

УДК 539.3

Г.Степанов, докт. техн. наук; А.Бабуцький, канд. техн. наук;

В.Кривенюк, докт. техн. наук; Г.Чижик

*Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАНУ (Київ)*

## ВПЛИВ ОБРОБКИ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ НА ОПР ПОВЗУЧОСТІ ЖАРОМІЦНОЇ СТАЛІ

*Наведено результати експериментальних досліджень впливу обробки імпульсним електричним струмом (ІЕС) на високотемпературну повзучість зразків з жароміцної сталі 12Х1МФ. За результатами випробувань встановлено позитивний вплив обробки ІЕС на ресурс жароміцності і зменшення розсіювання значень мікротвердості сталі. Запропоновано пояснення впливу обробки струмом на поведінку матеріалу.*

**Вступ.** Результати виконаних раніше досліджень свідчать про позитивний вплив ІЕС на характеристики міцності, пластичності та тріщиностійкості матеріалів при статичному і циклічному навантаженні [1-5]. Оскільки систематичні дані про вплив обробки ІЕС на характеристики повзучості матеріалів відсутні, нами виконана експериментальна оцінка такого впливу, результати якої викладені в даній статті.

Існують різні методи підвищення опору повзучості конструкційних матеріалів, зокрема механіко-термічна обробка [6]. Відомі також дані [7] щодо істотного збільшення опору матеріалу повзучості в результаті попереднього імпульсного механічного навантаження. Дослідження поведінки оброблених матеріалів в умовах повзучості - тривалого навантаження при підвищеній температурі - важливі для вивчення механізмів, що визначають зміну фізико-механічних властивостей матеріалу в результаті впливу ІЕС, оскільки результати таких випробувань чутливі до зміни структури матеріалу [6]. У цьому зв'язку в наших дослідженнях додатково, після проведення випробувань на повзучість, було визначено мікротвердість зразків.

**Зразки, методики випробувань та обробки ІЕС.** Для проведення досліджень використовували п'ятикратні циліндричні зразки з робочою частиною діаметром 5 мм, які були виготовлені з одного фрагмента труби з орієнтацією вісі зразка в тангенціальному напрямку труби. Матеріал - сталь 12Х1МФ, що широко використовується в енергомашинобудуванні, зокрема, при виготовленні паропроводів.

Прискорені випробування на повзучість проводили на стандартному устаткуванні (дослідні машини типу АИМА-5) при напруженні розтягу 190 МПа в робочій частині зразка, температурі 540°C, без захисної атмосфери (на повітрі). Випробували декілька серій зразків, по три зразки в кожній (див. табл.1).

Зразки першої серії випробували на повзучість за стандартною методикою - безперервне навантаження до руйнування. При випробуванні зразків другої серії, після витримки під дією вказаного вище термомеханічного навантаження упродовж 100 годин їх знімали з установки АИМА-5, встановлювали на дослідній машині ИР-50, навантажували розтягом до 190 МПа і пропускали через зразок імпульс струму, використовуючи розряд батареї конденсаторів відповідно до методики [8]. Параметри обробки - ємність батареї 600 мкФ, напруга заряджання 3 кВ - забезпечували амплітуду струму в першому циклі розряду близько 37 кА. Ці параметри при виконанні досліджень витримували постійними для всіх випадків обробки ІЕС. Потім зразки знову встановлювали на установках АИМА-5 і продовжували випробування на повзучість до їх руйнування. Зразки третьої і четвертої серії випробували аналогічно, з тією лише різницею, що в третій серії витримка зразків в умовах випробувань на повзучість до обробки ІЕС складала 300 годин, а в четвертій серії обробку здійснювали періодично, через кожні 100 годин витримки.

Зразки п'ятої серії випробували без проміжних обробок ІЕС, але з зупинками кожні 100 годин, під час яких виконували повне розвантаження зразків. Час кожної зупинки складав одну добу, що відповідало часу, затраченому раніше на зупинку для проведення обробки імпульсом струму при випробуваннях зразків другої, третьої і четвертої серій.

**Результати випробувань зразків в умовах повзучості.** Результати досліджень наведені в табл.1 та на рис. 1, де вказані значення напрацювання (часу до руйнування) і деформації до руйнування, усереднені за результатами випробувань зразків відповідних серій. Як впливає з результатів випробувань, обробка ІЕС істотно впливає на жароміцність досліджуваної сталі. Так, обробка імпульсами струму через кожні 100 годин (четверта серія) збільшує напрацювання практично на 30% у порівнянні зі зразками першої серії.

Таблиця 1 - Результати досліджень серій зразків на повзучість

№ п/п	Короткий опис серії	Час до руйнування, години	Деформація, %
1.	Безперервне навантаження до руйнування	532	30
2.	Безперервне навантаження упродовж 100 годин – зупинка, обробка ІЕС - безперервне навантаження до руйнування	618	36
3.	Безперервне навантаження упродовж 300 годин – зупинка, обробка ІЕС - безперервне навантаження до руйнування	566	36
4.	Безперервне навантаження упродовж 100 годин – зупинка, обробка ІЕС - безперервне навантаження упродовж 100 годин – зупинка, обробка ІЕС – т.д. до руйнування	685	35
5.	Безперервне навантаження упродовж 100 годин – зупинка, повне розвантаження, витримка 24 год. - безперервне навантаження упродовж 100 годин – зупинка, повне розвантаження, витримка 24 год. – т.д. до руйнування	605	27

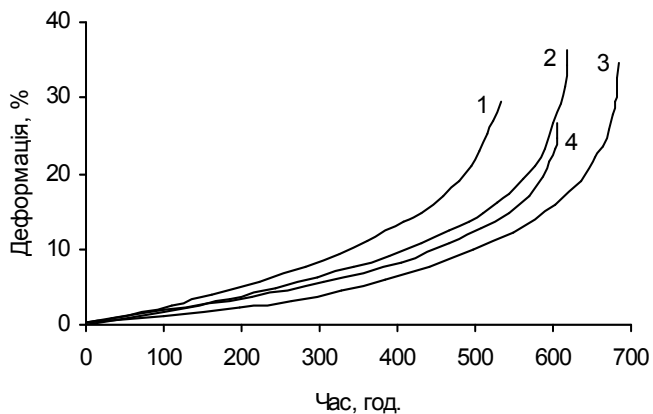


Рисунок 1 - Криві повзучості сталі 12Х1МФ при 540 °С і  $\sigma=190$  МПа: 1 – перша серія зразків, табл. 1; 2 – друга серія; 3 - четверта серія; 4 – п'ята серія.

Треба зазначити, що на відміну від деяких інших методів підвищення опору повзучості, коли поряд з підвищенням часу до руйнування матеріалу істотно знижується його ресурс пластичності [6, 7], при обробці ІЕС деформація до руйнування підвищується на 20 %.

Відзначимо також, що результати випробувань зразків п'ятої серії (табл. 1) також показують приріст часу до руйнування в порівнянні зі зразками, що випробовувалися без зупинок (перша серія, табл.1).

**Результати дослідження мікротвердості матеріалу зразків.** Мікротвердість вимірювали за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні на індентор 100 г. Для приготування шліфів використовували фрагменти робочої ділянки випробуваних зразків. Крім того, з метою більш повного дослідження впливу напрацювання й обробки ІЕС на мікротвердість, додатково були виготовлені шліфи з робочої ділянки зразків: у первинному стані; у стані після витримки під навантаженням упродовж 114 годин (шоста серія); у стані після витримки під навантаженням упродовж 114 годин і обробки ІЕС (сьома серія); у стані після витримки під навантаженням упродовж 114 годин, обробки ІЕС, наступної витримки під навантаженням упродовж 186 годин (восьма серія); у стані після витримки під навантаженням упродовж 114 годин, обробки ІЕС, наступної витримки під навантаженням упродовж 186 годин і обробки ІЕС (дев'ята серія). В зазначених серіях температурно-силові параметри навантаження зразків були аналогічні до перших п'ятьох серій.

Для матеріалу у первинному стані та для матеріалу з кожної досліджуваної серії виконували по двісті замірів мікротвердості уздовж осі зразка. Зауважимо, що на шліфах зі зруйнованих зразків мікротвердість вимірювали тільки на рівномірно розтягнутій області, уникаючи ділянок, які близькі до шийки. Результати вимірів після статистичної обробки представлені в табл. 2.

Таблиця 2 - Результати вимірювання мікротвердості зразків металу

Матеріал	Мікротвердість ( $H_{\mu}$ )			
	Середнє	Мінімальне	Максимальне	Середньоквадратичне відхилення ( $S_{H_{\mu}}$ )
Первинний стан	185	141	113	18
Перша серія	192	136	252	22
Четверта серія	178	146	210	14
П'ята серія	182	144	221	19
Шоста серія	193	130	279	24
Сьома серія	191	148	249	21
Восьма серія	188	134	246	21
Дев'ята серія	187	147	224	17

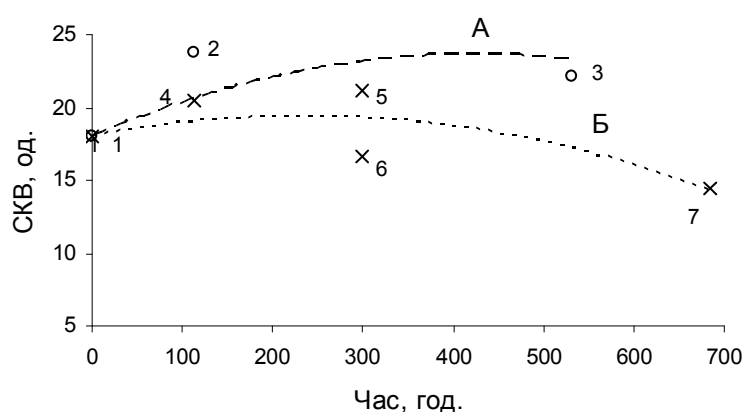


Рисунок 2 - Тенденції зміни середньоквадратичного відхилення мікротвердості  $S_{H_{\mu}}$  матеріалу в залежності від напрацювання при повзучості: крива А – матеріал без обробки (за даними вимірювань на первинному зразку – т. 1, зразках шостої – т. 2, першої – т. 3 серій); крива Б – матеріал з періодичною обробкою ІЕС (за даними вимірювань на первинному зразку – т. 1, зразках сьомої – т. 4, восьмої – т. 5, дев'ятої – т. 6, четвертої – т. 7 серій).

З результатів вимірів мікротвердості матеріалу видно, що середні значення мікротвердості  $\bar{H}_{\mu}$  для різних серій в порівнянні зі значеннями для первинного матеріалу майже не змінюються (у межах  $\pm 4\%$ ), проте значення середньоквадратичного відхилення ( $S_{H_{\mu}}$ ) для цих же серій в порівнянні зі значеннями для первинного матеріалу змінюються більш істотно: від  $-22\%$  до  $+33\%$ . При цьому спостерігаються дві різні тенденції поведінки матеріалу без обробки і при обробці ІЕС (табл. 2, рис. 2): для матеріалу без обробки ІЕС із збільшенням часу

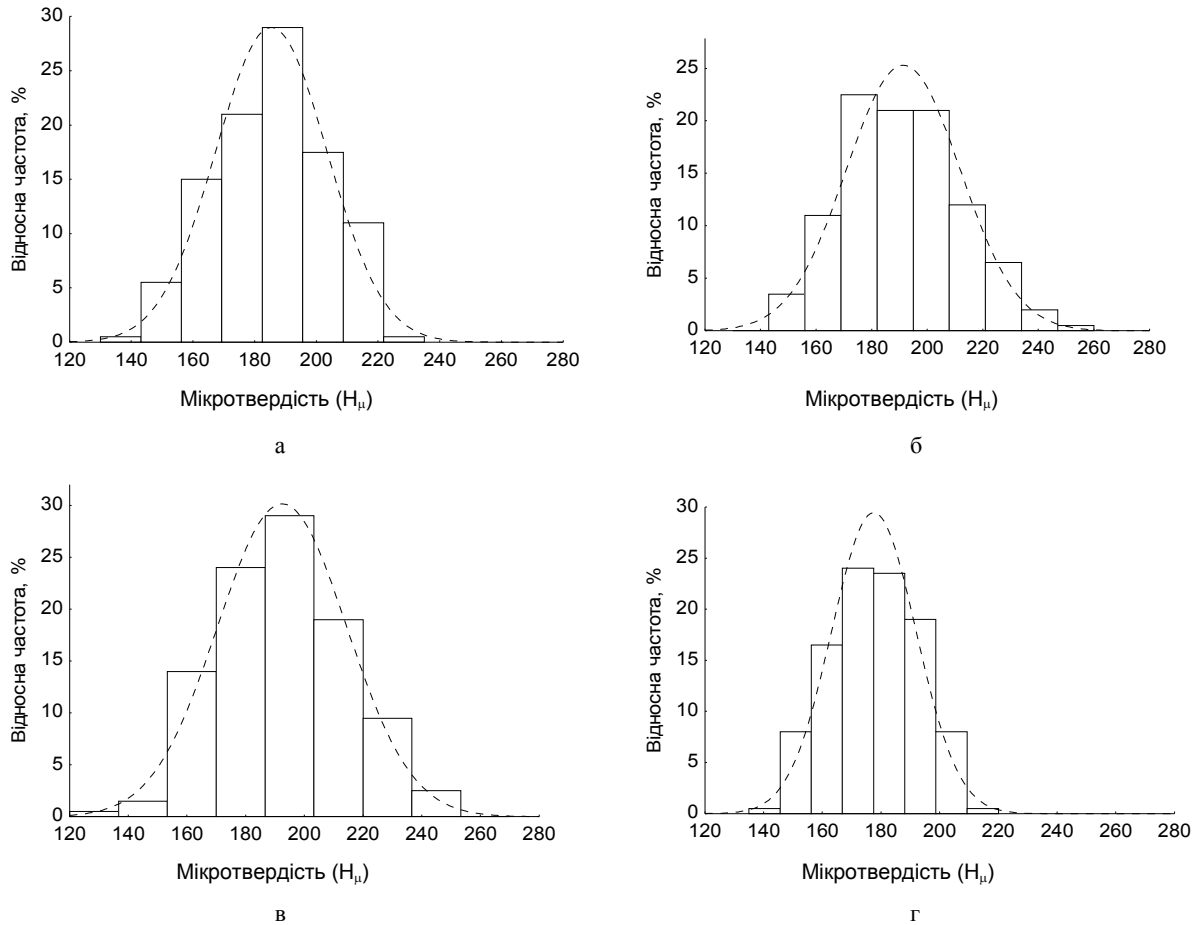


Рисунок 3 - Гістограми і криві щільності нормального розподілу мікротвердості: а – матеріал у первинному стані; б – матеріал після напрацювання 114 годин і обробки ІЕС; в – матеріал першої серії (табл.1); г – матеріал четвертої серії (табл.1).

напрацювання збільшується розсіювання мікротвердості ( $S_{H_{\mu}}$  росте), а для матеріалу після напрацювання та обробки ІЕС розсіювання значень мікротвердості зменшується ( $S_{H_{\mu}}$  зменшується), при цьому багаторазова обробка матеріалу приводить до того, що зразки четвертої серії (табл. 1) показують мінімальне значення  $S_{H_{\mu}}$ .

Значення мікротвердості досить добре відповідають нормальному закономірному розподілу (рис. 3). Використовуючи результати вимірів мікротвердості зразків матеріалу у первинному стані, першої і четвертої серій (табл. 2), побудовано залежності щільності нормального розподілу їхньої мікротвердості  $\varphi(H_{\mu})$ , рис. 4. Із аналізу вказаних залежностей випливає, що періодична обробка ІЕС зменшує розсіювання мікротвердості, що в свою чергу може бути пов'язано із стабілізацією (гомогенізацією) властивостей матеріалу.

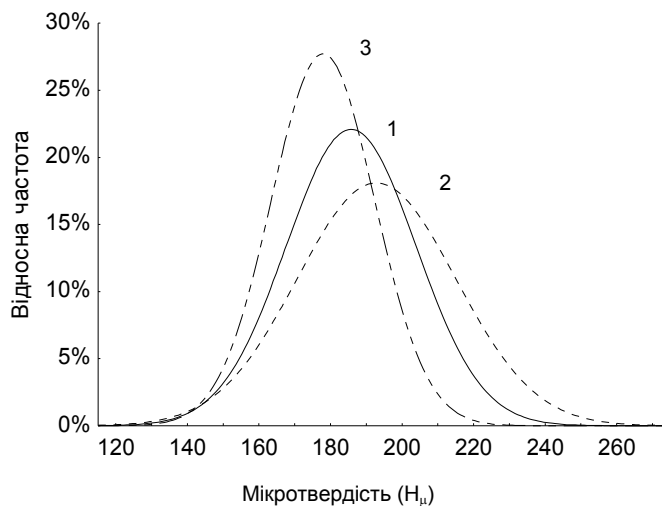


Рисунок 4 - Залежність нормальних щільностей розподілу мікротвердості  $\varphi(H_{\mu})$ : 1 – первинний матеріал; 2 – матеріал першої серії (табл.1); 3 – матеріал четвертої серії (табл.1).

**Обговорення результатів.** На основі аналізу ефекту збільшення розсіювання характеристик твердості матеріалу упродовж його експлуатації [9, 10] було висловлено припущення про те, що за величиною цього розсіювання можна робити висновки про ступінь трансформації структури матеріалу упродовж напрацювання: первинному матеріалу з найкращою організацією структури і низьким ступенем пошкодження відповідає низький рівень розсіювання твердості і навпаки – більше розсіювання твердості відповідає більш пошкодженому матеріалу.

Аналогічні результати були отримані раніше при дослідженні залишкових деформацій за знакозмінного одновісного навантаження сталі 20 при напруженнях 0,8 від межі плинності після різної кількості циклів навантаження [11]: із збільшенням кількості циклів навантаження зростає неоднорідність протікання пластичної деформації, тобто збільшується розсіювання локальної деформації мікрооб'ємів матеріалу. При цьому за великих напрацювань залишкові деформації в деяких об'ємах досягали декількох процентів.

Таким чином, отримані в даній праці та в ряді інших результати експериментальних досліджень свідчать про те, що напрацювання матеріалу супроводжується підвищенням розсіювання його локальних властивостей, ступінь якого може характеризувати деградацію структури матеріалу і його властивостей.

Виходячи з отриманих експериментальних результатів, можна стверджувати, що під дією обробки ІЕС знижується ступінь розсіювання локальних властивостей сталі (її мікротвердість), тобто під дією електричного струму в матеріалі протікають процеси, що «покрощують» його структуру й опір термомеханічному навантаженню. Це проявляється в підвищенні жаростійкості сталі і збільшенні її ресурсу пластичності. Очевидно, що такий позитивний вплив може бути пов'язаний з еволюцією структури матеріалу (формуванні субграніць, двійників, виділенні карбідів та інших відомих ефектів [7, 12]), зокрема, з релаксацією внутрішніх напружень [13], яка супроводжує дію імпульсного електричного струму. В результаті такого комплексного впливу більший об'єм матеріалу бере участь в однорідному деформуванні, що проявляється в підвищенні його механічних властивостей.

Періодичне розвантаження зразків під час експериментів на повзучість (рис.1, крива 4) також впливає на результати випробувань. Очевидно, що збільшення часу напрацювання матеріалу завдяки наявності пауз в експериментах на повзучість, має природу, аналогічну підвищенню границі витривалості в експериментах на втому за наявності перерв в навантаженні.

Загалом можна зробити висновок про те, що обробка ІЕС, з огляду на її низьку вартість і простоту реалізації, заслуговує подальшого вивчення як метод підвищення характеристик міцності та опору руйнування конструкційних металічних матеріалів.

#### **Висновки:**

1. Періодична обробка ІЕС зразків зі сталі 12Х1МФ в процесі випробувань на повзучість призводить до росту характеристик пластичності та жаростійкості сталі.
2. Напрацювання сталі 12Х1МФ в умовах термомеханічного навантаження супроводжується підвищенням розсіювання її мікротвердості.
3. Обробка сталі 12Х1МФ імпульсним струмом після різного її напрацювання в умовах повзучості зменшує розсіювання мікротвердості.
4. Однією з подальших задач є дослідження еволюції структури сталі 12Х1МФ під час повзучості, впливу на структуру обробки ІЕС, включаючи періодичні зупинки і паузи при випробуваннях.

*The results of experimental studies of the influence of impulse electric current treatment on high-temperature creep of the specimens produced from high-temperature strength steel 12Kh1MF are presented. The positive influence of the treatment on the heat resistance and scattering decrease of the microhardness of specimens follows from the test results. The explanation of the observed influence of treatment on the behavior of material is proposed.*

#### **Література**

1. Доронин Ю.Л. Исследование возможностей повышения конструкционных и эксплуатационных характеристик деталей летательных аппаратов импульсным воздействием высокоэнергетического электромагнитного поля // Автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. техн. наук.- Москва, 1992.- 18 с.
2. Володин В.Л., Бадьина М.И., Сарычев В.Л., Кудашкина А.Н. Исследование структуры и свойств высокомарганцовистых сталей после воздействия импульсных электрических токов // Известия ВУЗов. Черная металлургия.- 1992.- №6.- С.98-99.
3. Коновалов С.В., Соснин О.И. и др. Повышение надежности изделий из среднеуглеродистых сталей импульсным токовым воздействием // Ремонт, восстановление, модернизация.- 2002.- №3.- С.19-23.
4. Беклемишев Н.Н., Корягин Н.И., Шапиро Г.С. Влияние локального неоднородного импульсного электромагнитного поля на пластичность и прочность проводящих материалов // Металлы.- 1984.- №4.- С.184-187.
5. Соснин О.В., Громов В.Е., Козлов Э.В. Электростимулированная малоцикловая усталость.- М.: Недра Комуникейшенс Лтд, 2000.- 208 с.
6. Гордиенко Л.К. Термомеханическое воздействие как эффективный способ реализации ресурсов жаропрочности // Металл в современных энергоустановках.- М.: Энергия, 1969.- С.3-15.
7. Олисов А.Н., Маслаков А.В. Влияние импульсного нагружения на ползучесть поврежденного эксплуатацией материала паропроводов // Пробл. прочности.- 1992.- №7.- С.56-59.
8. Степанов Г., Бабуцкий А., Чижик Г. Статистична природа впливу імпульсного електричного струму на механічні властивості металів // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2005. - №2. – С. 11-17.
9. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Волчек Н.Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. - 2002. - №4. – С. 5-11.
10. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Волчек Н.Л., Недосека С.А. Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования // Там же. - 2003. - №2. – С. 29-36.
11. Гурьев А.В., Митин В.Я. Особенности развития локальных микрон неоднородных деформаций и накопление усталостных повреждений в углеродистых сталях // Там же. – 1978. – №11. – С.19-23
12. Коваленко В.В. Структурные превращения в нержавеющей стали при электростимулированной малоцикловой усталости // Автореф. дис. на соиск. ученой степ. канд. физ.-мат. наук.- Барнаул, 2001.- 20 с.
13. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. Воздействие электрического тока на релаксацию напряжений в металле // Пробл. прочности.- 1996.-№2.- С.125-128.

*Одержано 24.10.2005 р.*