

УДК 621.789

doi:10.20998/2413-4295.2016.42.08

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СКОРОСТНОГО АЗОТИРОВАНИЯ СТАЛИ

ИДАН АЛАА ФАДИЛ И, О. В. АКИМОВ, Е. А. КОСТИК*

Кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА

*email: eklitus@gmail.com

АННОТАЦИЯ Целью данной работы является разработка скоростной технологии упрочнения деталей для обеспечения высоких эксплуатационных свойств поверхностного слоя стали 38Х2МЮА. Интенсифицирован процесс азотирования за счет предварительной лазерной обработки поверхности стальных изделий. Изучено влияние предварительной лазерной обработки стали на изменение глубины упрочненного слоя. Получены закономерности изменения толщины упрочненного слоя в зависимости от скорости передвижения лазерного луча для поверхностных слоев стали 38Х2МЮА обработанных только лазером и комбинированной технологией упрочнения. Изучено влияние предварительной лазерной обработки стали на изменения значений поверхностной твердости. Установлено, что увеличение скорости передвижения лазерного луча резко снижает поверхностную твердость стали.

Ключевые слова: комбинированная обработка; лазерная обработка; азотирование; толщина упрочненного слоя; поверхностная микротвердость.

THE INNOVATIVE TECHNOLOGY OF HIGH-SPEED NITRIDING STEEL

IDAN ALAA FADHIL I, O. AKIMOV, K. KOSTYK*

Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Currently, the development of new resource-saving and economically expedient technologies of combined hardening of steel parts with a significant reduction in the duration of the treatment is an important and urgent task. The aim of this work is to develop high-speed technologies of hardening of details to ensure high operational properties of the surface layer of steel. Intensified nitriding process due to the advanced laser surface treatment of steel products. The test material is high quality structural alloy steel 38Cr2MoAl. The laser treatment of steel was carried out on the installation "Latus-31," according to the following modes: radiation power is 1.0–0.1 kW, diameter of area of focusing of the beam is 5 mm, the moving speed of the laser beam of 0.5–1.5 m/min. Nitriding was carried out in the environment of finely dispersed nitrogen-containing substances with activators at a temperature of 530–560 °C for 2–3 hours. The influence of laser pre-treatment of steel to change the depth of the hardened layer. The obtained regularities of the thickness of the hardened layer depending on the change of the movement speed of the laser beam to the surface layers of steel 38Cr2MoAl treated only with laser technology and combined hardening. It is established that the nitriding after laser treatment increases the thickness of the hardened layer of 1.05–1.59 times, which has a positive effect on the performance properties of detalizaciya the impact of prior laser treatment of steel to change the values of the surface hardness. The increase of the speed of movement of the laser beam dramatically reduces the surface hardness of the steel. XRD analysis of the investigated steel in the surface layer confirmed the presence of nitrides.

Keywords: combined treatment; laser treatment; nitriding; thickness of the hardened layer; surface microhardness

Введение

Применение ресурсосберегающих технологий для повышения эксплуатационного срока службы стальных деталей является наиболее перспективным решением увеличения долговечности деталей машин. Проблема отказа механизмов машин преимущественно связана с поверхностным разрушением, а именно с износом [1], ее можно решить с помощью разработки новых технологий поверхностного упрочнения деталей, легко поддающихся изнашиванию. Одним из актуальных направлений является создание деталей из недорогой основы с применением упрочняющей технологии поверхностного слоя. Существует целый ряд технологий, направленных на упрочнение поверхности детали, а именно: химико-термическая обработка, напыление, наплавка и т. д.

Большой интерес представляют комбинированные обработки, обеспечивающие повышение твердости и прочности поверхностного слоя [2]. Все существующие технологии можно разделить на следующие группы: нанесение покрытий; диффузионные покрытия; упрочнение поверхностного слоя за счет изменения структуры.

Распространенным видом упрочнения поверхности стали является азотирование, однако это довольно длительный и дорогостоящий процесс. В настоящее время большой интерес представляют технологии интенсификации процессов азотирования, обеспечивающие значительное сокращение времени насыщения сталей азотом.

Разработка новых ресурсосберегающих и экономически целесообразных технологий комбинированного упрочнения стальных деталей со

значительным сокращением длительности обработки является важной и актуальной задачей.

Анализ литературных данных

Анализ вопроса повышения срока службы деталей машин показывает, что достаточно эффективными способами поверхностного упрочнения сталей являются азотирование и лазерное упрочнение поверхности.

Лазерная обработка в сравнении с традиционными методами термической обработки материалов имеет целый ряд преимуществ [3]. При традиционной термической обработке необходим последующий отпуск, что снимает внутренние напряжения, однако наряду с этим снижает твердость обработанного слоя. При этом твердость составляет, как правило, 48–52 HRC. Лазерная же обработка не требует дополнительных операций отпуска. При этом твердость упрочненной лазерным лучом зоны поверхности составляет более 58–62 HRC [4]. Такая твердость закаленного слоя достигается за счет мартенситного превращения, оптимального сочетания насыщенности твердых растворов углеродом и легирующими элементами с их неоднородностью, повышения плотности дефектов кристаллического строения [5]. Наибольший интерес лазерной обработки стали для дальнейшего ускорения процесса азотирования представляет значительное измельчение зерна, что приводит к ускорению процессов диффузии азота вглубь металла.

Существует множество технологий азотирования, но наибольший интерес представляют инновационные технологии, обеспечивающие необходимую глубину диффузионного слоя за короткий промежуток времени процесса насыщения [6-10].

Известные комбинированные технологии лазерной обработки и азотирования, такие как "Способ низкотемпературного азотирования стальных деталей" (Патент RU 2415964), "Способ получения износостойких дискретных азотированных слоев" (Патент UA 25412), "Способ комбинированной лазерно-химико-термической обработки материалов" (Патент UA 19551) имеют ряд не решенных вопросов, а именно не обеспечивают достаточную глубину упрочненного слоя или поверхностную твердость, являются сложными в использовании, трудоемкими, энергозатратными, и длительными процессами (до 20 часов). Поэтому актуальным является создание инновационной технологии скоростного азотирования.

Цель работы

Целью данной работы является разработка скоростной технологии упрочнения деталей для обеспечения высоких эксплуатационных свойств поверхностного слоя стали.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- интенсифицировать процесс азотирования за счет предварительной лазерной обработки поверхности стальных изделий;
- изучить влияние предварительной лазерной обработки стали на изменение глубины упрочненного слоя;
- изучить влияние предварительной лазерной обработки стали на изменения значений поверхностной твердости.

Материал и методика исследования

Материалом для исследования является конструкционная легированная сталь 38Х2МЮА.

Лазерную обработку стали осуществляли на установке «ЛАТУС-31», согласно следующих режимов: мощность излучения - $1,0 \pm 0,1$ кВт, диаметр участка фокусировки луча - 5 мм, скорость перемещения лазерного луча - 0,5-1,5 м/мин.

Азотирование проводили в среде мелкодисперсного азотосодержащего вещества с активаторами при температуре 530–560 °С в течение 2–3 часов. Процесс азотирования проходил в закрытой атмосфере в виде герметичного контейнера в камерной печи без сложного специального оборудования, без применения защитных атмосфер.

Было исследовано влияние предварительной лазерной обработки и конечного азотирования на структуру, толщину, фазовый состав, микротвердость поверхностных слоев образцов стали 38Х2МЮА методами металлографического анализа с использованием металлографического микроскопа МИМ-7 с цифровой приставкой, ДРОН-3, ПМТ-3.

Обсуждение результатов

Поставленная задача интенсификации процесса азотирования решалась тем, что проводили предварительную лазерную обработку поверхности стальных изделий с мощностью лазерного излучения $1,0 \pm 0,1$ кВт, скоростью передвижения лазерного луча 0,5-1,5 м/мин и последующим азотированием при температуре 530–560 °С в течение 2–3 часов. При этом температура поверхностного слоя при лазерной обработке для стали должна превышать $A_{с3}$ (температуру конца превращения феррита в аустенит), но не быть выше температуры плавления. Процесс азотирования проводили в закрытой атмосфере в виде герметичного контейнера в камерной печи без сложного специального оборудования, без применения защитных атмосфер и без применения такого вредного для здоровья газа, как аммиака.

Установлено, что предварительная лазерная обработка не меняет геометрические размеры изделия и качество его поверхности.

Интенсификация процесса химико-термической обработки достигается увеличением дефектности кристаллического строения материала.

Анализ полученных результатов показал, что интенсификация процесса азотирования лазерной обработкой поверхности стали позволяет получить азотированный слой большей толщины (до 0,65 мм) и большей микротвердости (до 12,5 ГПа) по сравнению с чисто азотированными участками (без предварительной лазерной обработки), на которых толщина диффузионного слоя не превышала 0,2 мм, а микротвердость – 10,8 ГПа (рис. 1 и 2 соответственно). Это объясняется облегчением диффузии атомов азота и повышением его растворимости, вследствие образования более дефектной структуры металла после лазерного облучения (повышение плотности дислокаций, дробления зерен и увеличение протяженности их границ, получения ультрадисперсных разориентированных зерен).



Рис. 1 – Влияние предварительной лазерной обработки стали на толщину упрочненного слоя в сравнении с толщиной азотированного слоя, полученного после азотирования без лазерной обработки (первый столбец голубого цвета)

Установлено, что на формирование упрочненного слоя и поверхностную твердость оказывает значительное влияние скорость передвижения лазерного луча, что позволяет варьировать и контролировать получаемые выходные данные. Получены закономерности толщины упрочненного слоя в зависимости от изменения скорости передвижения лазерного луча для поверхностных слоев стали 38Х2МЮА, обработанных только лазером и комбинированной технологией упрочнения (обработка лазером и последующее азотирование). Увеличение скорости передвижения лазерного луча способствует уменьшения толщины упрочненного слоя (рис. 3). Из полученных зависимостей видно, что азотирование после лазерной обработки увеличивает толщину упрочненного слоя в

1,05–1,59 раза, что оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства детали.

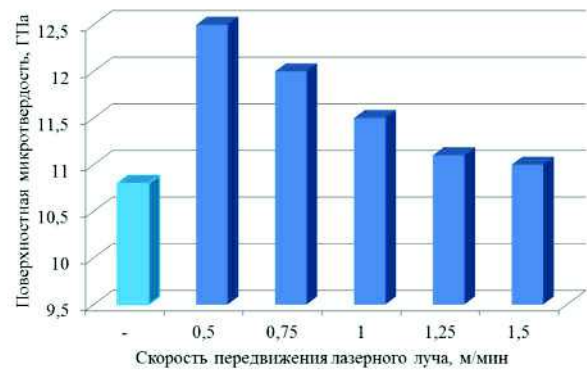


Рис. 2 – Влияние предварительной лазерной обработки на поверхностную микротвердость стали 38Х2МЮА в сравнении с поверхностной микротвердостью стали азотированной без лазерной обработки (первый столбец голубого цвета)

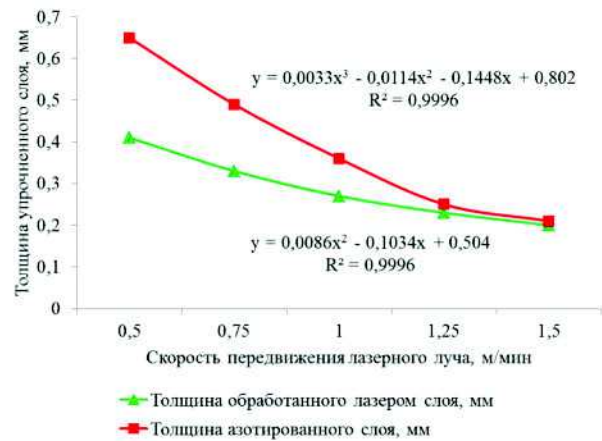


Рис. 3 – Закономерности изменения толщины упрочненного слоя в зависимости от скорости передвижения лазерного луча для поверхностных слоев стали 38Х2МЮА обработанных только лазером и комбинированной технологией упрочнения (обработка лазером и последующее азотирование)

Исследования поверхностной микротвердости показали, что она также, как и толщина упрочненного слоя, зависит от скорости передвижения лазерного луча. Из полученной зависимости (рис. 4) видно, что с увеличением скорости передвижения лазерного луча поверхностная микротвердость стали 38Х2МЮА резко снижается до значения скорости 1,25 м/мин, а затем меняется незначительно. Увеличение скорости передвижения лазерного луча от 0,5 до 1,5 м/мин понижает поверхностную микротвердость исследованной стали в 0,88 раза.

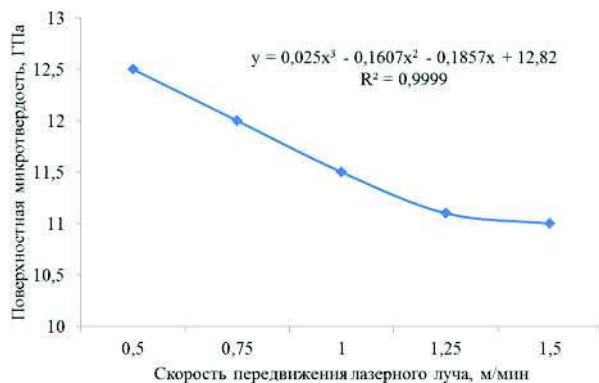


Рис. 4 – Закономерність змінення поверхнісної мікротвердості сталі 38Х2МЮА в залежності від швидкості переміщення лазерного луча

Рентгеноструктурний фазовий аналіз досліджуваної сталі в поверхнісному шарі виявив наявність нітридів ζ -Fe₂N, ϵ -Fe₃N-Fe₂N, γ' -Fe₄N, Fe₃N і α -Fe.

Висновки

1. Інтенсифікований процес азотування за рахунок попередньої лазерної обробки поверхні сталевих виробів.

2. Досліджено вплив попередньої лазерної обробки сталі на зміну глибини упрочненого шару. Отримано закономірності товщини упрочненого шару в залежності від зміни швидкості переміщення лазерного луча для поверхнісних шарів сталі 38Х2МЮА, оброблених тільки лазером і комбінованою технологією упрочнення.

3. Досліджено вплив попередньої лазерної обробки сталі на зміну значень поверхнісної твердості. Встановлено, що збільшення швидкості переміщення лазерного луча різко знижує поверхнісну твердість сталі.

Список літератури

- Hahn, D. W. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields / D. W. Hahn, N. Omenetto // *Applied spectroscopy*. – 2012. – V. 66. – №. 4. – P. 347-419. – doi: 10.1366/11-06574.
- Shimizu, M. Mechanism of heat-modification inside a glass after irradiation with high-repetition rate femtosecond laser pulses / M. Shimizu, M. Sakakura, M. Ohnishi, Y. Shimotsuma, T. Nakaya, K. Miura, K. Hirao // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – V. 108. – №. 7. – P. 073533. – doi: 10.1063/1.3483238.
- Lobankova, O. V. Influence of laser radiation on structure and properties of steel / O. V. Lobankova, I. Y. Zykov, A. G. Melnikov, S. B. Turanov // *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering: Proceedings of the*

international Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering, Incheon, South Korea, May 29-31, 2015. – CRC Press. – 2016. – 75 p.

- Kenar, H. Femtosecond laser treatment of 316L improves its surface nanoroughness and carbon content and promotes osseointegration: An in vitro evaluation / H. Kenar, E. Akman, E. Kacar, A. Demir, H. Park, H. Abdul-Khaliq, E. Karaoz // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. – 2013. – V. 108. – P. 305-312. – doi:10.1016/j.colsurfb.2013.02.039.
- Okamoto, K. Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation / K. Okamoto, M. Hashida, Y. Miyasaka, Y. Ikuta, S. Tokita, S. Sakabe // *Physical Review B*. – 2010. – V. 82. – №. 16. – P. 165417. – doi: 10.1103/PhysRevB.82.165417.
- Mahmoudi, B. Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd: YAG laser / B. Mahmoudi, M. J. Torkamany, A. S. R. Aghdam, J. Sabbaghzade // *Materials & Design*. – 2010. – V. 31. – №. 5. – P. 2553-2560. – doi:10.1016/j.matdes.2009.11.034.
- Yang, J. Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy / J. Yang, S. Sun, M. Brandt, W. Yan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – V. 210. – №. 15. – P. 2215-2222. – doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.08.007.
- Idan, A. F. I. The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels / A. F. I. Idan, O. Akimov, L. Golovko, O. Goncharuk, K. Kostyk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 69-73. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.65455.
- Assunção, E. Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry / E. Assunção, L. Quintino, R. Miranda // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – V. 49. – №. 1-4. – P. 123-131. – doi: 10.1007/s00170-009-2385-0.
- Mohanad, M. K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Domin, K. Kostyk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 45-49. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454.

Bibliography (transliterated)

- Hahn, D. W., & Omenetto, N. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields. *Applied spectroscopy*, 2012, 66(4), 347-419, doi: 10.1366/11-06574.
- Shimizu, M., Sakakura, M., Ohnishi, M., Shimotsuma, Y., Nakaya, T., Miura, K., & Hirao, K. Mechanism of heat-modification inside a glass after irradiation with high-repetition rate femtosecond laser pulses. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(7), 073533, doi: 10.1063/1.3483238.
- Lobankova, O. V., Zykov, I. Y., Melnikov, A. G., & Turanov, S. B. Influence of laser radiation on structure and properties of steel. In *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering: Proceedings of the international Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering, Incheon, South Korea, May 29-31, 2015*. CRC Press, 2016, 75 p.
- Kenar, H., Akman, E., Kacar, E., Demir, A., Park, H., Abdul-Khaliq, H., Karaoz, E. Femtosecond laser treatment of 316L improves its surface nanoroughness and carbon content and promotes osseointegration: An in vitro

- evaluation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, **108**, 305-312, doi:10.1016/j.colsurfb.2013.02.039.
5. **Okamuro, K., Hashida, M., Miyasaka, Y., Ikuta, Y., Tokita, S., & Sakabe, S.** Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation. *Physical Review B*, 2010, **82**(16), 165417, doi: 10.1103/PhysRevB.82.165417.
 6. **Mahmoudi, B., Torkamany, M. J., Aghdam, A. S. R., & Sabbaghzade, J.** Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd: YAG laser. *Materials & Design*, 2010, **31**(5), 2553-2560, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.034.
 7. **Yang, J., Sun, S., Brandt, M., & Yan, W.** Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**(15), 2215-2222, doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.08.007.
 8. **Idan, A. F. I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., & Kostyk, K.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**(5 (80)), 69-73, doi: 10.15587/1729-4061.2016.65455.
 9. **Assunção, E., Quintino, L., & Miranda, R.** Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, **49**(1-4), 123-131, doi: 10.1007/s00170-009-2385-0.
 10. **Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., & Kostyk, K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**(5 (80)), 45-49, doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454.

Сведения об авторах (About authors)

Идан Алаа Фадил И – аспирант, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Idan Alaa Fadhil I – PhD student, Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Акимов Олег Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Oleg Akimov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

Костик Екатерина Александровна – кандидат технических наук, доцент, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина, e-mail: ekklitus@yandex.ru.

Kateryna Kostyk – PhD of Technical Sciences, associate Professor, Department of Foundry, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: ekklitus@yandex.ru.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Идан, А. Ф. И. Инновационная технология скоростного азотирования стали / **А. Ф. И. Идан, О. В. Акимов, Е. А. Костик** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 49-53. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.08.

Please cite this article as:

Idan Alaa Fadhil I., Akimov, O., Kostyk, K. The innovative technology of high-speed nitriding steel. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 49–53, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.08.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Идан, А. Ф. И. Інноваційна технологія швидкісного азотування сталі / **А. Ф. І. Идан, О. В. Акімов, К. О. Костик** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 49-53. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.08.

АНОТАЦІЯ Метою даної роботи є розробка швидкісної технології зміцнення деталей для забезпечення високих експлуатаційних властивостей поверхневого шару сталі 38Х2МЮА. Інтенсифіковано процес азотування за рахунок попередньої лазерної обробки поверхні сталевих виробів. Вивчено вплив попередньої лазерної обробки сталі на зміну глибини зміцненого шару. Отримані закономірності зміни товщини зміцненого шару залежно від швидкості пересування лазерного променя для поверхневих шарів сталі 38Х2МЮА оброблених тільки лазером і комбінованою технологією зміцнення. Вивчено вплив попередньої лазерної обробки сталі на зміни значень поверхневої твердості. Встановлено, що збільшення швидкості пересування лазерного променя різко знижує поверхневу твердість сталі.

Ключові слова: комбінована обробка; лазерна обробка; азотування; товщина зміцненого шару; поверхнева мікротвердість.

Поступила (received) 02.12.2016