determined the laser modification modes allowing the increase of durability of small diameter twist drills in 5 and more times. Test results demonstrate the unavailability of some relevant modes for the tool working surfaces modification due to the extremely gross wear of the processed surface and the cutting edge damage within the cutting process.