

УДК 691.87:691.714:539.434

ВПЛИВ УДАРНОЇ ХВИЛІ ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОМИ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНОЇ СТАЛІ

І. О. ВАКУЛЕНКО, Д. М. БОЛОТОВА, М. А. ГРИЩЕНКО

*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
ім. академіка В. Лазаряна*

Виявлено, що обробка термічно зміцненої сталі імпульсами ударної хвилі від електричного розряду у воді призводить до підвищення твердості і обмеженої витривалості за втоми. В результаті виникнення імпульсу ударної хвилі зростає кількість дислокацій, що забезпечує розповсюдження деформації за цикл, а це сприяє збільшенню циклічної витривалості.

Ключові слова: *витривалість, дислокація, імпульс, ударна хвиля, амплітуда циклу.*

Порівняно з термічними технологіями використання дії імпульсів електричного струму [1] або напружень від ударної хвилі (УХ) [2] може змінювати структурний стан металевих матеріалів. Складність у керуванні окремим імпульсом ударної хвилі великої потужності можна усунути заміною на чисельні імпульси малої потужності від електричного розряду в рідині. Аналіз результатів свідчить, що зміна потужності та кількості імпульсів від електричного розряду у воді [3] дає змогу суттєво впливати на комплекс властивостей металів і сплавів. Водночас такий вплив не однозначний [4]. За результатами [3, 4] підвищення амплітуди імпульсу сприяє накопиченню дислокацій, а тривалість його дії визначає умови їх руху. Більшість досліджень присвячена аналізу впливу обробки електричним розрядом у рідині на властивості металевих матеріалів за статичних умов навантаження [2–5].

Нижче проаналізовано вплив імпульсів ударної хвилі на обмежену витривалість термічно зміцненої вуглецевої сталі за втоми.

Матеріал і методика. Матеріал для досліджень – вуглецева сталь залізничної вісі колісної пари з таким хімічним складом (%): 0,45 С; 0,85 Мn; 0,50 Si; 0,022 S і 0,017 P, кількість інших хімічних елементів у межах марочного складу сталі 45. Після виготовлення зразки для випробувань на втому термічно зміцнювали: гартували від температури нагріву вище за A_{c3} і за відпуску при температурі 300°C. Випробовували на втому за симетричного циклу навантаження згином на машині “Сатурн-10”. Міцність оцінювали за твердістю методом Роквелла. Обробляли зразки імпульсами УХ у воді на промисловому устаткуванні ванного типу “Іскра-23”. За електричного розряду 15...18 kV формувалася імпульс з енергією 10...12 kJ та амплітудою напруження 1...2 GPa. Обробляли до досягнення 15 тис. імпульсів за частоти 2...3 Hz. Густина дислокацій оцінювали за методиками рентгенівського структурного аналізу на устаткуванні ДРОН-3.

Результати та їх обговорення. Після гартування сформувалася структура рейкового мартенситу з високою щільністю дислокацій, тонкими прошарками з двійників і штриховими виділеннями частинок цементиту високої дисперсності. Нагрів до 300°C сталі після гартування призвів до додаткового виділення дисперс-

них карбідних частинок на дислокаціях. У деяких місцях втрата контрастності зображення свідчила про розвиток рекомбінації дислокацій, зменшення їх густини за одночасного формування осередків з неоднорідним розташуванням [6]. Таким чином, декорування атомами вуглецю широких стінок з дислокацій можна розглядати як свідчення про практичну відсутність рухомих дислокацій у сталі. Твердість після термічного зміцнення дорівнювала 46...47 HRC, а після обробки УХ зросла на 10...12%.

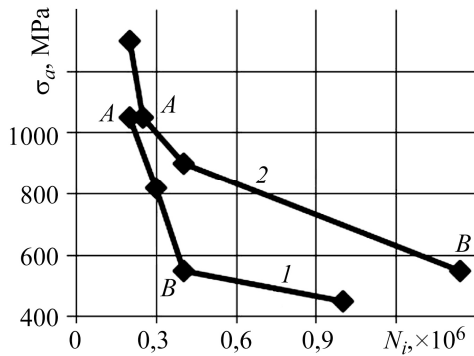


Рис. 1. Діаграми втоми сталі після термічного зміцнення (1) і обробки УХ (2).

Fig. 1. The fatigue diagrams of steel after thermal strengthening (1) and shock waves (SW) treatment (2).

Визначені величини обмеженої витривалості після термічного зміцнення (N_i) (рис. 1, крива 1) використали для оцінки впливу обробки УХ. Для певних амплітуд циклу (σ_a), досягнувши обмеженої витривалості $0,6...0,65N_i$, зразки піддавали дії імпульсів УХ, з подальшим доведенням до руйнування за втоми. Обмежену витривалість визначали як суму кількості циклів до обробки УХ і після остаточного руйнування (рис. 1, крива 2). Порівняльний аналіз кривих вказує на можливість існування якісних відмінностей у внутрішній будові металу до і після дії імпульсів УХ. Підвищення амплітуди навантаження супроводжується зменшенням різниці у значеннях обмеженої витривалості, яка за

$\sigma_a = 1050$ МПа практично відсутня. Для ділянок низьких амплітуд розташування кривої втоми (2) над кривою (1) свідчить про циклічне зміцнення після дії УХ. Враховуючи існування обернено пропорційного співвідношення між границею міцності і запасом пластичних властивостей для більшості металевих матеріалів, збільшенню границі міцності повинен відповідати нижчий ресурс накопичення дефектів кристалічної будови до моменту руйнування. На підставі цього, очікуваний ефект від дії імпульсів УХ повинен бути спрямований у бік зниження витривалості за втоми. Однак хід кривих (рис. 1) свідчить, що для однакових амплітуд ефективність впливу УХ збільшується зі зниженням ступеня циклічного перевантаження. За наведеними результатами характер розвитку структурних перетворень у сталі від імпульсів УХ повинен бути якісно іншим порівняно з дією холодної пластичної деформації або після термічного зміцнення.

Вимірювання густини дислокацій (ρ_{hkl}) за двома системами ковзання свідчить про приблизно однаковий вплив величини σ_a , хоча в цілому криві після дії УХ зсунуті у бік вищих амплітуд навантаження (рис. 2). Враховуючи, що для металевих кристалів з ОЦК решіткою рух дислокацій за температур до 180°C в основному обмежується площинами ковзання $\{211\}$, а подальше підвищення температур супроводжується активацією систем $\{110\}$ [7], наведений характер зміни ρ_{hkl} може бути обумовлений тепловим ефектом від імпульсу УХ. За результатами [2], при досягненні напружень за фронтом УХ рівня 35 GPa, температура в металі може підвищуватися до 350°C .

Однак за дії імпульсу $10^{-7}...10^{-9}$ s та приблизно в декілька десятків разів меншого рівня напружень (1...2 GPa) дуже важко пояснити досягнутий ефект термічним впливом. Вірогідно основний внесок обумовлений все ж таки формуванням імпульсу ударної хвилі, а локальне підвищення температури за фронтом ударної хвилі має менше значення. За умов прискореного зростання тріщини вто-

ми більша частина дислокацій залишається біля поверхні руйнування, а накопичену їх кількість визначають ступенем циклічного перевантаження металу [8]. Зі зниженням рівня перевантаження вплив статичної складової циклу знижується, момент виникнення осередку руйнування зсувається у бік збільшення ρ_{hkl} . Обумовлено це зменшенням необхідної кількості дислокацій для забезпечення умов розповсюдження деформації за цикл, зниженням вірогідності взаємного блокування дислокацій і виникнення осередків з немонотонним розташуванням. Порівняно з термічно зміцненим станом, в результаті обробки УХ збільшення межі накопичення дислокацій за однакових амплітуд циклічного навантаження може бути забезпечено лише за умов підвищення рівномірності їх розподілу. Це підтверджує аналіз приросту кількості дислокацій за цикл навантаження. За допомогою результатів (рис. 2) можна оцінити підвищення густини дислокацій за один цикл навантаження ($\gamma = \Delta\rho / \Delta N_i$, де $\Delta\rho$ – зміна кількості дислокацій на ділянці відповідної кількості циклів ΔN_i). Для точок *A* і *B* кривих втоми металу в стані після термічного зміцнення (рис. 1, крива 1) величина $\gamma = 4,8 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$, а після дії УХ стає більшою приблизно на порядок ($2,7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$). На підставі цього можна вважати, що введення додаткової кількості дислокацій у термічно зміцнену сталь не супроводжується їх анігіляцією від дії імпульсів ударної хвилі. За зовнішніми ознаками підвищена кількість дислокацій для підтримки розповсюдження деформації за цикл, скоріш за все, сприятиме зсуву моменту формування незворотних ушкоджень, збільшуючи кількість циклів до руйнування металу.

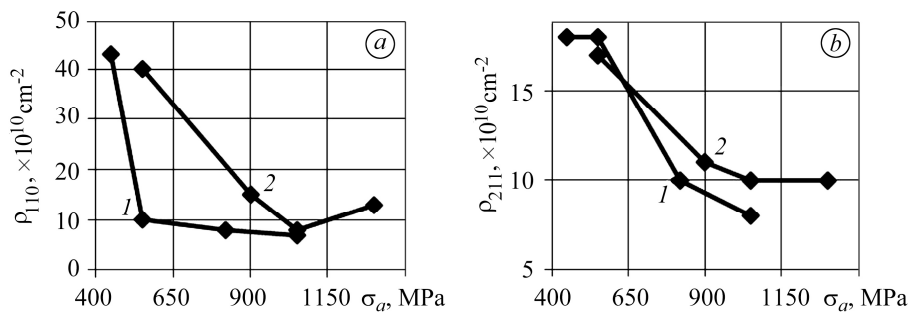


Рис. 2. Густина дислокацій за інтерференціями (110) (а) і (211) (б) залежно від σ_a сталі після термічного зміцнення (1) і дії УХ (2).

Fig. 2. Density of dislocation by interferences (110) (a) and (211) (b) depending on σ_a of steel after thermal strengthening (1) and SW action (2).

Таким чином, під час обробки УХ більшість введених дислокацій залишається рухливими і здатними до взаємодії за подальшого циклічного навантаження, або відбувається їх додаткове розблокування після термічного зміцнення. Підвищена кількість дислокацій у різних кристалографічних системах ковзання після дії імпульсів УХ свідчить про розвиток складних дислокаційних реакцій, які забезпечують приріст циклічної витривалості вуглецевої сталі.

ВИСНОВКИ

Обробка термічно зміцненої вуглецевої сталі імпульсами ударної хвилі від електричного розряду у воді супроводжується збільшенням густини дислокацій, що сприяє підвищенню обмеженої витривалості за втоми. Порівняльний аналіз для ділянки кривої втоми з обмеженою витривалістю свідчить, що за умов однакової кількості циклів ($0,4 \cdot 10^6$) обробка УХ призводить до підвищення границі втоми сталі більш ніж в 1,5 рази, від 540 до 900 МПа. Використання на практиці такої обробки може бути корисним під час розроблення пропозицій стосовно по-

довження терміну експлуатації елементів рухомого складу, які піддаються чисельним циклічним навантаженням.

РЕЗЮМЕ. Выявлено, что обработка термически упрочненной стали импульсами ударной волны от электрического разряда в воде приводит к повышению твердости и ограниченной выносливости при усталости. В результате возникновения импульса ударной волны растет количество дислокаций для обеспечения распространения деформации за цикл, что способствует увеличению циклической выносливости.

SUMMARY. Treatment of thermally strengthened steel by shock wave pulses from electric discharge in water leads to the increase of hardness and limited endurance under fatigue. As a result of the shock wave pulse the number of dislocations increases what ensures the condition of deformation propagation in a cycle, which facilitates the increase of cyclic endurance.

1. *Sprecher A. F., Mannan S. L., and Conrad H.* On the mechanisms for the electroplastic effect in metals // *Acta Met.* – 1986. – **34**. – P. 1145–1162.
2. *Гелунова З. М.* Явления в закаленных сталях при обработке ударными волнами // *Высокоскоростная деформация.* – М.: Наука, 1971. – С. 68–72.
3. *Чачин В. Н.* Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов. – Минск: Наука и техника, 1978. – 184 с.
4. *Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов /* Под ред. М. А. Мейерса и Л. Б. Мурра. – М.: Металлургия, 1984. – 510 с.
5. *Гелунова З. М.* О явлении перекристаллизации металлов и сплавов при обработке ударными волнами // *Высокоскоростная деформация.* – М.: Наука, 1971. – С. 80–84.
6. *Vakulenko I. A. and Lisnyak A. G.* Influence voltage pulse electrical discharge in the water at the endurance fatigue of carbon steel // *Mechanics Mat. Sci. & Eng.* – 2016. – **2**. – P. 14–22.
7. *Коттрелл А. Х.* Дислокации и пластическое течение в кристаллах. – М.: ГНТИ, 1958. – 268 с.
8. *Нотт Дж.* Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.

Одержано 29.06.2017