

3. Koistinen D.P. A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels / D.P. Koistinen, R.E. Marburger // Acta Metallurgica. – 1959. – V. 7, № 1. – P. 59-60.
4. Malinov L.S. More abrasive wear resistance and hardened steels 18KhGT 12KhNZA by obtaining metastable austenite / L.S. Malinov, E.L. Malinova, E.Ya. Harlanova // Metals. – 1993. – N. 2. – P. 108-111. (Rus.)
5. Geller A.L. Retained austenite and wear resistance of carburized alloy steels / A.L. Geller, V.N. Yurko // News of Universities. Iron and steel. – 1991. – N. 6. – P. 66-69. (Rus.)
6. Popov V.S. Structural changes in the unstable austenitic steels for abrasive wear / V.S. Popov, V.N. Brykov // Mitom. – 1971. – N. 9. – P. 54-55. (Rus.)
7. Cheiliakh A.P. Economically metastable alloys and strengthening technologies / A.P. Cheiliakh. – Mariupol : publishing house PSTU. – 2009. – 483 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 25.10.2012

УДК 621.771.294.64:621.785.55

©Вакуленко І.О.¹, Пройдак С.В.², Надеждин Ю.Л.³

ОЦІНКА СТУПЕНЯ ЗНИЖЕННЯ ТВЕРДОСТІ ХОЛОДНО ДЕФОРМОВАНОЇ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ

*Вакуленко І.О., Пройдак С.В., Надеждин Ю.Л. Оцінка ступеня зниження твердості холодно деформованої вуглецевої сталі після електричної імпульсної обробки. Розглянуті питання оцінки ступеня зниження твердості вуглецевої сталі залізничного колеса після електричної імпульсної обробки. Показано, що в результаті електричної імпульсної обробки холодно деформованої вуглецевої сталі ефект пом'якшення обумовлений змінами параметрів тонкої кристалічної будови.
Ключові слова: сталь, залізничне колесо, твердість, електрична імпульсна обробка, дислокація.*

*Вакуленко И.А., Пройдак С.В., Надеждин Ю.Л. Оценка степени разупрочнения холодно деформированной углеродистой стали после электроимпульсной обработки. Рассмотрены вопросы оценки степени снижения твердости углеродистой стали железнодорожного колеса после электрической импульсной обработки. Показано, что в результате электрической импульсной обработки холоднодеформированной углеродистой стали, эффект разупрочнения обусловлен изменениями параметров тонкокристаллического строения.
Ключевые слова: сталь, железнодорожное колесо, твердость, электрическая импульсная обработка, дислокация.*

I.O. Vakulenko, S.V. Proiydak, Y.L. Nadegdin. The estimating of hardness decreasing degree in cold worked carbon steel after electrical impulse treatment. The questions of estimating of hardness decreasing degree in carbon steel rail wheel after electrical impulse treatment are observed. It is shown that the effect of hardness decreasing of cold

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна», м. Дніпропетровськ

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна», м. Дніпропетровськ

³ інженер, ДВНЗ «Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна», м. Дніпропетровськ

worked carbon steel after electrical impulse treatment is resulted by changing of sub structural crystalline parameters of metal.

Keywords: *steel, rail wheel, hardness, electrical impulse treatment, dislocation.*

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Зростання навантаження на вісь колісної пари обумовлює використання залізничних коліс з підвищеним опором процесам зношування. Окрім легування, суттєвого збільшення характеристик міцності досягають використанням термічних та термомеханічних обробок. На підставі цього, питання визначення оптимального структурного стану металу коліс набуває особливої актуальності [1]. Враховуючи відносно значний перетин ободу залізничного колеса, різну швидкість охолодження в залежності від відстані розташування прошарків металу від поверхні тепловідводу, неодмінно буде мати місце відбиток на зміні структурного стану та рівня внутрішніх напружень металу по товщині. З метою зниження рівня залишкових внутрішніх напружень, залізничні колеса після термічного зміцнення піддають відпуску в середньому інтервалі температур. Окрім термічних способів пом'якшення зміцненого металу, визначеного розповсюдження набули обробки, що засновані на використанні магнітного поля, або пропускання електричного струму (без нагріву металу) [2]. Такі обробки можуть бути використані і для зниження наклепу металу колеса після експлуатації.

Мета роботи. Оцінка можливості використання електричної імпульсної обробки (ЕІО), як різновиду атермічної обробки, для зниження міцності металу залізничного колеса після експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Матеріалом для дослідження була сталь марки 60 із фрагменту ободу залізничного колеса, вилученого з експлуатації, з хімічним складом: 0,61 % С; 0,78 % Mn; 0,30 % Si; 0,027 % P; 0,027 % S; 0,14 % Cr; 0,09 % Ni; 0,005 % Al; 0,15 % Cu. За технологією виготовлення в умовах ВАТ «Ітерпайп» НТЗ залізничні колеса піддають термічному зміцненню за схемою переривчастого прискореного охолодження. Електричну імпульсну обробку металу проводили на спеціальному устаткуванні в умовах підприємства ВАТ DS (м. Миколаїв). В якості характеристики міцності металу була використана твердість за Вікерсом. Дослідження мікроструктури проводили за допомогою світлової та трансмісійної мікроскопії, а параметри тонкої кристалічної будови металу визначали за методиками рентгенівського структурного аналізу.

Виникнення градієнту температури від поверхні інтенсивного тепловідводу супроводжується зміною структурного стану металу ободу залізничного колеса. В залежності від ступеня наближення до критичного значення швидкості охолодження, морфологія та дисперсність структурних складових вуглецевої сталі змінюється в широкому діапазоні. Враховуючи високі швидкості примусового охолодження, структура поблизу поверхні ободу (у більшості випадків) представляє собою рейковий вигляд, з виділенням на границях або в середині кристалів бейніту (в залежності від формування кристалів в верхній або нижній температурній області) дрібнодисперсних часток цементиту (рис. 1). Густина дислокацій при цьому може досягати рівнів до 10^9 см⁻². Для більш заглиблених об'ємів металу, коли швидкості охолодження стає вже недостатньою, досягаються умови початку розвитку структурних перетворень за дифузійним механізмом.

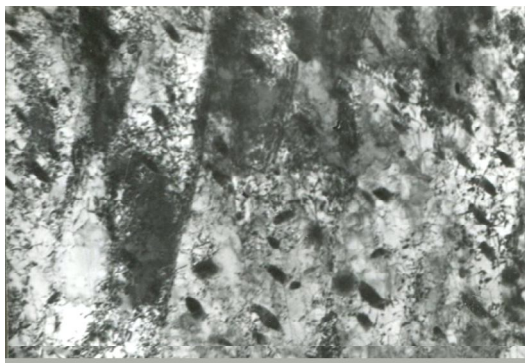


Рис. 1 – Структура сталі після прискореного охолодження до температури 400 °С. Збільшення 18000

В процесі експлуатації залізничного колеса (особливо з високим рівнем міцності), прошарки металу поблизу поверхні кочення достатньо інтенсивно насичуються дефектами кристалічної будови, які, в свою чергу, обумовлюють формування зародків ушкоджень після вичерпання ресурсу накопичення дефектів [3]. В наслідок цього (виникнення ушкоджень на поверхні кочення) або зміни профілю ободу вище нормативних обмежень, виникає необхідність застосування технологічної операції – відновлення профілю ободу

обточуванням на металорізальних верстатах. Вже після першої операції обточування значна доля термічно зміцненого шару металу по поверхні кочення знімається і подальше використання колеса суттєво не відрізняється від умов експлуатації колеса середнього рівня міцності (типу КП-2). Таким чином, використання технологій, що забезпечують своєчасне зниження рівня накопичених дефектів кристалічної будови в металі, можуть розглядатися як засоби підвищення ресурсу та безпеки експлуатації залізничних коліс.

Враховуючи, що характер зміцнення металу в процесі пластичної деформації в значній ступені залежить від його структурного стану, структури з якісно різною морфологією другої фази мають не тільки різний темп накопичення дефектів кристалічної будови, але і різне їх розташування [3, 4]. Так, цементит пластинкової форми, коли він є структурно зв'язаний с феритом, спроможний витримувати значні пластичні деформації без руйнування. На підставі цього, диспергування перлітних колоній супроводжується підвищенням міцності і тріщиностійкості металу. В процесі накопичення дислокацій визначається дуже важливий момент, який відповідає початку розпаду рівномірного розподілу дислокацій на періодичні структури (рис. 2). Справа в тому, що при формуванні негетерогенного розподілу дислокацій об'єми матриці з підвищеною їх густиною стають перешкодою для подальшого розповсюдження дислокацій. По мірі збільшення ступеня деформації швидкість зростання кількості дислокацій в субграницях значно перебільшує аналогічну характеристику в середині чарунок, субграниці стають більш тонкими, а чарунки – дрібними та практично чистими в середині від дислокацій. Враховуючи, що більша частина загальної кількості дислокацій зосереджена в субграницях, після досягнення максимально допустимої густини дислокацій в металі вони перетворюються в осередки субмікротріщин.

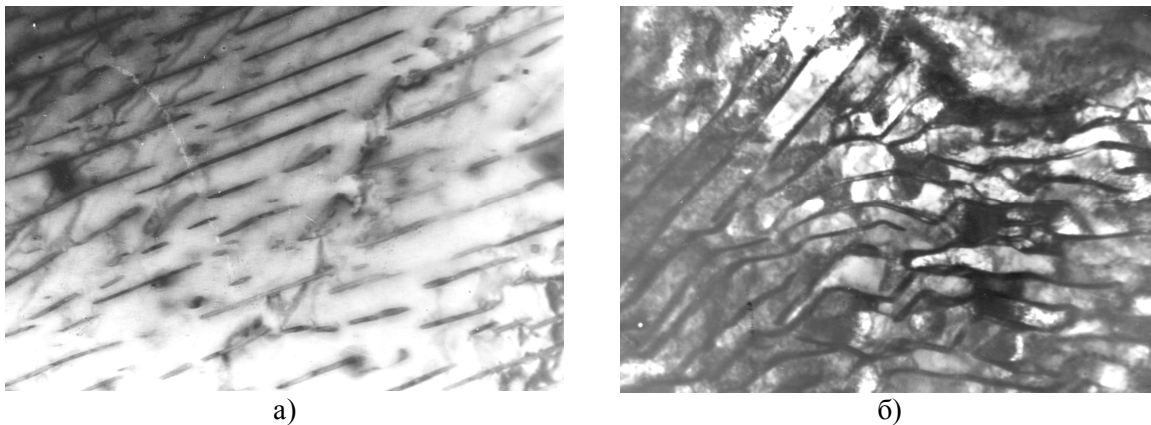


Рис. 2 – Структура перлітної колонії вуглецевої сталі після пластичної деформації 2 % (а) і 20 % (б). Збільшення 30000 – а; 20000 – б

Таким чином, можна вважати, що чим скоріше при деформації в перлітних колоніях почнуть формуватися негетерогенності в рівномірному розташуванні дислокацій, тим швидше будуть сформовані осередки руйнування металу.

Якісно інша картина спостерігається при пластичній деформації вуглецевої сталі з глобулярним цементитом. Наведені структури формуються в при поверхневих шарах металу ободу колеса під час операції термічного зміцнення (прискорене охолодження зі швидкістю поблизу з критичним значенням та подальший самовідпуск, рис. 1). Дислокації, що рухаються під час пластичної деформації металу з глобулярним цементитом, дуже швидко перетворюються в нерухомі. Наведене явище обумовлене блокуючим ефектом від часток цементиту, які розташовуються в площині ковзання дислокації. Виникає субструктурне угруповання, за зовнішнім виглядом подібне дислокаційним чарункам. Чим більш дисперсні частки глобулярного цементиту, тим скоріше досягається межа максимально допустимої концентрації дислокацій, після якої починається процес руйнування металу.

З урахуванням неоднорідного розподілу наклепу металу по поверхні кочення залізничного колеса та дуже дисперсної структури в цілому, фрагмент ободу був умовно розділений на

три частини: I – поблизу з гребенем, II – в середині поверхні кочення і III – поблизу з боковою поверхнею колеса. Вимірювання твердості металу ободу для областей I, II і III в стані після експлуатації колеса (наклеп холодною деформацією) склали відповідні значення в інтервалі 5500-7000 МПа. Після обробки металу ободу електричними імпульсами за визначеною схемою, спостерігали зниження твердості на 11, 12 та 17 % для ділянок I, II та III відповідно. Величина зниження густини дислокацій, при оцінці по дифракційній лінії (211), для визначених ділянок коливалася в інтервалі 22-43 %. Враховуючи відносно низькі температури нагріву (не вище температури навколишнього середовища), рівень ефекту пом'якшення металу не можливо пояснити впливом від розвитку процесів дифузійного масопереносу. З іншого боку, при високих значеннях густини дислокацій (ρ), що накопичені в кристалографічних системах ковзання (для

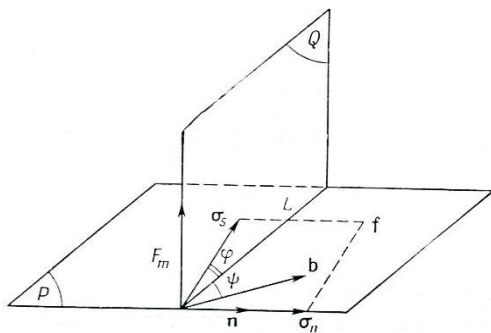


Рис. 3 – Схема переміщення випадкової дислокації з своєї площини ковзання (L – лінія дислокації, P – площина ковзання, ψ – кут між L та вектором Бюргера b) [5]

може бути оцінена залежністю:

$$F_m = \frac{W_1}{b^2} \sin\psi, \quad (1)$$

де W_1 – енергія формування атомарного дефекту,
 b – вектор Бюргера.

При наближенні ψ до нуля вплив крайової компоненти дислокації стає необмежено малим і $F_m \rightarrow 0$. Інша сила, що виникає між двома дислокаціями (або їх фрагментами), які розташовані в паралельних площинах, буде дорівнювати [6]:

$$F_1 = \frac{\mu b^2}{2\pi kh}, \quad (2)$$

де μ – модуль зсуву,
 k – приймає значення від 1 до $(1-\nu)$,
 ν – коефіцієнт Пуассона,
 h – відстань між площинами ковзання.

Умови переповзання дислокації з однієї площини в іншу будуть досягнуті, коли $F_m = F_1$.

Враховуючи, що для формування вакансії $W_1 = \frac{\mu b^3}{5}$, після проведення перетворень отримаємо співвідношення для оцінки кута ψ :

$$\sin\psi = \frac{5b}{2\pi kh}, \quad (3)$$

Приймаючи k рівним 0,8 (як середнє значення інтервалу), співвідношення (3) може бути

лінії (211) ρ складала значення $3,6 \dots 4,0 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), одним із можливих пояснень розвитку процесів пом'якшення можуть бути неконсервативні переміщення дислокацій. На рис. 3 схематично представлений приклад переміщення дислокації в перпендикулярному напрямку відносно своєї системи ковзання. В залежності від особливостей переміщення лінії дислокації в площині Q (рис. 3) повинен формуватися прошарок з вакансій або атомів. Кількість дефектів в площині Q , що формуються при переміщенні дислокації, буде визначатися кутом ψ . Таким чином, можна вважати, що при зменшенні кута ψ повинно бути полегшення процесу неконсервативного переміщення дислокації. Наведена тенденція може бути пояснена формуванням прошарку з вакансій або дислокованих атомів лише завдяки крайовій компоненти дислокації, яка пропорційна ψ [5]. На підставі цього сила, що діє на одиницю довжини дислокації при переповзання,

спрощеним до вигляду:

$$\sin\psi \approx \frac{b}{h}, \quad (4)$$

Оцінюючи h по залежності від густини дислокацій [4]: $\rho = h^{-2}$, вираження (4) може бути переписане як:

$$\sin\psi = b\sqrt{\rho}, \quad (5)$$

Після підстановки в (5) $b = 2,48 \cdot 10^{-8}$ см [7] та експериментальних значень густини дислокацій у відповідності до досліджуваних ділянок (I, II, III) ободу колеса визначили, що в результаті ЕЮ зменшення кута ψ було пропорційним ступеню пом'якшення металу. Для ділянок I, II, III величина ψ (до ЕЮ) складала значення від 36' до 48' відповідно, а після ЕЮ спостерігалось зменшення кута ψ на рівні 48 % для області III, 28 % для II і 17 % для I. Отримані результати можна розцінювати як свідчення зміни співвідношення між крайовою і гвинтовою компонентами дислокаційної структури металу ободу залізничного колеса після ЕЮ.

Для перевірки наведених розрахунків можна скористатися оцінкою величини h за якісно іншим співвідношенням [5, 6]:

$$h = \frac{\mu b}{2\pi\sigma_0}, \quad (6)$$

Напруження необерненого руху дислокацій σ_0 , яке для вуглецевої сталі з кількістю 0,6 % С (в залежності від структурного стану металу) може змінюватися в інтервалі 200-400 МПа [3]. Після підстановки в (6) і (4) експериментальних даних, отримані значення h показали достатньо добрий збіг.

Висновки

1. Пом'якшення холоднодеформованого металу ободу залізничного колеса після електричної імпульсної обробки обумовлене рекомбінацією дислокаційної структури.
2. В процесі дії імпульсу електричного струму відбувається зростання гвинтової складової дислокацій. За своїм характером впливу електрична імпульсна обробка аналогічна зниженому опору з боку структурних складових металу процесам переповзання та послідууючої анігіляції дислокацій.

Список використаних джерел:

1. Вакуленко І.О. Дефекти залізничних коліс / І.О. Вакуленко, В.Г. Анофрієв, М.А. Грищенко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2009. – 112 с.
2. 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.
3. Вакуленко И.А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И.А. Вакуленко, В.И. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
4. Бабич В.К. Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
5. Фридель Ж. Дислокации / Ж. Фридель. – М. : Мир, 1967. – 643 с.
6. Рид В.Т. Дислокации в кристаллах / В.Т. Рид. – М. : ГНТИ, 1957. – 279 с.
7. Гинье А. Рентгенография кристаллов / А. Гинье. – М. : ГИФ - Мат. Лит., 1961. – 604 с.

Bibliography:

1. Vakulenko I.A. Defects of rail wheels / I.A. Vakulenko, V.G. Anofriev, M.A. Grishenko. – Dni-propetrovsk : Makovetski, 2009. – 112 p. (Ukr.)
2. Tsarjuk A.K. Mechanical properties of welded plane and lowalloyed steel changing under electromagnetic influences / A.K. Tsarjuk, V.Yu. Skulski, S.I. Moravski, V.A. Sokirko // Automatic welding. – 2008. – 196 p. (Rus.)

3. Vakulenko I.A. Structure morphology and work hardening of steel / I.A. Vakulenko, V.I. Bolshakov. – Dnipropetrovsk : Makovetski, 2008. – 196 p. (Rus.)
4. Babich V.K. Deformation aging of steel / V.K. Babich, Yu.P. Gul', I.E. Dolzchenkov. – M. : Metalurgia, 1972. – 320 p. (Rus.)
5. Fridel J. Dislocations / J. Fridel. – M. : Mir, 1967. – 643 p. (Rus.)
6. Reed V.T. Dislocations in crystals / V.T. Reed. – M. : GNTI, 1957. – 279 p. (Rus.)
7. Guinet A. Rentgenography of crystals / A. Guinet. – M. : GIF - Mat. Lit., 1961. – 604 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Єфременко
д-р техн. наук, проф. ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 14.11.2012

УДК 621.77.019

©Троцан А.И.¹, Каверинский В.В.², Носоченко А.О.³, Кошулэ И.М.⁴

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ РЕЛЬСОВ

Методами оптической и растровой электронной микроскопии, а также микро-рентгеноспектрального анализа изучены особенности поверхностных дефектов, наблюдаемых на рельсах. Установлено, что они представляют собой плёны, раскатанные трещины, газовые пузыри, рванины, которые могут быть заполнены окислами сложного состава, окалиной и алюмосиликатами, образовавшиеся в процессе сталеплавления и прокатного переделов блюмов и рельсов. Показано, что образованию поверхностных дефектов рельсов, может способствовать наличие в металле скоплений оксидных и алюмосиликатных включений.

Ключевые слова: рельсы, дефекты проката, плёны, раскатанные рванины, неметаллические включения, растровая электронная микроскопия, микро-рентгеноспектральный анализ.

Троцан А.И., Каверинський В.В., Носоченко О.О., Кошуле І.М. Дослідження причин утворення поверхових дефектів рейок. Методами оптичної та растрової електронної мікроскопії, а також мікрорентгеноспектрального аналізу вивчені особливості поверхових дефектів, що спостерігаються у рейках. Встановлено, що вони являють собою плівки, розкатані тріщини, газові бульбашки, рванини, які можуть бути заповнені окислами складного складу, окалиною та алюмосилікатами, що утворилися в процесі сталеплавчгї і прокатної переробки блюмів і рейок. Показано, що утворенню поверхових дефектів рейок може сприяти наявність у металі згуртувань оксидних і алюмосилікатних включень.

Ключові слова: рейки, дефекти прокату, плени, розкатані рванини, неметалеві включення, растрова електронна мікроскопія, мікрорентгеноспектрального аналіз.

A.I.Trotsan, V.V. Kaverinskiy, O.O. Nosochenko, I.M. Koshulé. Exploration of the causes of rails superficial defects formation. By methods of optical and scanning electron microscopy, and also micro X-ray spectral analysis features of the superficial defects observed on rails, are investigated. It is fixed that they are rolling films, rolled cracks, gas holes, rolled tearing which can be filled with oxides of complex composition, oxide scale and aluminosilicate, and formed in process of steel-smelting and rolling re-

¹ д-р техн. наук, ГВУЗ « Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² вед. инж., Институт проблем материаловедения НАН Украины, г. Киев

³ канд. техн. наук, вед. инж. сектора материаловедения прокатного отдела, ПАО «МК «Азовсталь», г. Мариуполь

⁴ начальник ИТЦ техуправления ПАО «МК «Азовсталь», г. Мариуполь