

## Взаємозв'язок пошкодження сталі 10ГН2МФА з параметрами жорсткого малоциклового навантаження за різних частот деформування

Ф. Ф. Гігняк, О. М. Масло

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

*Досліджено кінетику пошкоджуваності сталі 10ГН2МФА при жорсткому циклічному навантаженні методом ЛМ-твердості для аналізу особливостей розвитку цього процесу та визначення параметрів граничного стану матеріалу. Наведено результати експериментальних досліджень кінетики пошкоджуваності указаної сталі при однобічному жорсткому циклічному навантаженні за різних частот деформування.*

**Ключові слова:** пошкоджуваність, метод ЛМ-твердості, жорстке знакозмінне циклічне навантаження, частота деформування.

**Вступ.** Сучасні уявлення механіки континуальних пошкоджень дозволяють розглядати накопичення пошкоджень матеріалу як процес його поступової деградації, але як такий, що не ідентичний незворотній пластичній деформації [1, 2]. Дефектам, що відповідають накопиченню та локалізації дислокацій, властивий більший ступінь незворотності в порівнянні з пластичною деформацією. Окрім того, більшість квазі-крихких матеріалів деформується за рахунок накопичення пошкоджень.

Оцінка деградації матеріалу елементів конструкцій, що виникає у процесі їх виготовлення та експлуатації, потребує використання критеріїв граничного стану матеріалу з урахуванням пошкоджуваності. Достовірні методи визначення параметрів пошкоджуваності матеріалу ґрунтуються на аналізі реальних механізмів пластичної плинності та руйнування на мікрорівні [3–6].

Із точки зору практичного застосування найбільш актуальними з них є неруйнівні методи, що дозволяють визначати параметри деградації структурно-чутливих механічних характеристик матеріалу елементів конструкцій безпосередньо в ході експлуатації. Одним із таких методів є метод ЛМ-твердості [7], де як параметр пошкоджуваності використовується коефіцієнт гомогенності металу  $m$ , який характеризує степінь розсіяння властивостей металу та визначається за формулою Гумбеля, яка стосовно випробувань на твердість має такий вигляд:

$$m = \frac{d(n)}{2,30259S(\lg H)}, \quad (1)$$

де  $d(n)$  визначається в залежності від кількості  $n$  вимірювань твердості  $H$ .

На сьогодні накопичено значний об'єм експериментальних даних щодо оцінки пошкодження конструкційних металічних матеріалів різного класу за методом ЛМ-твердості, зокрема в умовах одноразового м'якого та пульсуючого навантаження [8–12]. Зазначимо, що при дослідженні кінетики пошкоджуваності можливе використання відносного коефіцієнта гомогенності у вигляді [12]

$$m_{\text{вдн}} = m_i / m_{\text{вих}}, \quad (2)$$

де  $m_i$  – значення коефіцієнта гомогенності, що отримані на основі обробки вимірювань твердості металу зразка після нормованого числа циклів навантаження;  $m_{\text{вих}}$  – величина коефіцієнта гомогенності металу у вихідному стані.

Для вивчення кінетики пошкоджуваності сталі 10ГН2МФА при жорсткому знакозмінному циклічному навантаженні за допомогою методу ЛМ-твердості, а також оцінки параметрів пошкоджуваності, що характеризують граничний стан матеріалу, та визначення впливу експлуатаційних факторів, а саме: амплітуди деформацій циклу і частоти навантаження на цей процес, було проведено дослідження в умовах однобісного циклічного навантаження при  $R_e = -1$ .

При аналізі отриманих результатів досліджень потрібно враховувати особливості розвитку процесів активного пластичного деформування та їх вплив на пластичні деформації різних мікрочастин металу [13]. Окрім того, важливим аспектом врахування пружно-пластичних деформацій на мікрорівні є дія ефекту Баушингера. Нерівномірність пластичної деформації на внутрішньозеренному рівні та зумовлене нею пластичне зменшення при зміні знака навантаження суттєво впливають на характеристики матеріалу, зокрема на твердість, при знакозмінному жорсткому навантаженні.

В умовах жорсткого знакозмінного циклічного навантаження з достатньо великими амплітудами деформації потрібно враховувати особливості напрямку розвитку процесів активного пластичного деформування і вплив самозрівноважування напружень, що виникають на мікрорівні, та відповідних їм деформацій, на які витрачається 10...15% загального об'єму роботи, що витрачена на пластичне деформування. Необхідно також відмітити, що при жорсткому знакозмінному навантаженні, як показали експериментальні дослідження [14], обов'язково виникає релаксація напружень. Зазначимо, що будь-яка пластична деформація, якою б малою вона не була, незалежно від знака супроводжується залишковим збільшенням об'єму тіла, тобто пластичним розпушуванням, що свідчить про пошкодження (зміну) структури (поява мікропор, мікротріщин та ін.).

**Методи досліджень.** Як параметр пошкоджуваності використовували відносний коефіцієнт гомогенності  $m_{\text{відн}}$  (2), який визначався за розсіянням значень твердості по Брінеллю після певного числа циклів навантаження зразка (рис. 1). Для цих циклів на основі отриманих діаграм деформування визначалися наступні характеристики петлі гістерезису (рис. 2): максимальні та мінімальні амплітудні значення напружень  $\sigma_a$ ; умовні циклічні границі плинності  $\sigma_{0,2p}$  і  $\sigma_{0,2c}$  та циклічні модулі пружності  $E_p$  і  $E_c$  відповідно при розтягуючому і стискаючому навантаженні у циклі. Досліджували суцільні циліндричні зразки при амплітудах деформації  $\varepsilon_a$  у діапазоні 0,35...0,6% за частот навантаження 0,2 і 0,03 Гц.

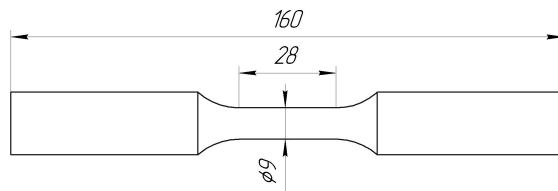


Рис. 1. Зразок для випробувань на малоциклову втому при жорсткому циклічному навантаженні.

Параметри діаграми деформування зразків фіксувалися автоматично протягом всього часу навантаження. Коефіцієнт гомогенності матеріалу зразків визначався для непошкодженого матеріалу та після напрацювання. Твердість вимірювалася на робочій поверхні у напрямку вздовж осі зразка для проміжних етапів навантаження.

**Результати досліджень та їх обговорення.** На рис. 3, 4 наведено залежності відносного коефіцієнта гомогенності  $m_{\text{відн}}$  та амплітуди напружень циклу  $\sigma_a$  від числа циклів навантаження  $N$ . Значення  $m_{\text{відн}} = 1$  відповідає матеріалу у вихідному стані.

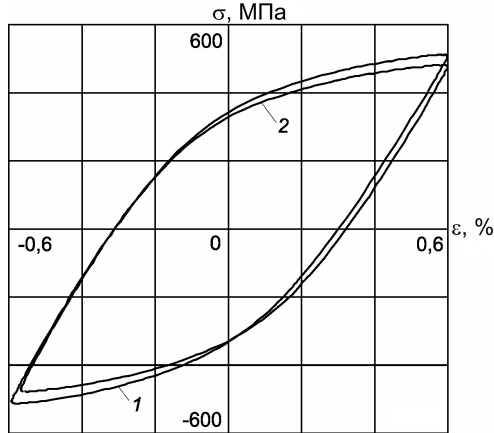


Рис. 2. Порівняння окремих циклів діаграми циклічного деформування зразків зі сталі 10ГН2МФА: 1 –  $N = 50$  цикл; 2 –  $N = 450$  цикл.

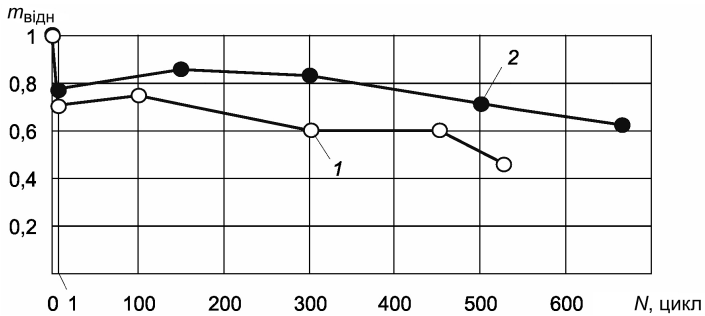


Рис. 3. Залежність відносного коефіцієнта гомогенності  $m_{\text{відн}}$  сталі 10ГН2МФА від числа циклів  $N$  за одновісного жорсткого циклічного навантаження при  $R_\epsilon = -1$  для  $\epsilon_a = 0,6\%$  за різних частот. Тут і на рис. 4–7: 1 –  $f = 0,03$  Гц; 2 –  $f = 0,2$  Гц.

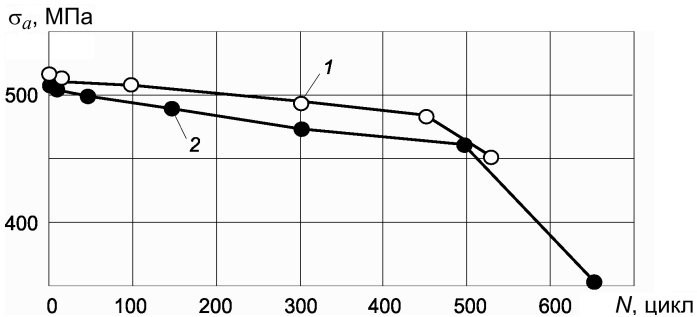


Рис. 4. Залежність амплітуди напружень циклу  $\sigma_a$  від числа циклів  $N$  для  $\epsilon_a = 0,6\%$  за різних частот навантаження.

Характер зміни відносного коефіцієнта гомогенності дозволяє виділити кілька стадій накопичення пошкодження при вищезазначеному виді навантаження.

Зокрема, на перших циклах навантаження мають місце інтенсивні зміни гомогенності металу зразка відносно вихідного стану перед навантаженням, що характеризуються різким зменшенням відносного коефіцієнта гомогенності.

При подальшому навантаженні спостерігається стабілізація процесу накопичення пошкоджень металу, яка характеризується коливаннями величини параметра по-

шкоджуваності навколо деякого середнього значення. Враховуючи вищеописані особливості розвитку процесів пластичного деформування при жорсткому знакозмінному навантаженні, цю стадію процесу накопичення пошкоджень у цілому можна вважати усталеною.

Характер зміни відносного коефіцієнта гомогенності  $m_{\text{відн}}$ , отриманого за вимірюваннями твердості зразка, в основному відповідає зафіксованим змінам амплітуди напружень циклу  $\sigma_a$ . Це дозволяє за допомогою достатньо простих дослідів одержати якісну картину пошкодження структури сталі 10ГН2МФА, що корелює з відомими даними щодо стадій деградації структури матеріалу у процесі напрацювання [5, 10].

При збільшенні частоти навантаження з 0,03 до 0,2 Гц на кривій накопичення пошкодження відмічаються такі ж стадії розвитку, як і за низької частоти.

Як видно з наведених на рис. 5 даних, зростання частоти навантаження у дослідженому діапазоні амплітуд циклу деформацій призводить до уповільнення темпу накопичення пошкоджень металу для амплітуд деформації  $\varepsilon_a \geq 0,35\%$ . Це, очевидно, пов'язано зі зміною локалізації спотворень кристалічної решітки за різних частот або амплітуд деформації та релаксацією напружень, що зумовлює зниження опору пластичній деформації при більш низькій частоті або більш високій амплітуді. Указане явище детально розглянуто у [15]. Таким чином, при однаковій амплітуді деформації циклу  $\varepsilon_a$  за частоти 0,03 Гц релаксація напружень внаслідок зміни напрямку деформування у кожному циклі навантаження встигає розвинути більш повно, ніж за частоти 0,2 Гц. Це сприяє інтенсивнішому зменшенню величин  $m_{\text{відн}}$  у процесі циклічного навантаження за нижчої частоти та числа циклів до руйнування зразка за меншої частоти навантаження для однакових величин  $\varepsilon_a$ . Також відзначимо, що, на відміну від амплітуди напружень циклу  $\sigma_a$ , відносний коефіцієнт гомогенності  $m_{\text{відн}}$  значно змінюється на першому циклі навантаження.

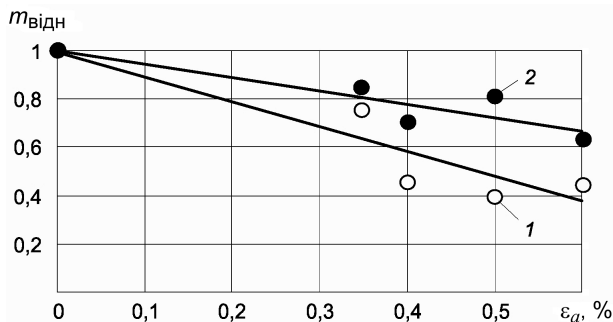


Рис. 5. Залежність відносного коефіцієнта гомогенності  $m_{\text{відн}}$  сталі 10ГН2МФА від амплітуди деформації циклу  $\varepsilon_a$  для граничних значень числа циклів  $N$  за одновісного жорсткого циклічного навантаження при  $R_\varepsilon = -1$  і різних частотах.

Проведені дослідження дозволяють оцінити вплив параметрів циклічного деформування у процесі жорсткого циклічного навантаження на зміну пошкодження металу та деградацію його фізичних властивостей в процесі напрацювання (рис. 6, 7).

При аналізі отриманих залежностей необхідно враховувати, що отримані методом ЛМ-твердості експериментальні дані щодо оцінки пошкоджуваності металу є інтегральними характеристиками процесу навантаження за повний цикл деформування, що не дозволяє встановити особливості накопичення пошкоджень окремо в кожному півциклі. Також зазначимо, що при підвищенні частоти навантаження та амплітуди деформації  $\varepsilon_a$  помітно зменшується розсіяння експериментальних даних (рис. 6, 7). Для малих значень пластичних деформацій ( $\varepsilon_a \leq 0,4\%$ ) величина розсіяння нівелює вплив частоти деформування, але дозволяє якісно оцінити пошкоджуваність матеріалу. У першому наближенні для проміжних стадій навантаження взаємозв'язок

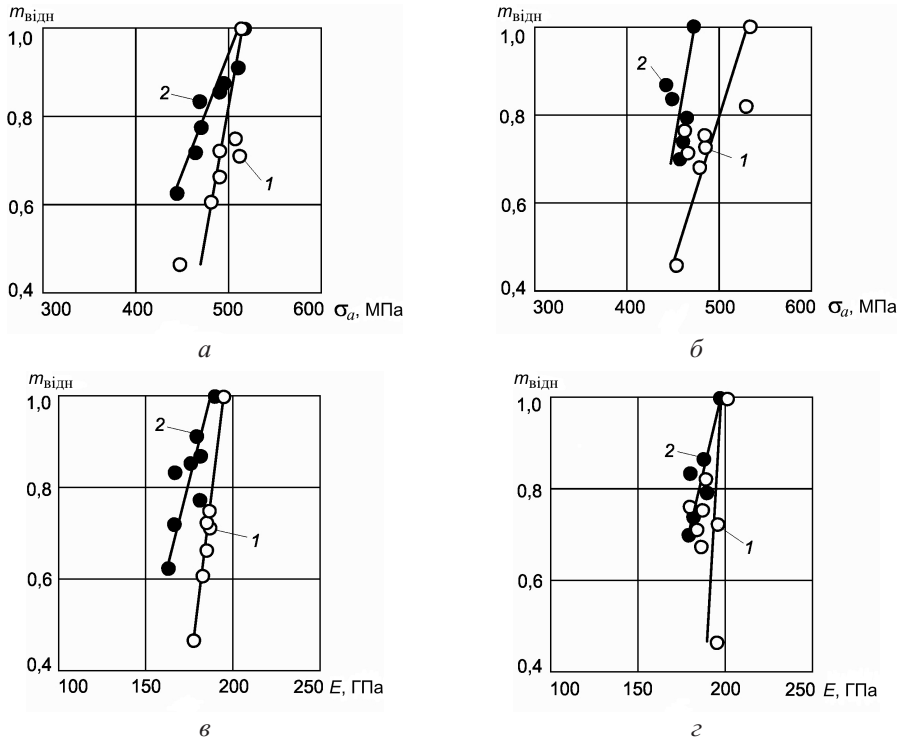


Рис. 6. Залежність відносного коефіцієнта гомогенності  $m_{\text{вiдн}}$  металу від зміни амплітуди напружень циклу  $\sigma_a$  (а, б) та модуля пружності при розтязі  $E$  (в, г) сталі 10ГН2МФА при однобічному жорсткому циклічному навантаженні при  $R_\epsilon = -1$  за різних амплітуд деформації: а, в –  $\epsilon_a = 0,6\%$ ; б, г –  $\epsilon_a = 0,4\%$ .

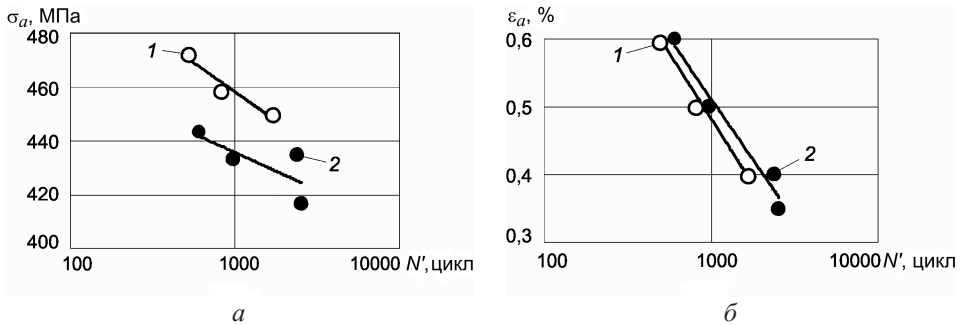


Рис. 7. Залежність амплітуди напружень циклу  $\sigma_a$  (а) та деформації за цикл  $\epsilon_a$  (б) від числа циклів  $N'$  до появи тріщин за однобічного жорсткого циклічного навантаження при  $R_\epsilon = -1$  для різних частот.

$m_{\text{вiдн}}$  з фізичними характеристиками сталі 10ГН2МФА можна вважати лінійним. Зі зменшенням величини відносного коефіцієнта гомогенності  $m_{\text{вiдн}}$  до 0,6 при  $\epsilon_a = 0,6\%$  та до 0,65...0,7 при  $\epsilon_a = 0,4\%$  амплітуда напружень циклу  $\sigma_a$  (рис. 4) знижується приблизно на 15%. При цьому на робочій поверхні зразка відмічаються тріщини довжиною до 1 мм. У рамках проведених досліджень вищезказані явища вважаються такими, за яких метал зразка втрачає несівну здатність. Подальше циклічне навантаження завершується квазістатичним руйнуванням, що характерно для всіх реалізованих амплітуд деформацій  $\epsilon_a$ .

З отриманих експериментальних даних також видно, що збільшення частоти навантаження на порядок призводить до зміни амплітуди максимальних напружень циклу  $\sigma_a$  на величину 6...8%. Число циклів навантаження до появи тріщин  $N'$  при цьому змінюється незначно (рис. 7). Відносний коефіцієнт гомогенності  $m_{\text{відн}}$ , на відміну від  $\sigma_a$ , вже при  $\varepsilon_a = 0,6\%$  має значно більшу (близько 20%) чутливість до зміни механічних характеристик матеріалу.

Експериментально встановлені особливості кінетики пошкоджуваності при жорсткому знакозмінному циклічному навантаженні в цілому відповідають відомим закономірностям накопичення пошкоджень. Отримані дані дозволяють оцінити вплив кінетики пошкоджуваності на довговічність сталі 10ГН2МФА у процесі жорсткого навантаження, що свідчить про можливість використання методу ЛМ-твердості з коефіцієнтом  $m_{\text{відн}}$  для дослідження пошкодження металу при даному виді навантаження. Показано можливість застосування методу для оцінки деградації механічних характеристик матеріалу достатньо простим способом та визначення характеристик пошкоджуваності елементів конструкцій, що потребують неруйнівного контролю стану структури матеріалу.

## Висновки

1. Експериментальні дослідження сталі 10ГН2МФА в умовах одновісного жорсткого циклічного навантаження при  $R_\varepsilon = -1$  за різних частот навантаження та амплітуд деформацій циклу  $\varepsilon_a \geq 0,35\%$  дозволили обґрунтувати використання методу ЛМ-твердості для оцінки пошкодження металу в даних умовах експлуатації елементів конструкцій.

2. За результатами досліджень встановлено особливості кінетики пошкоджуваності металу та оцінено діапазон граничних значень відносного коефіцієнта гомогенності  $m_{\text{відн}}$ , які відповідають початку стадії руйнування.

3. Встановлено взаємозв'язок параметрів жорсткого циклічного деформування, а саме: амплітуди деформації та частоти навантаження з характеристиками пошкоджуваності.

4. Експериментально зафіксовано сповільнення темпу пошкоджуваності металу з підвищенням частоти навантаження.

5. Показано, що відносний коефіцієнт гомогенності  $m_{\text{відн}}$  чутливий до зміни частоти деформування.

## Резюме

Исследована кинетика повреждаемости стали 10ГН2МФА при жестком циклическом нагружении методом ЛМ-твердости для анализа особенностей развития этого процесса и определения параметров предельного состояния материала. Приведены результаты экспериментальных исследований кинетики повреждаемости данной стали при одноосном жестком циклическом нагружении при разных частотах деформирования.

1. *Lemaitre J.* A continuous damage mechanics model for ductile fracture // J. Eng. Mater. Tech. – 1985. – **107**. – P. 83–89.
2. *Гігіняк Ф. Ф., Лебедєв А. О., Шкодзінський О. К.* Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка, 2003. – 270 с.
3. *Писаренко Г. С., Лебедєв А. А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 415 с.
4. *Lemaitre J. and Dufailly J.* Damage measurement // Eng. Fract. Mech. – 1987. – **28**, Nos. 5-6. – P. 643–661.

5. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2004. – 133 с.
6. Бобир М. І., Халімон О. П., Бондарець О. А. Моделювання кінетики накопичення розсіяних пошкоджень при складному напруженому стані // Пробл. прочности. – 2012. – № 1. – С. 30–38.
7. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Там же. – 2002. – № 4. – С. 5–11.
8. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А., Можаровская Т. Н. Кинетика накопления повреждений теплоустойчивых сталей при различных режимах нагружения // Там же. – 2010. – № 1. – С. 120–126.
9. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Музыка Н. Р., Швец В. П. Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоцикловом нагружении // Там же. – 2008. – № 2. – С. 5–10.
10. Швец В. П., Дегтярев В. А., Музыка Н. Р., Масло А. Н. Оценка повреждаемости зон сварного соединения малоуглеродистой стали в условиях циклического нагружения // Там же. – 2013. – № 2. – С. 106–113.
11. Гопкало А. П., Музыка Н. Р., Рутковский А. В., Швец В. П. Влияние PVD-покрытий на сопротивление деформации и малоциклового усталости нержавеющей стали и титановых сплавов // Там же. – 2011. – № 6. – С. 23–39.
12. Булах П. А. Исследование развития процесса накопления повреждений в металле при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Там же. – 2011. – № 2. – С. 122–127.
13. Новожилов В. В., Кадашевич Ю. И. Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.
14. Жданова В. Н. Рентгенографические исследования в структуре металлов, деформированных растяжением // Исследования по физике твердого тела. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 152–158.
15. Уравнения состояния при малоцикловом нагружении / Под ред. Н. А. Махутова. – М.: Наука, 1981. – 245 с.

Поступила 12. 07. 2016