

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.4.027.4:669.14.018.294

Л. И. ВАКУЛЕНКО<sup>1</sup>, В. А. СОКИРКО<sup>2</sup>, Ю. Л. НАДЕЖДИН<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>ГП Приднепровская железная дорога, пр. Карла Маркса, 108, 49600, Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup>ОАО DS Со, ул. Большая Морская, 63, 34001, Николаев, Украина, эл. почта ds@mksat.net

<sup>3\*</sup>Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010 Днепропетровск, Украина, тел. +38(056) 373 15 56, эл. почта dnyzt\_texmat@ukr.net

### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА ОБОДА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Цель.** Целью работы является попытка оценить степень разупрочнения по поверхности катания металла железнодорожного колеса, используя электрическую импульсную обработку. **Методика.** Электрическую импульсную обработку (ЭО) осуществляли на специальной установке в условиях предприятия ОАО DS (г. Николаев). В качестве характеристики прочности металла использовалась твердость по Виккерсу. Исследование микроструктуры осуществляли с использованием светового микроскопа. Материалом для исследования служила углеродистая сталь фрагмента обода железнодорожного колеса № 181732, изъятая после эксплуатации, с 0,55 %С, 0,74 %Mn, 0,33 %Si, 0,009 %P, 0,01 %S, 0,06 %Ni, 0,1 %Cr, 0,08 %Cu. **Результаты.** Подвергая фрагмент обода воздействию электроимпульсной обработки (ЭО), экспериментально наблюдаемому изменению геометрических размеров образца в зависимости от числа циклов, соответствовали качественные изменения внутреннего строения металла обода колеса. В результате указанной обработки наблюдалось снижение уровня твердости холодно деформированного металла. Для области I обода по поверхности катания обнаружено разупрочнение на 20, для II на 8 и для III на 11 % относительно исходного состояния. **Научная новизна.** В результате электроимпульсной обработки наблюдается изменение геометрических размеров образца. В зависимости от числа циклов это обуславливает эффект разупрочнения. Доказано, что наблюдаемая величина разупрочнения при ЭО качественно связана со степенью холодной пластической деформации по поверхности катания железнодорожного колеса. **Практическая значимость.** В результате наклепа металла по поверхности катания колеса снижается его сопротивление зарождению повреждений. Полученные данные могут быть полезны при разработке мероприятий, направленных на повышение эксплуатационной безопасности железнодорожного транспорта. Разработка технологий по снижению охрупчивающего влияния деформационного упрочнения является важным научным направлением в дальнейших исследованиях.

*Ключевые слова:* сталь; железнодорожное колесо; твердость; электрическая импульсная обработка

#### Введение

Увеличение нагрузки на ось колесной пары требует использования железнодорожных колес с повышенным комплексом свойств. Кроме прочностных свойств, достаточно высокого значения приобретают характеристики сопро-

тивления металла зарождению повреждений на поверхности катания [1]. Повышения указанных характеристик возможно за счет использования нескольких, качественно различных технологических решений. Введение легирующих элементов при выплавке стали позволяет менять, в определенном диапазоне прочностные и пластические свойства [7]. С другой стороны,

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

использование термических или термомеханических обработок приводит так же к изменению свойств металла. Однако, при термоупрочнении можно в значительно более широком диапазоне изменять комплекс свойств металла [2]. На основании этого, использование не значительных добавок легирующих элементов к составу углеродистых сталей железнодорожных колес, с последующей их упрочняющей термической обработкой, является одним из технологически оправданных решений [5].

В результате наклепа металла по поверхности катания колеса снижается его сопротивление зарождению повреждений. Разработка технологий по снижению охрупчивающего влияния деформационного упрочнения является важным научным направлением.

#### Цель работы

Целью работы является попытка оценить степень разупрочнения по поверхности катания металла железнодорожного колеса используя электрическую импульсную обработку.

#### Материал для исследования

Материалом для исследования служила углеродистая сталь фрагмента обода железнодорожного колеса № 181732, изъятого после эксплуатации, с 0,55 %C, 0,74 %Mn, 0,33 %Si, 0,009 %P, 0,01 %S, 0,06 % Ni, 0,1, 0 %Cr, 0,08 %Cu.

#### Методы исследования

Электрическую импульсную обработку (ЭО) осуществляли на специальной установке в условиях предприятия ОАО ДС (г. Николаев). В качестве характеристики прочности металла использовалась твердость по Виккерсу. Исследование микроструктуры осуществляли с использованием светового микроскопа.

#### Результаты исследования

Технология термического упрочнения железнодорожных колес предусматривает формирование структуры металла в два этапа. Структурное состояние углеродистой стали, связанное с механизмом превращения, в действительности определяется скоростью охлаждения

металла. Так слои металла, которые располагаются вблизи с поверхностью принудительного охлаждения, для которых скорость охлаждения по своему значению приближается к критической величине, представляют собой кристаллы подобные бейнитным, с мелкими карбидными частицами (рис. 1).



Рис. 1. Структура стали после ускоренного охлаждения до температуры 450°С.

Увеличение 18000

Увеличение расстояния (от поверхности охлаждения) приводит к достижению условий выделения структурно свободного феррита, в виде вытянутых образований по форме напоминающей игольчатые кристаллы (рис. 2). Металл, который соответствует объемам вблизи с серединой обода колеса, представляет собой перлитные колонии, с выделением по границам зерен структурно свободного феррита. После достижения определенной температуры на поверхности обода, когда принудительное охлаждение прекращается, охлажденные участки начинают ускоренно нагреваться за счет тепла более разогретых внутренних объемов металла. На основании этого, ускорение процессов диффузии сопровождается изменениями структуры обода колеса, что приводит к снижению величины перепада прочностных и пластических свойств в объемах металла, превращенного по различным механизмам. При качении колеса по рельсу приповерхностные объемы металла обода подвергаются наклепу. Накопление дефектов кристаллического строения, пропорционально степени пластической деформации, имеет определенную неравномерность распределения [4]. Обусловлено указанное явление не только градиентом деформации в зависимости

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

от расстояния объема металла от поверхности качения, но и его структурным состоянием, которое изменяется в зависимости от износа колеса. Таким образом, в процессе эксплуатации внутренне строение стали железнодорожного колеса претерпевает достаточно значительные изменения. Накопление дефектов кристаллического строения сопровождается снижением запаса пластических свойств, что способствует росту вероятности формирования поврежденной поверхности металла колеса. На основании этого, разработка технологий разупрочнения холоднодеформированного металла может являться направлением, позволяющим повысить ресурс безаварийного использования железнодорожного колеса. При нагреве холоднодеформированного металла, когда пропорционально температуре наблюдается ускорение процессов диффузионного массопереноса, обнаруживаемое снижение концентрации накопленных дефектов кристаллического строения приводит к росту пластических свойств и трещиностойкости, с одновременным снижением прочности [2,8]. Кроме термических способов разупрочнения, достаточного распространения получили обработки, основанные на использовании иных воздействий, таких как обработка магнитным полем [3], пропусканием через металл импульсов электрического тока [6].



Рис. 2. Структура углеродистой стали с 0,6 % C после ускоренного охлаждения до 575 °C. Увеличение 800

На рис. 3 представлена типичная структура исследуемой стали по сечению обода после эксплуатации. Отсутствие признаков термического упрочнения металла обусловлено износом и последующими обточками колеса при восстановлении профиля катания. Представленная

структура в действительности приближается к горячекатаному состоянию металла, так как соответствует приблизительно середине обода колеса до эксплуатации. Анализ микроструктуры подтверждает не только высокую степень деформации, но и достаточно неоднородное ее распределение. Прежде всего необходимо отметить, что в зависимости от участка на поверхности катания (вблизи с гребнем, обозначим I, в области максимального проката - II и около боковой поверхности с внешней стороны колеса - III), величина наклепа металла может меняться в довольно широком интервале значений. Указанное положение подтверждается изменением твердости металла колеса в зависимости от исследуемого участка. Так, абсолютные значения твердости меняются от 700 до 770 для областей I и III и от 550 до 600 Нвд для II. Уровень твердости в области II может быть объяснен повышенным разогревом обода на этапах торможения подвижного состава. Действительно, если полагать, что области II соответствует максимальный прокат, следовательно, и степень пластической деформации должна быть выше по сравнению с другими участками обода. Однако, как следует из [2, 4], чем выше величина наклепа металла при пластической деформации, тем более высокого развития получают процессы разупрочнения при нагреве. Вследствие этого наблюдаются минимальные значения твердости в области II металла по поверхности катания колеса в состоянии до Э. О. Подвергая фрагмент обода воздействию электроимпульсной обработки, экспериментально наблюдали изменение геометрических размеров образца в зависимости от числа циклов (рис.4). Следовательно, подвергая холоднодеформированный металл, хотя и частично отпущенный, микропластическим деформациям за счет ЭО, которые не совпадают с распределением деформации на поверхности катания колеса, следует ожидать развития процессов разупрочнения. Действительно, после ЭО было обнаружено снижение уровня твердости металла для области I на 20%; для II на 8% и для III на 11% относительно исходного состояния.

Исследованиями микроструктуры были обнаружены качественные изменения внутреннего строения металла обода колеса после ЭО. На рис. 5а представлена наиболее типичная структура ста-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ли колеса по поверхні катання. Значительная степень пластической деформации по поверхности катания обуславливает высокую турбулентность структурных составляющих.

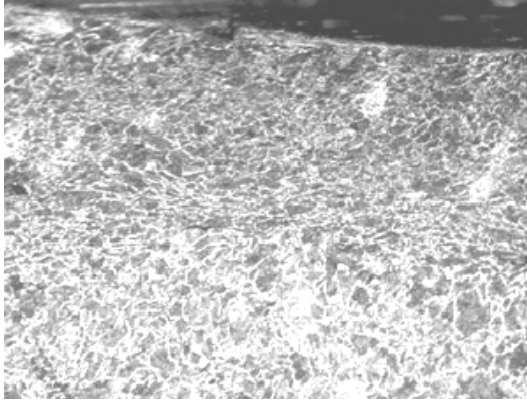


Рис. 3. Градиент структуры металла по сечению обода колеса в зависимости от расстояния от поверхности катания. Увеличение 100

Указанное положение достаточно убедительно подтверждается наблюдаемым градиентом структуры в слое металла, непосредственно прилегающего к поверхности катания (верхняя часть структуры на рис.3). С другой стороны, анализ формы структурных составляющих ука-

зывает на явное влияние температурных воздействий. Об этом свидетельствуют достаточно протяженные участки структурно свободного феррита (рис. 5б). После электрической импульсной обработки, в структуре стали обнаруживаются свидетельства, которые подобны наблюдаемым при развитии процессов разупрочнения холоднодеформированного металла (рис.6). Так, по сравнению со структурным состоянием металла колеса после эксплуатации, ЭО приводит к формированию объемов с несколько иным распределением зерен структурно свободного феррита (рис. 6а).

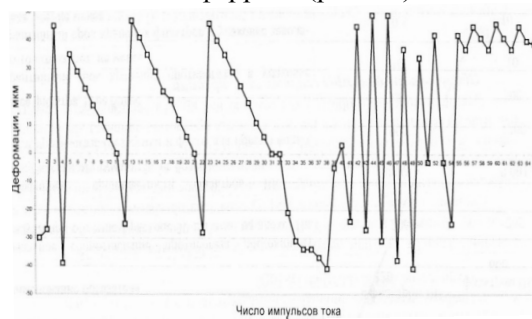


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая изменение деформации образца (мкм) в зависимости от количества импульсов ЭО

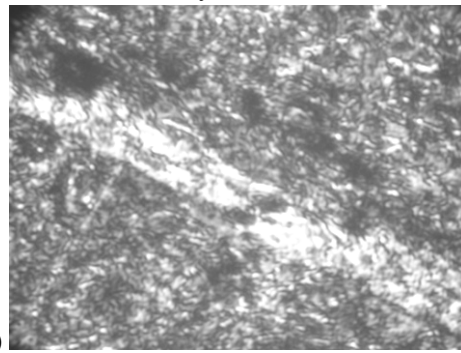
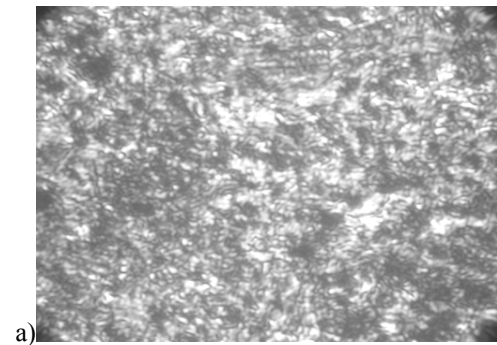


Рис. 5. Структура стали обода колеса до ЭО. Увеличение 250

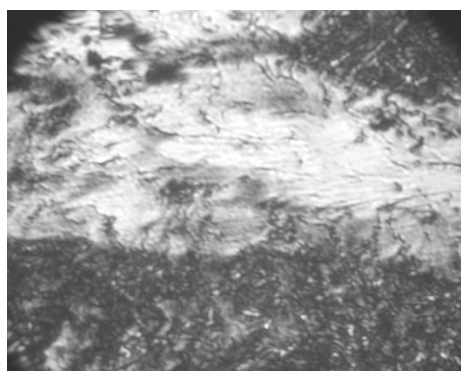
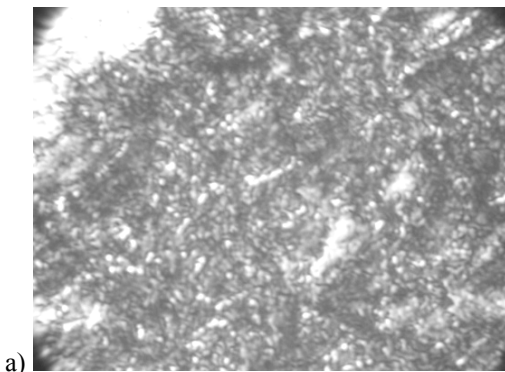


Рис. 6. Структура стали обода колеса после ЭО. Увеличение 250

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Кроме этого, наблюдаются более протяженные участки ферритной фазы (рис.6б), по сравнению с аналогичными для состояния металла до ЭО (рис. 5, б).

Обнаруженный эффект разупрочнения металла обода по поверхности катания в результате ЭО, может быть обусловленный перемещениями дефектов кристаллического строения, которые были введены в металл при эксплуатации железнодорожного колеса. Представленное объяснение наблюдаемого явления требует проведения дополнительных исследований по оценке величины эффекта разупрочнения в зависимости от структурного состояния металла железнодорожного колеса.

## Выводы

1. В результате электроимпульсной обработки изменение геометрических размеров образца в зависимости от числа циклов обуславливает эффект разупрочнения.

2. Наблюдаемая величина разупрочнения при ЭО качественно связана со степенью холодной пластической деформации по поверхности катания железнодорожного колеса.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрейко, І. М. Дослідження пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс / І. М. Ан-

дрейко, В. В Кулик, В. І. Прокопеч // Машинознавство. – 2011. – № 2. – С. 30–33.

2. Бабич, В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
3. Бернштейн, М. Л. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле / М. Л. Бернштейн, В. Н. Пустовойт. – М. : Машиностроение, 1987. – 256 с.
4. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д. : Маковецкий, 2008. – 196 с.
5. Иванов, С. Г. Основные направления по повышению надежности и увеличению ресурса цельнокатаных колес / С. Г. Иванов // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути. Колесо–рельс 2003 : тез. докл. науч.-практ. конф. (20 нояб.–21 нояб. 2003 г.). – М. : Интекст, 2003. – С. 124–127.
6. Царюк, А. К. Изменение механических свойств сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей под влиянием электромагнитных воздействий / А. К. Царюк, В. Ю. Скульский, С. И. Моравский, В. А. Сокирко // Автоматическая сварка. – 2008. – № 9. – С. 28–32.
7. Bhadeshia, H. K. D. Bainite in Steels / H. K. D. Bhadeshia. – Cambridge : Cambridge University Press, 2001. – 454 p.
8. Vakulenko, I. A. Effect of the Fraction of a Thermally Hardened Layer on the Strength of Low – Carbon Rolled Products / I. A. Vakulenko, V. G. Razdobreev // Russian Metallurgy (Metally). – 2006. – № 2. – P.172–175.

Л. І. ВАКУЛЕНКО<sup>1</sup>, В. А. СОКІРКО<sup>2</sup>, Ю. Л. НАДЕЖДІН<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> ДП Придніпровська залізниця, пр. Карла Маркса, 108, 49600, Дніпропетровськ, Україна

<sup>2</sup> ВАТ DS Со, вул. Велика Морська, 63, 34001, Миколаїв, Україна, ел. пошта ds@mksat.net

<sup>3\*</sup> Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnyzt\_texmat@ukr.net.

## ЕЛЕКТРИЧНА ІМПУЛЬСНА ОБРОБКА МЕТАЛУ ОБОДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО КОЛЕСА ПІСЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

**Мета.** Метою роботи є спроба оцінити ступінь знеміцнення по поверхні кочення металу залізничного колеса використовуючи електричну імпульсну обробку. **Методи.** Електричну імпульсну обробку (ЕО) здійснювали на спеціальному устаткуванні, в умовах підприємства ВАТ DS (м. Миколаїв). В якості характеристики міцності металу використовували твердість за Віккерсом. Дослідження мікроструктури здійснювали з використанням світлового мікроскопу. Матеріалом для дослідження була вуглецева сталь фрагмента ободу залізничного колеса №181732, яке було вилучене з експлуатації, з 0,55%С, 0,74%Mn, 0,33%Si, 0,009%Р, 0,01%S, 0,06% Ni, 0,1%Cr, 0,08%Cu. **Результати.** Піддаючи фрагмент ободу впливу електричної імпульсної обробки (ЕО), експериментально спостерігали зміну геометричних розмірів зразка залежно від числа циклів.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Зміні розмірів відповідали якісні зміни внутрішньої будови металу ободу колеса. В результаті наведеної обробки спостерігали зниження рівня твердості холодно деформованого металу. Для області I ободу по поверхні кочення виявлене зменшення на 20, для II на 8 і для III на 11% відносно початкового стану. **Наукова новизна.** В результаті електричної імпульсної обробки спостерігається зміна геометричних розмірів зразку. Залежно від числа циклів, це обумовлює ефект зменшення. Доведено, що спостережувана величина зменшення при ЕО якісно пов'язана зі ступенем холодної пластичної деформації по поверхні катання залізничного колеса. **Практична значимість.** В результаті наклепу металу по поверхні кочення колеса знижується його опір зародженню пошкоджень. Отримані дані можуть бути корисні при розробці заходів, спрямованих на підвищення експлуатаційної безпеки залізничного транспорту. Розробка технологій по зниженню окрихучого впливу деформаційного зміцнення є важливим науковим напрямом в подальших дослідженнях.

*Ключові слова:* сталь; залізничне колесо; твердість; електрична імпульсна обробка

L. I. VAKULENKO<sup>1</sup>, V. A. SOKYRKO<sup>2</sup>, Y. L. NADEZHIN<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Pridneprovsk Railway, Karl Marx Av., 108, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine

<sup>2</sup>JSC DS Co., Bolshaya Morskaya Str., 63, 34001, Nikolayev, Ukraine, e-mail ds@mksat.net

<sup>3\*</sup>Department «Technology of Materials» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after

Academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnyzt\_textmat@ukr.net.

## ELECTRIC PULSE TREATMENT OF RIM WHEEL METAL AFTER OPERATION

**Introduction.** Load increase on the wheel pair ax requires the use of railway wheels with the advanced complex of properties. Except strength properties, the properties of metal resistance to defect nucleation on the wheel thread are of high importance. The above mentioned properties increase is possible by using different technological decisions: alloying and heat strengthening. **Purpose.** The purpose is an attempt to estimate the softening degree of the wheel thread metal using the electric pulse treatment. **Methodology.** Electric pulse treatment (ET) was carried out on the special plant in the conditions of JSC DS (Nikolayev city). As the property of metal strength the Vickers hardness number is used. The microstructure research was carried out using the light microscope. The material for research is the carbon steel of the rim fragment of railway wheel №181732, withdrawn after operation, containing 0,55%C, 0,74%Mn, 0,33%Si, 0,009%P, 0,01%S, 0,06% Ni, 0,1%Cr, 0,08%Cu. **Findings.** Exposing the rim fragment to electric pulse treatment (ET), the qualitative changes of internal structure of the wheel rim metal corresponded to the experimentally observed geometrical dimensions change of the specimen, depending on the cycles number. As a result of the treatment the reduction of cold strained metal hardness is observed. It was found out 20 % softening on the wheel thread for the I rim area the, for the II rim area the 8% softening and for the III 11% softening in relation to the initial state. **Originality.** As a result of electric pulse treatment, the change of the specimen geometrical dimensions is observed. Depending on the number of cycles it causes softening effect. It is proved that the observed softening value during ET is qualitatively connected with the cold strain level on the rail wheel thread. **Practical value.** As a result of metal cold work on the wheel thread its resistance to the defect nucleation is being reduced. The resulted data can be used during elaboration of measures to increase the operational safety of railway transport The technology development of the strain hardening embrittling influence reduce is an important scientific direction in further researches

*Keywords:* steel; rail wheel; hardness; electric pulse treatment

### REFERENCES

1. Andreiko I.M. Kulyk V.V., Prokopets V.I. Doslidzhennia poskodzhuvanosti poverkhni kochennia zaliznychnykh kolis [Research of the wheel thread damageability]. *Mashynoznavstvo – engineering Science*, 2011, no. 2, pp. 30-33.
2. Babich V.K., Gul Yu. P., Dolzhenkov I.Ye. *Deformatsionnoe starenie stali* [Strain ageing of the steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 320 p.
3. Bernshteyn M.L., Pustovoyt V.N. *Termicheskaya obrabotka stalnykh izdeliy v magnitnom pole* [Heat treatment of the steel articles in the magnetic field]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1987. 256 p.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

4. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoe uprochnenie stali* [Structure morphology and strain hardening steel]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
5. Ivanov S.G. Osnovnye napravleniya po povysheniyu nadezhnosti i uvelicheniyu resursa tselnokatanykh koles [The basic directions of the reliability enhancement and life extension of the all-rolled wheels]. *Tezisy dokladov nauchno–prakticheskoy konferentsii “Sovremennye problemy vzaimodeystviya podvizhnogo sostava i puti. Koleso – rels 2003”* [Abstracts of Papers of Scientific and Practical Conf. “Modern problems of the rolling stock and track interaction. Wheel–rail 2003”]. Moscow, 2003, pp. 124-127.
6. Tsaryuk A.K., Skulskiy V.Yu., Moravskiy S.I., Sokirko V.A. Izmeneniye mekhanicheskikh svoystv svarnykh soyedineniy uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley pod vliyaniem elektromagnitnykh vozdeystviy [Weld joints property change of the carbon and low-alloyed steels under the influence of electromagnetic effect]. *Avtomaticheskaya svarka –Automatic Welding*, 2008, no. 9, pp. 28-32.
7. Bhadeshia H.K.D. Bainite in Steels. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 2001. 454 p.
8. Vakulenko I.A., Razdobreev V.G. Effect of the Fraction of a Thermally Hardened Layer on the Strength of Low – Carbon Rolled Products. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2006, no. 2, pp. 172-175.

*Статья рекомендована к публикации к.т.н., доц. Л. И. Котовой (Украина); к.т.н., доц. О. А. Чайковским (Украина)*

Поступила в редколлегию 05.12.2012

Принята к печати 25.02.2013