

І. О. ВАКУЛЕНКО (ДІП), В. А. СОКІРКО (ВАТ DS CO, Миколаїв),
О. С. БАСКЕВИЧ (УДХТУ, Дніпропетровськ)

СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В МЕТАЛІ ЗАЛІЗНИЧНОГО КОЛЕСА ПІСЛЯ ДІЇ ІМПУЛЬСІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Розглянуті питання оцінки ступеня зниження густини дислокацій в вуглецевій сталі залізничного колеса після електричної імпульсної обробки.

Ключові слова: залізничне колесо, обод, метал, імпульс, електричний струм

Зростання інтенсивності експлуатації рухомого складу обумовлює використання залізничних коліс з підвищеним опором процесам зношування. Суттєвого збільшення характеристик міцності металевих матеріалів досягають за рахунок використання термічного зміцнення [1] з оптимальним введенням легуючих елементів. На підставі цього, питання оптимального структурного стану набуває особливої актуальності. Враховуючи відносно значний перетин металу ободу залізничного колеса, при виконанні термічного зміцнення (прискорене охолодження ободу) не досягаються умови рівномірності тепловідводу по його товщині, що неодмінно має відбиток на структурному стані металу. Аналіз мікроструктури металу по перетину ободу підтверджує наведене положення [2]. Виникнення градієнта температур від поверхні інтенсивного тепловідводу супроводжується зниженням швидкості охолодження у відповідних об'ємах металу. В залежності від ступеня наближення до критичного значення швидкості охолодження, морфологія та дисперсність структурних складових вуглецевої сталі змінюються в широкому діапазоні.

В процесі експлуатації залізничного колеса, прошарки металу поблизу з поверхнею кочення достатньо інтенсивно насичуються дефектами кристалічної будови. Якщо нуль мірні дефекти (вакансії, дислоковані атоми) обумовлюють швидкість розвитку процесів дифузійного масо переносу, то одномірні (дислокації) – формування внутрішніх напружень, розвиток процесів деформаційного зміцнення та ін. Процеси зародження дислокацій, темп їх приросту та розташування визначають умови формування зародків ушкоджень після вичерпання ресурсу їх накопичувати металом [3]. На підставі цього використання засобів, що забезпечують зниження рівня накопичених дефектів кристалічної будови в металі, можуть розглядатися як напрямки підвищення ресурсу та безпеки експлуатації залізничних коліс. В порівнянні з термічними технологіями пом'якшення нагартованого холодною деформацією металу [1,3], достатньо відомі атермічні обробки, які дозво-

ляють знизити рівень характеристик міцності без застосування нагріву. Так ефект пом'якшення може бути досягнутим при застосуванні мікро пластичних деформацій, які за своїм напрямком не співпадають з попередньою деформацією [4]. В цьому випадку механізм пом'якшення заснований на розвитку процесів анігіляції дефектів кристалічної будови і, в першу чергу дислокацій, які починають рухатися за напрямками що відрізняються від напрямків первинного навантаження. В порівнянні з технологіями деформування, визначеного розповсюдження отримав спосіб заснований на впливі електричного струму на розвиток процесів структурних змін в металі. Аналіз відомих експериментальних результатів [5] указує на аналогію, за зовнішніми ознаками, з ефектом пом'якшення від мікро пластичних деформацій. Однак, як величина зниження міцності, так і уточнення природи самого явища вимагають проведення додаткових досліджень.

Метою роботи являється спроба визначення причин розвитку процесів пом'якшення в нагартваному, при експлуатації металі залізничного колеса після електричної імпульсної обробки.

Матеріалом для досліджень являвся фрагмент ободу залізничного колеса передчасно вилучений з експлуатації. Дослідження структури проводили під світловим мікроскопом, з використанням методик кількісної металографії [6]. Дослідження тонкої кристалічної будови металу проводили з використанням рентгенівського структурного аналізу, з визначенням густини дислокацій, розміру областей когерентного розсіювання, викривлень другого роду. Електричну імпульсну обробку проводили на оригінальному устаткуванні, в умовах підприємства ВАТ DS Co.

Враховуючи, що в процесі експлуатації колеса, за рахунок зношування або після відновлення профілю ободу обточуванням, структура металу на поверхні кочення змінюється від сформованих за зсувним механізмом з подальшим відпуском, до приблизно нормалізованого

стану в середині. Дослідженнями мікроструктури сталі по поверхні кочення визначений вплив пластичної деформації. Але сам характер зміцнення металу в значній ступені залежить від його структурного стану перед початком експлуатації колеса. Так відомо, що структури з якісно різною морфологією другої фази мають не тільки різний темп накопичення дефектів кристалічної будови але і різне розташування [1, 3], що неодмінно має відбиток на комплексі властивостей металевого матеріалу.

Цементит пластинкової форми, коли структурно зв'язаний с феритом у вигляді перлітної колонії, спроможній 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, якому відповідає початок розпаду рівномірного розподілу дислокацій на періодичні структури (рис. 1). Справа в тому, що при формуванні негомогенного розподілу дислокацій, об'єми матриці з підвищеною їх густиною стають перешкодою для подальшого розповсюдження дислокацій. В процесі неухильного накопичення дислокацій, наведені ділянки структури поступово перетворюються в субграниці, які поділяють на окремі елементи феритні прошарки перліту (рис.1б). Наведені субструктурні угруповання мають назву дислокаційних чарунок [2]. По мірі подальшого 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 припустимої густини дислокацій в металі, вони перетворюються в осередки субмікротріщин. Таким чином можна вважати, що чим скоріше при деформації в перлітних колоніях почнуть формуватися негомогенності в рівномірному розташуванні дислокацій, тим швидше вони будуть перетворені в осередки зародження ушкоджень майбутнього руйнування металу.

Якісно інша картина спостерігається при пластичній деформації вуглецевої сталі з глобулярними структурами. Наведені структури формуються в при поверхневих шарах металу ободу колеса підчас операції термічного зміцнення (прискорене охолодження зі швидкістю поблизу з критичним значенням та подальший само відпуск, рис. 2). Річ у тому, що цементит глобулярної форми практично залишається незмінним пі-

сля максимально припустимої пластичної деформації. Дислокації що рухаються підчас пластичної деформації металу з глобулярним цементитом дуже швидко перетворюються в нерухомі. Обумовлене наведене явище блокуючим ефектом від частки цементиту, яка розташована в площині ковзання дислокації. В зв'язку з цим, дислокації що рухаються в визначеній площині ковзання стають заблокованими на карбідних частках як на вузлах. Взаємодія з іншими дислокаціями приводе до дуже швидкого накопичення заблокованих дислокацій. За зовнішнім виглядом виникаюче субструктурне угруповання подібне дислокаційним чарункам. Розмір чарунок пропорційний відстані між карбідними частками. Чим більш дисперсна структура з глобулярним цементитом, тим скоріше досягаються умови досягнення межі максимально припустимої концентрації дислокацій, після якої починається процес руйнування металу.

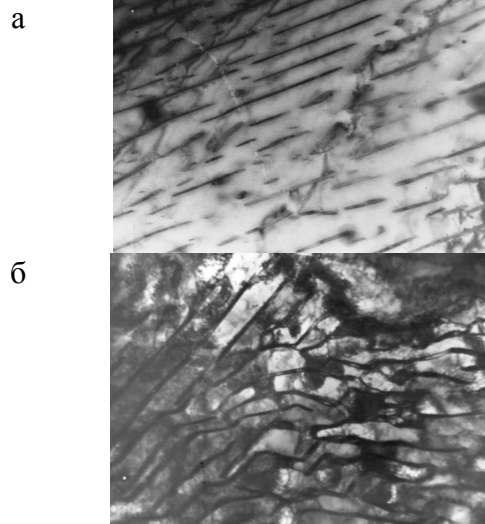


Рис. 1. Структура перлітної колонії вуглецевої сталі після пластичної деформації 2 (а) і 20% (б)
Збільшення: а – 30 000; б – 20 000



Рис. 2. Структура сталі після прискореного охолодження та відпуску 400 °С. Збільшення 18 000

Підвищення ресурсу експлуатації залізничного колеса можливо реалізувати за рахунок розвитку процесів зниження концентрації накопичених дефектів кристалічної будови і, в першу чергу дислокацій, наприклад використовуючи елект-

ричну імпульсну обробку (ЕІО). Фрагмент обода залізного колеса (рис. 3) був умовно розділений на три частини в яких проводили дослідження. Вимірювання твердості металу обода колеса по поверхні кочення для областей I, II і III склали відповідні значення в інтервалі 550–700. Після ЕІО за визначеною схемою, спостерігали зменшення твердості на 11, 5 та 17 % для ділянок I, II та III відповідно. Результати отриманого пом'якшення нагартованого металу ободу колеса на поверхні кочення були підтверджені даними рентгенівського структурного аналізу. Величина зниження густини дислокацій (ρ), при оцінці по дифракційній лінії (211), для визначених ділянок коливалася в інтервалі 22–43 %.

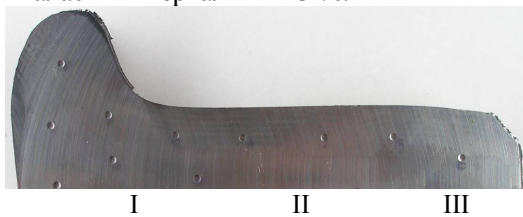


Рис. 3. Зовнішній вигляд фрагменту обода для досліджень впливу електричної імпульсної обробки, умовно розподілений на області

З метою визначення характеру розвитку процесів пом'якшення після ЕІО, скористуємося співвідношенням по оцінці напружень, що обумовлюють рух дислокацій від різноманітних зовнішніх впливів. Враховуючи відносно низькі температури нагріву (температура навколишнього середовища), впливом від розвитку процесів дифузійного масо переносу не можливо обґрунтувати рівень ефекту пом'якшення металу. З іншого боку, при високих значеннях густини дислокацій що накопичені в кристалографічних системах ковзання (для лінії (211) ρ складала значення $3,6 - 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), одним із можливих пояснень розвитку процесів пом'якшення можуть бути неконсервативні переміщення дислокацій. На рис.4 схематично представлений такий приклад переміщення дислокації в перпендикулярному напрямку відносно своєї системи ковзання. В залежності від особливостей переміщення лінії дислокації в площині Q (рис. 4) буде 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 цього кута повинне бути полегшення процесу неконсервативного переміщення дислокації. Обумовлена наведена тенденція формуванням прошарку з вакансій або дислокованих атомів лише завдяки крайової компоненти дислокації, яка пропорційна ψ [7]. Сила, що діє на оди-

ницю довжини дислокації при перепозванні, оцінюється залежністю [7]:

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

де W_1 - енергія формування атомного дефекту, b - вектор Бюргерса. При наближенні ψ до нуля, вплив крайової компоненти дислокації стає необмежено малою і $F_m \rightarrow 0$. З іншого боку сила, що виникає між двома дислокаціями (або їх фрагментами), які розташовані в паралельних площинах буде дорівнювати [8]:

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

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

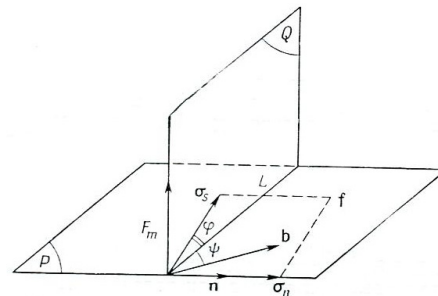


Рис. 4. Схема переміщення випадкової дислокації з своєї площини ковзання (L – лінія дислокації, P – площина ковзання, ψ – кут між L та вектором Бюргерса b) [7]

Умови перепозання дислокації з однієї площини в іншу будуть досягнутими 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 :

$$\text{Sin}\psi = \frac{5b}{2\pi kh}. \quad (3)$$

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

$$\text{Sin}\psi \approx \frac{b}{h}. \quad (4)$$

Оцінюючи h по залежності від густини дислокацій [1]:

$$\rho = h^{-2}, \quad (4a)$$

(4) можна переписати як:

$$\text{Sin}\psi = b\sqrt{\rho}. \quad (5)$$

Після підстановки в (5) $b = 2,48 \cdot 10^{-7} \text{ мм}$ [9], експериментальних значень густини дислокацій,

у відповідності до досліджуваних ділянок (I, II, III) ободу колеса визначили, що в результаті ЕЮ зменшення кута ψ пропорційно ступеня пом'якшення. Так, для ділянок I, II, III (рис. 3) величина ψ (до ЕЮ) складала значення від 36' до 48' відповідно. В результаті ЕЮ спостерігали зменшення кута ψ на рівні 48 % для області III, 28 % для II і 17 % для I. Отримані результати можна розцінювати як свідчення про зміну співвідношення між крайовою і гвинтовою компонентами дислокаційної структури в металі ободу залізничного колеса після ЕЮ.

З метою перевірки правомочності проведених розрахунків, була використана оцінка порядку величини h по якісно іншому співвідношенню [7, 8]:

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

де σ_0 - напруження необерненого руху дислокацій, 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 (4а) експериментальних даних, отримані вираховані значення h показали достатньо добрий збіг абсолютних значень.

Таким чином, пом'якшення металу ободу колеса, що спостерігається після ЕЮ, у першому наближенні може бути пов'язане з рекомбінацією дислокаційної структури. Враховуючи, що пропорційно куту ψ змінюється крайова компонента дислокаційної структури [7], в результаті електричної імпульсної обробки повинна зростати частина гвинтової складової. В наслідок цього складаються умови зниження опору, з боку структурних скла-

дових металу, процесам переповзання та послідовній анігіляції дислокацій.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бабич, В. К. Деформационное старение стали [Текст] / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Вакуленко, І. О. Дефекти залізничних коліс [Текст] / І. О. Вакуленко, В. Г. Анофрієв, М. А. Грищенко та ін. – Д. : Маковецький, 2009. - 112 с.
3. Вакуленко, І. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали [Текст] / І. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д. : Маковецький, 2008. – 196 с.
4. Вакуленко, І. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании [Текст] / І. А. Вакуленко. – Д. : Gaudeamus, 2003. - 94с.
5. Царюк, А. К. Изменение механических свойств сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей под влиянием электромагнитных воздействий [Текст] / А. К. Царюк, В. Ю. Скульский, С. И. Моравский, В. А. Сокирко – Автоматическая сварка, 2008. – № 9. – С. 28–32.
6. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві [Текст] / І. О. Вакуленко – Д. : Маковецький, 2010. - 124 с.
7. Фридель, Ж. Дислокации [Текст] / Ж. Фридель. – М. : Мир, 1967. - 643 с.
8. Рид, В. Т. Дислокации в кристаллах [Текст] / В. Т. Рид. – М. : ГНТИ, 1957. – 279 с.
9. Гинье, А. Рентгенография кристаллов [Текст] / А. Гинье – М. : ГИФ-Мат.Лит., 1961. – 604 с.

Надійшла до редколегії 30.03.2012.

Прийнята до друку 09.04.2012.

И. А. ВАКУЛЕНКО, В. А. СОКИРКО, А. С. БАСКЕВИЧ

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕТАЛЛЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КОЛЕСА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Рассмотрены вопросы оценки степени снижения плотности дислокаций в углеродистой стали железнодорожного колеса после электрической импульсной обработки.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, обод, металл, импульс, электрический ток

I. A. VAKULENKO, V. A. SOKIRKO, A. S. BASKEVICH

THE TURN STRUCTURE METAL OF RAIL WHEEL AFTER INFLUENCE OF IMPULSE ELECTRIC CURRENT

The observed questions of estimate degree decrease density dislocations in carbon steel rail wheel after electrical impulse treatment.

Key words: rail wheel, rim, metal, impulse, electric current