

УДК 621.983.32:621.78-977

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.157

РЕЖИМЫ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Л.В. Кремлева, д-р. техн. наук, доц.

В.И. Малыгин, д-р. техн. наук, проф.

К.К. Снегирева, асп.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова – филиал в г. Северодвинске, ул. Капитана Воронина, д. 6, г. Северодвинск, Россия, 164500; e-mail: kremleva67@mail.ru

Одним из наиболее перспективных направлений повышения износостойкости и прочности дереворежущего инструмента является закалка рабочих поверхностей лучом лазера. В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса лазерного упрочнения легированных инструментальных сталей, широко используемых для изготовления фрезерного дереворежущего инструмента. Известно, что предварительная объемная термообработка образцов из инструментальной стали оказывает существенное влияние на показатели качества поверхностного слоя (остаточные напряжения, глубина упрочнения, микротвердость поверхности) при последующем лазерном упрочнении. Эксперименты проведены на установке импульсного лазерного термоупрочнения «Квант-18» с длиной импульса 8 мс на образцах сталей 9ХС и ХВГ. Остаточные напряжения упрочненной зоны и остаточный аустенит определяли с помощью установки Rigaku FSM-2M, микротвердость измеряли на микрошлифах твердомером ПМТ-3. Первая серия экспериментов по лазерному упрочнению проведена на незакаленных образцах. Установлено, что после лазерного воздействия на структурно неоднородный образец возникают неблагоприятные растягивающие поверхностные напряжения, микротвердость при этом изменяется незначительно. Во второй серии экспериментов образцы подвергали объемной термообработке. Сделан вывод о том, что для качественного лазерного упрочнения после объемной термообработки необходимо проводить низкий отпуск. С ростом температуры отпуска происходит снижение остаточного аустенита в поверхностном слое упрочняемой детали, что уменьшает величину упрочненного слоя и микротвердость поверхности. Рост температуры предварительной закалки положительно сказывается на показателях качества упрочненного слоя, но при этом существенно снижается обрабатываемость резанием инструментальных сталей, что может негативно отразиться на операциях механической обработки рабочих и базирующих поверхностей инструмента (включая шлифование), предшествующих операции лазерного упрочнения.

Ключевые слова: дереворежущий инструмент, лазерное упрочнение, закалка, отпуск, остаточный аустенит, глубина упрочненного слоя, микротвердость.

Для цитирования: Кремлева Л.В., Малыгин В.И., Снегирева К.К. Режимы лазерного упрочнения дереворежущего инструмента из легированных сталей // Лесн. журн. 2016. № 5. С. 157–166. (Изв. высш. учебных заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.157

Несмотря на устойчивую тенденцию использования в деревообработке режущего инструмента из твердых сплавов и сверхтвердых материалов, применение инструментальных легированных сталей не теряет своей актуальности. В пользу этого свидетельствует относительно низкая стоимость, значительный ресурс за счет большого числа допускаемых переточек. Но самым главным фактором, позволяющим активно использовать деревообрабатывающий инструмент из инструментальных сталей, является острота и формоустойчивость режущих кромок, что оказывает существенное влияние на шероховатость поверхности при обработке сложных профилей фрезерованием профилированным инструментом. Поэтому задача повышения эксплуатационной надежности инструмента из инструментальных сталей не теряет своей актуальности, а разработка и исследование технологических способов повышения стойкости и ресурса инструмента позволяют в целом повысить эффективность и качество операций механической обработки древесины и древесных материалов.

Работоспособность рабочих поверхностей режущего инструмента в значительной мере определяется качеством поверхностного слоя. При этом к рабочим поверхностям фрезерного инструмента, работающего в условиях циклических нагрузок, предъявляются особые требования как по микротвердости, глубине и степени упрочнения поверхностного слоя, так и по величине остаточных напряжений. Эти параметры не только в полной мере определяют микропрочность рабочих поверхностей инструмента, но и в значительной степени влияют на способность к истиранию – износостойкость.

Известно, что методы лазерного упрочнения являются перспективными для изделий, ресурс которых лимитируется износостойкостью [1, 4, 6, 11, 12]. Параметры качества упрочненного поверхностного слоя при этом зависят от температурно-временных характеристик лазерного упрочнения [7]. Изменяя их, можно сформировать поверхностный слой с заданными твердостью и структурой. Следует отметить, что при лазерной обработке не происходит изменения геометрии нагреваемого участка. Это создает перспективы использования лазерных методов в технологических процессах упрочнения поверхностей без последующего шлифования.

В целом получение материалов с заданной структурой является довольно сложной задачей. Технологические параметры лазерного упрочнения и исходное структурное состояние материала оказывают влияние на структуру упрочненного поверхностного слоя [2, 3, 9, 10, 13–15]. При этом, чем однородней исходная структура, тем более значительно упрочняется поверхностный слой, что может быть объяснено образованием мелкозернистой мартенситной структуры [8]. Однако в ряде случаев при обработке изделия с исходной неоднородностью сложно получить однородную структуру и требуемую твердость [5, 8].

Цель данной работы – исследование влияния технологии лазерного упрочнения на качество поверхностного слоя дереворежущего фрезерного инструмента из инструментальных легированных сталей.

Для оценки влияния технологических режимов лазерного упрочнения на показатели качества поверхностного слоя были выбраны образцы из сталей 9ХС и ХВГ. Лазерное термоупрочнение поверхностного слоя образцов проводили на серийной установке импульсного лазерного термоупрочнения «Квант-18» с длиной импульса 8 мс. Плотность мощности лазерного излучения подбирали таким образом, чтобы сохранялась микрогеометрия поверхности и не происходило ее оплавления ($\sim 1,53 \cdot 10^5$ Вт/см²). Диаметр пятна контакта варьировал в пределах 6...8 мм, коэффициент перекрытия при этом составлял 0,5. Остаточные напряжения упрочненной зоны и остаточный аустенит определяли неразрушающим рентгенографическим способом с помощью установки Rigaku FSM-2М, микротвердость измеряли на микрошлифах твердомером ПМТ-3 по методике, приведенной в ГОСТ 9450–76.

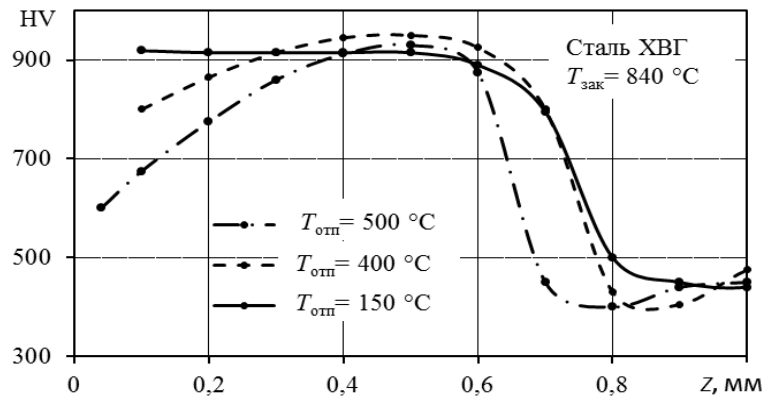
Перед основной серией экспериментов были проведены предварительные эксперименты на незакаленных инструментальных сталях. При этом измеряли величину и знак остаточных напряжений при различных значениях энергии лазерного излучения Q и постоянном диаметре пятна $D = 6$ мм. Данные предварительных экспериментов приведены в таблице.

Результаты определения остаточных напряжений в двух направлениях незакаленных образцов из инструментальных сталей при лазерном воздействии

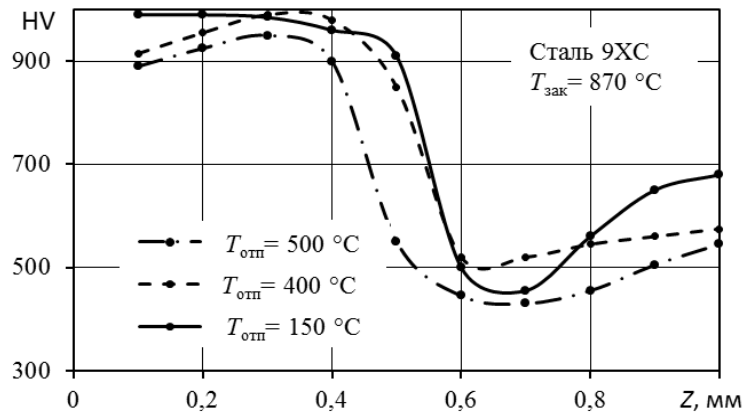
Сталь	Режим лазерной обработки	Остаточные напряжения, МПа, в направлениях		Микротвердость поверхности, HV 1/30
		σ_x	σ_y	
ХВГ	Исходное состояние образцов	-186,2	-411,6	5252...6203
	$Q = 38$ Дж	607,6	588,0	6291...6987
	$Q = 43$ Дж	725,2	725,2	
	$Q = 48$ Дж	705,6	686,0	
9ХС	Исходное состояние образцов	-254,8	-470,4	6203...6487
	$Q = 38$ Дж	1195,6	1048,6	6252...7565
	$Q = 43$ Дж	1146,6	1176,0	
	$Q = 48$ Дж	1421,0	1362,2	

Результаты предварительных экспериментов позволили сделать вывод о том, что быстрый нагрев поверхности при лазерной обработке приводит к изменению знака остаточных напряжений. Во всех экспериментах возникновение значительного температурного градиента при лазерном воздействии на структурно неоднородный образец свело к нулю эффективность лазерной обработки и привело к появлению неблагоприятных растягивающих поверхностных напряжений, микротвердость при этом изменялась незначительно.

Как было сказано выше, структурно-фазовое состояние заготовок оказывает значительное влияние на характеристики поверхностного слоя, поэтому целью следующей серии экспериментов являлось изучение влияния предварительной объемной термической обработки на микротвердость и содержание остаточного аустенита в поверхностных слоях исследуемых образцов. Результаты экспериментов представлены на рис. 1, 2.



a

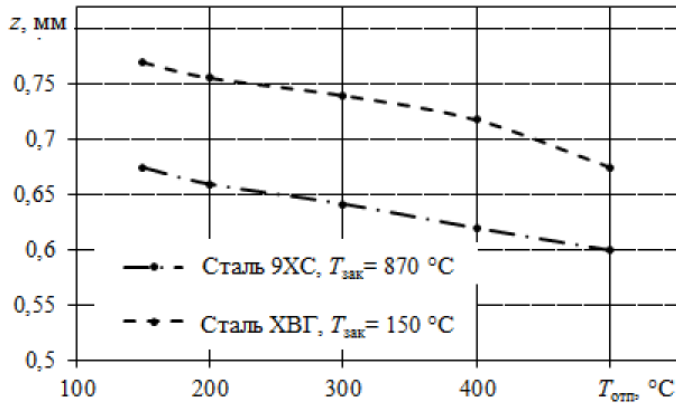


б

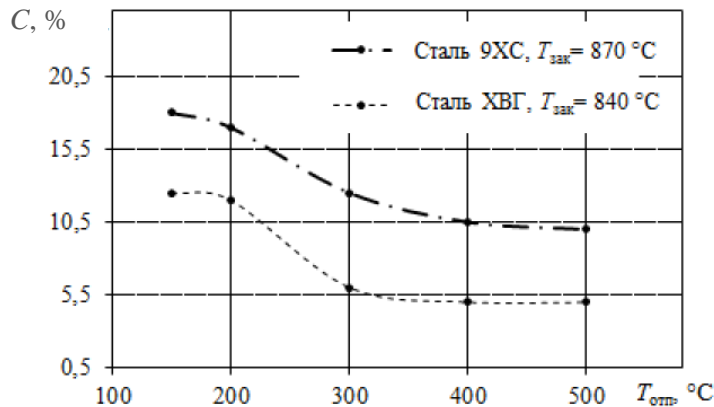
Рис. 1. Зависимость микротвердости HV и глубины лазерного упрочнения z от температуры отпуска $T_{\text{отп}}$ при постоянной температуре закалки $T_{\text{зак}}$

Предварительная термическая обработка образцов влияет на глубину и распределение микротвердости по глубине следующим образом. При лазерном упрочнении исследуемых материалов, прошедших объемную закалку в муфельной печи, повышение температуры отпуска приводит к снижению

микротвердости поверхностного слоя с одновременным, хотя и незначительным, уменьшением его глубины. Такая зависимость может быть объяснена наличием после закалки и низкого отпуска остаточного аустенита, количество которого уменьшается с ростом температуры отпуска (рис. 2).



а



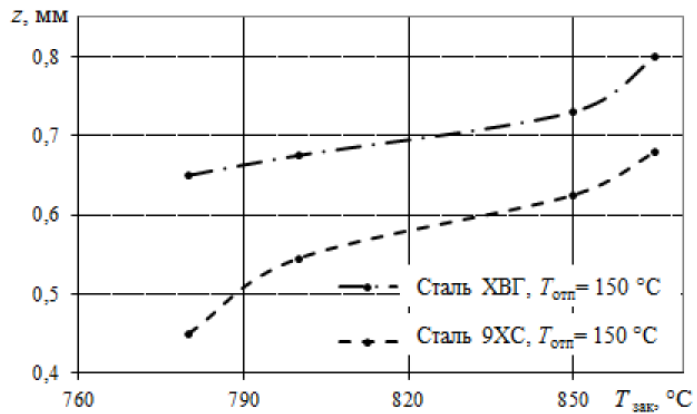
б

Рис. 2. Зависимость глубины упрочненной зоны z (а) и содержания (С) остаточного аустенита (б) от температуры отпуска $T_{отп}$

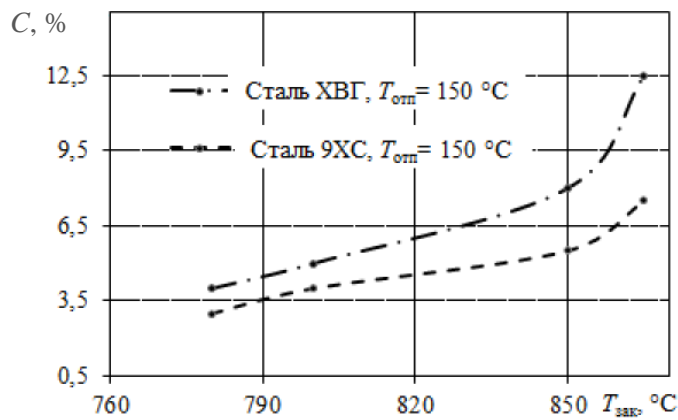
В связи с тем, что аустенит обладает достаточно высокой теплопроводностью ($\lambda = 0,1$ кал/(см·с·градус)), с уменьшением его количества снижается теплопроводность образца. Одновременно при возрастании температуры отпуска увеличивается количество карбидов, имеющих низкую теплопроводность ($\lambda = 0,017$ кал/(см·с·градус)), что также снижает общую теплопроводность. Уменьшение микротвердости в приповерхностном слое объясняется

также снижением общей теплопроводности образцов и, как следствие, нагревом его до более высоких температур при лазерном воздействии. В закаленном слое появляется большое количество аустенита.

На рис. 3 приведены зависимости влияния температуры объемной закалки образцов на глубину упрочненного слоя и остаточный аустенит при низком отпуске.



a



б

Рис. 3. Зависимость глубины упрочненной зоны *z* (*a*) и содержания (*C*) остаточного аустенита (*б*) от температуры закалки $T_{зак}$ при низком отпуске

С ростом температуры закалки в поверхностных слоях возрастает содержание остаточного аустенита, что приводит к увеличению глубины «прокаливаемости» поверхности при лазерном воздействии и, как следствие, к увеличению глубины упрочненного слоя.

Таким образом, предварительная объемная термообработка образцов из инструментальной стали оказывает существенное влияние на показатели качества поверхностного слоя при лазерном упрочнении: величину остаточных напряжений, глубину упрочнения и микротвердость поверхности. Для качественного лазерного упрочнения после объемной термообработки в печах необходимо проводить предварительный низкий отпуск. С ростом температуры отпуска содержание остаточного аустенита в поверхностном слое упрочняемой детали снижается, что приводит к уменьшению величины упрочненного слоя и микротвердости поверхности. Рост температуры предварительной закалки положительно сказывается на показателях качества упрочненного слоя, но при этом существенно снижается обрабатываемость резанием, что может негативно отразиться на операциях механической обработки рабочих и базирующих поверхностей инструмента (включая шлифование), предшествующих операции лазерного упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зотов Г.А., Памфилов Е.А.* Повышение стойкости дереворежущего инструмента. М.: Экология, 1991. 295 с.
2. *Бирюков В.* Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении // Фотоника. 2012. № 3. С. 22–27.
3. *Бровер А.В., Бровер Г.И., Дьяченко Л.Д.* Некоторые особенности структурного состояния сталей в зонах лазерной обработки // Черная металлургия. 2007. № 6. С. 36–45. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Григорьянц А.Г., Щиганов И.Н., Мисюров А.И.* Технические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
5. *Гуреев Д.М., Камашев А.В., Ямщиков С.В.* Механизмы фазовых превращений в железе и сталях при лазерном нагреве. Самара: Самарский университет, 1999. 164 с.
6. *Моисеев А.В.* Износостойкость дереворежущего инструмента. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 111 с.
7. *Попов В.С.* Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и CO₂-лазеров // Фотоника. 2009. № 4. С. 18–21.
8. *Пронин М.М., Старцев В.Н., Попов В.О., Вайнерман А.Е., Калганов Б.Д.* Лазерная обработка материалов. Перспективные технологии и оборудование // Вопр. материаловедения. 1999. № 3. С. 375–93.
9. *Синяков К.А.* Влияние скорости нагрева на структуру и свойства инструментальных сталей // Инструмент и технологии. 2008. № 5. С. 151–158.
10. *Ситкина Л.П., Ярьско С.И.* Эффективность технологии лазерной упрочняющей обработки в инструментальном производстве // Изв. ВолгГТУ. 2013. Т. 9, № 7. С. 40–43.
11. *Сомонов В.В., Цибульский И.А.* Эффективность использования волоконных лазеров для лазерной закалки изделий в промышленности // Металлообаб. 2014. № 1. С. 9–12.

12. Яресько С.И., Горяинов Д.С. Моделирование процесса лазерного упрочнения режущего инструмента // Изв. Самар. НЦ РАН. 2011. Т. 13, № 4-3. С. 921–926.

13. 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 J. of Mechanical and Materials Engineering. 2009. Vol. 4, N 2. P. 167–171.

14. El-Batahgy A.M., Ramadan A.R., Moussa A.R. Laser Surface Hardening of Tool Steels – Experimental and Numerical Analysis // J. of Surface Engineered Materials and Advanced Technology. 2013. N 3. P. 146–153.

15. 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, N 4. P. 917–920.

Поступила 20.05.15

UDC 621.983.32:621.78-977

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.157

The Modes of Laser Hardening of Alloyed Steel Wood-Cutting Tools

L.V. Kremleva, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor

V.I. Malygin, Doctor of Engineering Sciences, Professor

K.K. Snegireva, Postgraduate Student

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Captain Voronin str., 6, Severodvinsk, Arkhangelsk region, 164500, Russian Federation;
e-mail: kremleva67@mail.ru

One of the most promising directions of increasing the wear resistance and durability of wood-cutting tools is a hardening of working surfaces by a laser beam. The article presents the results of experimental studies of the process of laser hardening of alloyed tool steels, widely used for the manufacture of milling wood-cutting tools. The preliminary volume heat treatment of tool steel samples has a significant influence on the quality parameters of the surface layer (residual stresses, hardening depth, surface micro-hardness) in the subsequent laser hardening. The experiments are carried out at the pulsed laser strengthening installation «Kvant-18» with a pulse length of 8 ms on the samples of 9XS and CWM steels. Residual stresses of the hardened zone and residual austenite are determined by Rigaku FSM-2M, the microhardness is measured on the micro-sections by a hardness tester PMT-3. The first series of experiments in laser hardening are carried out on unquenched samples. The laser effect on the structurally nonhomogeneous sample leads to adverse tensile surface stresses, microhardness changes slightly. In the second series of experiments the samples are subjected to volume heat treatment. For the quality of laser hardening after a volume heat treatment it is necessary to carry out low tempering. With increasing the tempering temperature the residual austenite decreases in the surface layer of a hardenable part, which reduces

For citation: Kremleva L.V., Malygin V.I., Snegireva K.K. The Modes of Laser Hardening of Alloyed Steel Wood-Cutting Tools. *Lesnoy zhurnal*, 2016, no. 5, pp. 157–166. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.157

the size of the hardened layer and the microhardness of the surface. The pre-quenching temperature rise has a positive effect on the quality parameters of the hardenable layer, but machinability of tool steels significantly decreases that can adversely affect the machining operations of working and basing tools faces (including grinding) prior to the operation of laser hardening.

Keywords: wood-cutting tool, laser hardening, hardening, tempering, retained austenite, hardened layer depth, micro-hardness.

REFERENCES

1. Zotov G.A, Pamfilov E.A. *Povyshenie stoykosti derevorezhushchego instrumenta* [Increasing of Wood-Cutting Tools Resistance]. Moscow, 1991. 295 p.
2. Biryukov V. *Izmenenie struktury i svoystv staley pri lazernom uprochnenii* [Changes in the Structure and Properties of Steels at Laser Consolidation]. *Fotonika* [Photonics], 2012, no. 3, pp. 22–27.
3. Brover A.V., Brover G.I., D'yachenko L.D. *Nekotorye osobennosti strukturnogo sostoyaniya staley v zonakh lazernoy obrabotki* [Some Features of the Structural State of Steels in the Areas of Laser Processing]. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 2007, no. 6, pp. 36–45.
4. Grigor'yants A.G., Shchiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [The Technological Processes of Laser Processing]. Moscow, 2006. 664 p.
5. Gureev D.M., Kamashev A.V., Yamshchikov S.V. *Mekhanizmy fazovykh prevrashcheniy v zheleze i stalyakh pri lazernom nagreve* [The Mechanisms of Phase Transformations in Iron and Steel by Laser Heating]. Samara, 1999. 164 p.
6. Moiseev A.V. *Iznosostoykost' derevorezhushchego instrumenta* [Wear Resistance of Wood-Cutting Tools]. Moscow, 1981. 111 p.
7. Popov V.S. *Lazernoe uprochnenie staley: sravnenie volokonnykh i CO₂-lazerov* [Steels Laser Hardening: a Comparison of Fiber and CO₂ Lasers]. *Fotonika* [Photonics], 2009, no. 4, pp. 18–21.
8. Pronin M.M., Startsev V.N., Popov V.O., Vaynerman A.E., Kalganov B.D. *Lazernaya obrabotka materialov. Perspektivnye tekhnologii i oborudovanie* [Laser Materials Processing. Advanced Technologies and Equipment]. *Voprosy materialovedeniya*, 1999, no. 3, pp. 375–393.
9. Sinyakov K.A. *Vliyanie skorosti nagreva na strukturu i svoystva instrumental'nykh staley* [Effect of Heating Rate on the Structure and Properties of Tool Steels]. *Instrument i tekhnologii*, 2008, no. 5, pp. 151–158.
10. Sitkina L.P., Yares'ko S.I. *Effektivnost' tekhnologii lazernoy uprochnyayushchey obrabotki v instrumental'nom proizvodstve* [The Effectiveness of Laser Hardening Treatment Technology in Tool Production]. *Izvestia VSTU*, 2013, vol. 9, no. 7, pp. 40–43.
11. Somonov V.V., Tsibul'skiy I.A. *Effektivnost' ispol'zovaniya volokonnykh lazerov dlya lazernoy zakalki izdeliy v promyshlennosti* [The Effectiveness of the Use of Fiber Lasers for Laser Hardening of Products in the Industry]. *Metalloobrabotka*, 2014, no. 1, pp. 9–12.
12. Yares'ko S.I., Goryainov D.S. *Modelirovanie protsessa lazernogo uprochneniya rezhushchego instrumenta* [The Simulation of Laser Hardening of Cutting Tools]. *Izvestiya*

Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 4–3, pp. 921–926.

13. 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.

14. El-Batahgy A.M., Ramadan R.A., Moussa A.R. Laser Surface Hardening of Tool Steels – Experimental and Numerical Analysis. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2013, no. 3, pp. 146–153.

15. 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*, 2009, vol. 19, no. 4, pp. 917–920.

Received on May 20, 2015