

УДК 691.87:691.714:539.434

**ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОЇ ІМПУЛЬСНОЇ  
ОБРОБКИ НА ПОВЕДІНКУ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ В УМОВАХ  
ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**І. О. Вакуленко, д. т. н., проф., О. Г. Лісняк\*, к. т. н., доц.,  
О. О. Чайковський\*\*, к. т. н., доц., О. М. Перков\*\*\*, к. т. н., с. н. с.**  
*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
ім. акад. В. Лазаряна*

*\*Дніпропетровський національний гірничий університет*

*\*\* ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»*

*\*\*\*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

**Постановка проблеми**

На основі численних досліджень визначено, що циклічне навантаження викликає окрихлення металевих матеріалів [1]. Ця тенденція зумовлена формуванням ушкоджень внутрішньої будови металу. Збільшення кількості циклів навантаження супроводжується неодмінним зниженням опору зростанню магістральної тріщини.

Відома технологія обробки металевих матеріалів, яка заснована на використанні дії ударної хвилі для формоутворення, зміцнення або зварювання [2]. У більшості випадків ефект, що досягається, має чітко виражену порогову залежність від тиску в ударній хвилі. Досвід використання ударної хвилі для зміцнення свідчить, що рівень досягнення зміцнення перебільшує в 3–4 рази ефект від еквівалентної пластичної деформації [2; 3]. Ступінь підвищення твердості великою мірою визначається величиною тиску в ударній хвилі [4]. Разом із цим застосування технології ударно-хвильового навантаження має суттєві обмеження. На підставі цього виникає практичний інтерес з'ясувати можливість заміни одного імпульсу ударної хвилі великої амплітуди серією імпульсів значно меншої амплітуди.

**Мета роботи**

Оцінка впливу електрогідравлічної імпульсної обробки на поведінку вуглецевої сталі під час циклічного навантаження.

**Матеріал і методики досліджень**

Матеріалом для досліджень була вуглецева сталь 45 залізничної осі колісної пари з хімічним складом 0,44 % С, 0,67 % Мп, 0,3 % Si, 0,027 % Р, 0,003 % S. Зразки для досліджень виготовляли у вигляді пластин товщиною 1, шириною 15 і довжиною 120 мм. Потрібний структурний стан металу отримували після нагріву до температур аустенізації, здійснювали гартування у воді з наступним відпуском за температури 300 °С, тривалістю 1 год. Мікроструктуру досліджували з використанням методик електронної мікроскопії. Твердість вимірювали методом Роквела, за шкалою «С» (HRC). Циклічне навантаження здійснювали за умов симетричного згину на випробувальній машині типу «Сатурн-10». Електрогідравлічну імпульсну обробку (ЕІО) здійснювали на устаткуванні ванного типу «Іскра-23» для очищення ливарних виробів. У ванні з водою на електрод подавали електричні імпульси напругою 15–18 кV з енергією 10–12 кДж. У результаті

пробою у воді виникала ударна хвиля з амплітудою 1–2 ГПа. Частота імпульсів складала значення 2–3 Гц за кількості імпульсів до 15 тис.

#### **Виклад основного матеріалу**

За відомими експериментальними даними [2–4], імпульсна обробка електричним гідравлічним ударом, або у разі використання вибухових речовин, супроводжується ефектом зміцнення металевих матеріалів. Більше цього, як показано в [2], зростання амплітуди тиску за ударно-хвильового навантаження металу супроводжується збільшенням кількості дислокацій, а підвищення тривалості імпульсу за постійної амплітуди сприяє руху і перерозподілу дислокацій.

З урахуванням указаних результатів були проведені дослідження структури і вимірювання твердості за Роквелом сталі у стані після гартування з відпуском. З аналізу мікроструктури (рис. 1) можна визначити початкові етапи виділення дрібнодисперсних карбідних часток на дислокаціях як у середині рейок мартенситу, так і на їх межах.



Рис. 1. Структура сталі 45 після гартування і відпуску при температурі 300 °С. Збільшення  $\times 16\,000$

Здійснено порівняльний аналіз із відомими результатами [5], за якими зниження густини дислокацій і їх перегрупування є початком формування дислокаційних чарунок. Справді, спостереження сформованих широких стінок із дислокацій, разом із декоруванням їх атомами вуглецю, що зумовлює зниження контрасту, є підтвердженням наведених результатів (рис. 1). Враховуючи достатньо велике пересичення твердого розчину після гартування на мартенсит, у процесі відпуску початок виділення дрібнодисперсних часток повинно повністю заблокувати можливість дислокаційних переміщень під час пластичної деформації. Перед ЕІО можна з упевненістю стверджувати, що структура і рівень твердості (46,6 HRC) повністю відповідають структурному стану сталі 45 після гартування і відпуску за температури 300 °С [6]. Піддаючи термічно зміцнену сталь дії ЕІО, отримали додаткове підвищення твердості на рівні 11 % до 51,8 HRC.

Таким чином, дія імпульсної обробки на вуглецеву сталь після термічного зміцнення за своїм характером аналогічна ефекту зміцнення і може розглядатися як якісне підтвердження відомих результатів.

У процесі циклічного навантаження енергія, необхідна для формування осередку руйнування, визначається дією декількох чинників [1]. Але тільки дві складові мають виняткове значення. Перша складова забезпечує досягнення критичного значення викривлень кристалічної решітки в локальних мікрооб'ємах металу. Друга – визначає рівень діючих напружень для розриву міжатомних зв'язків у металевому кристалі.

На рисунку 2 зображені фрагменти діаграм циклічного навантаження, які охоплюють область малоциклової втоми і перехідну частину до багатоциклового навантаження. Порівняльний аналіз ходу кривих для області малоциклової втоми і перехідної частини до багатоциклового навантаження свідчить про існування якісно різних за характером структурних перетворень у металі. Так, для області малоциклової втоми при великих ступенях циклічного перевантаження збільшення амплітуди ( $\sigma_a$ ) супроводжується зменшенням різниці в значеннях обмеженої витривалості, яка при

$\sigma_a = 100 \frac{\text{КГ}}{\text{ММ}^2}$  практично відсутня. Окрім цього, здійснення екстраполяції

кривих втоми в область ще більш високих амплітуд циклічного навантаження вказує на можливість отримання протилежного за характером ефекту: дія ЕІО може знижувати обмежену витривалість (рис. 2).

$$\sigma_a, \frac{\text{КГ}}{\text{ММ}^2}$$

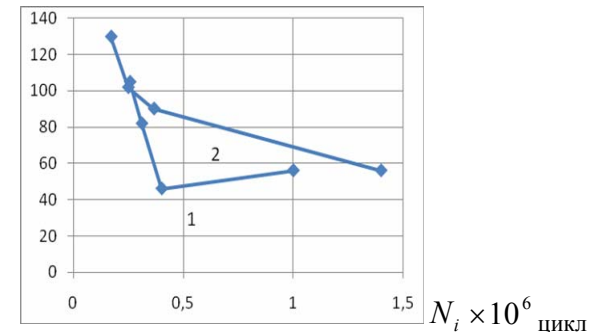


Рис. 2. Фрагменти діаграм циклічного навантаження сталі 45 після гартування і відпуску при 300 °С (1) і після додаткової (ЕІО) (2)

Із порівняльного аналізу з'ясоване, що більш пологий вигляд кривої циклічного навантаження металу після ЕІО вказує на достатньо ефективний вплив на витривалість. З іншого боку, якщо піддавати вуглецеву сталь дії ЕІО,

амплітуда циклічного навантаження за умов досягнення однакової витривалості суттєво зростає. Особливо це стосується перехідної частини кривих втоми. Справді, коли амплітуда циклічного навантаження приблизно однакова, наприклад, при  $56 \text{ кг/мм}^2$ , збільшення витривалості металу досягає приблизно 30 % (рис. 2).

З метою можливого визначення механізму впливу дії імпульсів ЕІО на вигляд кривої циклічного навантаження була проведена оцінка ступеня пластичної деформації за цикл навантаження. Враховуючи виникнення на поверхні металевго матеріалу за циклічного навантаження інтрузій і екструзій, які зумовлені переміщеннями і взаємодією дислокаційних угруповань, величина деформації за цикл навантаження повинна характеризувати швидкість накопичення необерненої ушкоджуваності при втомі. Величина пластичної деформації за цикл навантаження ( $\mathcal{E}$ ) може бути оцінена за співвідношенням Кофіна – Менсона [1], яке зв'язує величину  $\mathcal{E}$  з кількістю циклів до руйнування ( $N_f$ ):

$$\mathcal{E} \cdot (N_f)^a = b, \quad (1)$$

де  $a$  – постійна величина, яка дорівнює приблизно 0,5;  $b$  – величина, яка вважається істинною деформацією металевго матеріалу під час руйнування, приймається рівною приблизно 1 [1]. Підставляючи в (1) для амплітуди навантаження  $56 \text{ кг/мм}^2$  (рис. 2) відповідну кількість циклів до руйнування зразків металу в стані після гартування і відпуску ( $N_f = 10^6$  циклів) і після дії ЕІО ( $N_f = 1,445 \cdot 10^6$  циклів), отримали значення  $\mathcal{E}$ , які дорівнювали  $10^{-3}$  і  $0,83 \cdot 10^{-3}$  відповідно. Таким чином, введення додаткової кількості дефектів кристалічної решітки у вуглецеву сталь за дії ЕІО практично не супроводжується розвитком процесів анігіляції з дефектами після гартування і відпуску, що підтверджується підвищенням твердості. З іншого боку, зростання витривалості металу після дії ЕІО з великою вірогідністю зумовлене розвитком процесів розблокування дислокацій гартування у процесі циклічного навантаження і їх взаємодією з дислокаціями після ЕІО.

#### ВИСНОВКИ

1. Піддаючи електрогідравлічній імпульсній обробці вуглецеву сталь 45 у структурному стані після гартування і відпуску при  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , досягли ефекту підвищення твердості.
2. Експериментально визначене підвищення витривалості сталі 45 за циклічного навантаження після ЕІО.

#### Література

1. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения / Дж. Ф. Нотт. – М. : Металлургия, 1978. – 256 с.
2. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М. А. Мейерса и Л. Б. Мурра. – М. : Металлургия, 1984. – 510 с.
3. Murr. L. E. and Kulman-Wisdorf P. Acta met. 1978, v. 26, pp. 847–851.

4. Чачин В. Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов / В. Н. Чачин. – Минск : Наука и техника, 1978. – 184 с.
5. Бабич В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
6. Стародубов К. Ф. Повышение прочности, пластичности и вязкости стали путем термической обработки / К. Ф. Стародубов, М. А. Тылкин. – Днепропетровск : НТО черной металлургии, 1957. – 97 с.