

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПОШКОДЖУВАНOSTІ СТАЛІ 10ГН2МФА В УМОВАХ РЕЛАКСАЦІЇ ПРИ СТУПІНЧАТОМУ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Ф.Ф. Гігіняк, П.О. Булах

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

The article presents the results of studying the influence of the relaxation process on the kinetics of the accumulation of damage to 10GN2MFA steel under conditions of stepwise static loading.

Вступ. Більшість елементів конструкцій експлуатуються довготривалий час в напруженому стані. Для оцінки впливу релаксаційних процесів на напружено-деформований стан використовуються співвідношення теорії в'язко-пружності, параметри яких визначаються з експериментальних даних, отриманих з випробувань на повзучість, циклічну повзучість та релаксацію. Адже саме релаксаційні процеси визначають в'язко-пружні властивості і впливають на властивості міцності матеріалів. Точність прогнозу залежить від величини бази випробувань. Чим довша тривалість випробувань, тим точніше значення параметрів прийнятих співвідношень і тим вища точність прогнозованих рівнів напружень і деформацій в досліджуваному елементі конструкції.

Як було показано в [1, 2], фізична сутність явищ, що відбуваються при ступінчастому циклічному і ступеневому статичному навантаженні, однакова.

Деформація, накопичена на першій стадії повзучості, і в першому, і в другому випадках буде обумовлюватися релаксаційними процесами локальних пружних напружень в структурі матеріалу, що виникають в результаті швидкісних ефектів деформації. При досягненні рівноважного стану накопичення незворотних деформацій швидко згасає, і вид руйнування в цих умовах циклічного навантаження буде втомним. Якщо ж рівноважний стан не буде досягнуто при певному рівні максимального навантаження, то накопичення незворотних деформацій в умовах циклічної повзучості призводить до втрати стійкості процесу деформування, що закінчується квазістатичним руйнуванням, ідентичним руйнуванню, що спостерігається при одноразовому навантаженні, або повзучості при напруженні, рівному максимальному значенню напруження циклу.

Отже, основні закономірності, які спостерігаються при циклічній повзучості в залежності від максимального рівня напружень циклу при ступінчастому циклічному навантаженні повинні відповідати закономірностям, які спостерігаються при ступінчастому статичному навантаженні. Квазістатичні діаграми при ступінчастому статичному навантаженні будуть характеризувати деформаційні властивості дослідженої сталі при ступінчастому циклічному навантаженні. Рівноважний стан буде характеризуватися квазістатичною рівноважною діаграмою деформування, представленою в узагальнених напруженнях і деформаціях.

Використовуючи даний підхід можна суттєво скоротити фізичний і матеріальний ресурс для проведення експериментальних досліджень для отримання характеристик в'язко-пружних характеристик.

Методика експерименту і аналіз експериментальних даних. Експериментальні дослідження для вивчення кінетики накопичення пошкоджуваності під час релаксації проводились на трубчатих тонкостінних зразках виготовлених із сталі 10ГН2МФА у вихідному стані. Для цього проведено цикл випробувань на при статичному ступінчастому навантаженні в умовах нерівномірного двовісного розтягу при постійній швидкості деформування $\dot{\epsilon}=0,025\%/с$. При цьому на етапі навантаження на початку і

наприкінці інтервалу повзучості у режимі релаксації досягався рівноважний напружено-деформований стан.

На рис.1 зображена діаграма деформування, отримана за умов такого навантажування.

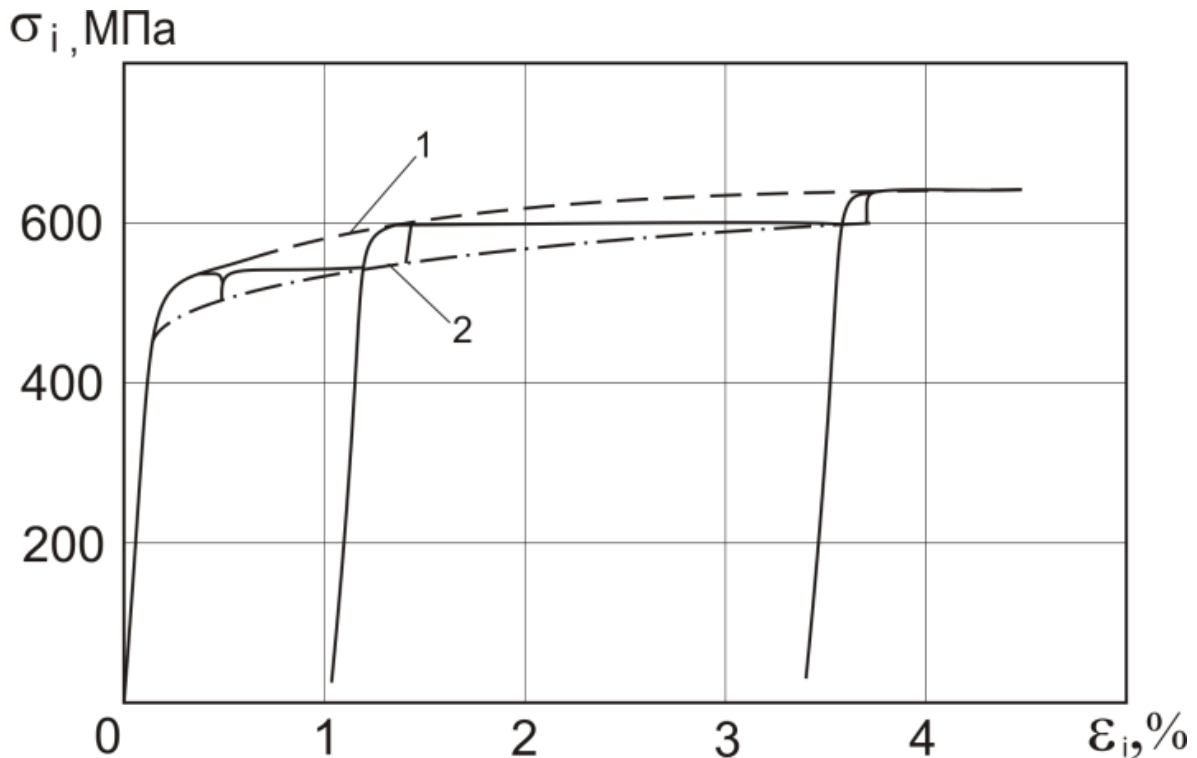


Рис. 1. Діаграма деформування сталі 10ГН2МФА в еквівалентних напруженнях і деформаціях в умовах нерівномірного двовісного ступінчатого статичного навантаження при $T=20^{\circ}\text{C}$ і швидкістю деформування $\dot{\epsilon}=0,025\%/с$. Тут 1 - узагальнена дійсна діаграма деформування, 2 - рівноважна квазістатична діаграма деформування.

Рівень деградації матеріалу перед початком випробувань, або після напрацювання, адекватний рівню його структурної неоднорідності, яка може бути оцінена статистичними характеристиками розсіювання чисел твердості при багаторазових вимірюваннях. Тому в якості характеристики розсіювання механічних властивостей обраний коефіцієнт m гомогенності методу LM-твердості[3], що визначається за формулою Гумбеля

$$m = \frac{d(n)}{2,30259} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де $d(n)$ – функція числа вимірювань $n (n \geq 15)$; H_i – твердість матеріалу при i -му вимірюванні; $\overline{\lg H}$ – середнє значення логарифмів числових значень твердості.

При обробці результатів досліджень використовувалися відносні величини коефіцієнта гомогенності розраховані за [4]:

$$m_{\text{відн}} = m_i / m_{\text{поч}}, \quad (2)$$

де m_i – поточне значення коефіцієнта гомогенності, розраховане за результатами замірів твердості металу зразка після поточного блоку циклічного навантаження при заданому рівні навантаження; $m_{\text{поч}}$ – значення коефіцієнта гомогенності, отримані за результатами обробки вимірів твердості перед початком випробувань.

Раніше отримані нами [5] результати при дослідженні кінетики накопичення пошкоджень в умовах ступінчатого навантаження, показують, що відносний коефіцієнт гомогенності $m_{\text{відн}}$ є параметром чутливим до величини накопиченої деформації, рівня максимального напруження циклу та кількості циклів напрацювання (рис. 2).

В ході проведення експериментальних випробувань, на першій ступені деформування (навантаження – релаксація – повзучість – релаксація – розвантаження) було проведено дослідження впливу релаксації на пошкоджуваність матеріалу.

Відомо [1], що в процесі непружного деформування мають місце структурні зміни різного характеру. При цьому пружну деформацію зв'язують з пружними викривленнями кристалічної решітки, пластичну - з множинним ковзанням при високих рівнях напружень, в'язку (деформацію повзучості) - з ковзанням по границям зерен, що супроводжуються локальними викривленнями кристалічної решітки окремих зерен. При цьому кількість локальних викривлень структури металу залежить від швидкості деформації. Зупинка, яка має місце в кожному циклі навантаження, призводить до релаксації напружень які спричиняють місцеві викривлення решіток окремих зерен (пікові напруження). Відмінність рівня локальних пікових напружень від середньої напруження щодо всього об'єму матеріалу що навантажується, є головним фактором - рушійною силою релаксації. Оскільки коефіцієнт гомогенності залежить від рівня напружень [6], то можемо бачити падіння його величини (тобто активне накопичення пошкоджень) під час релаксації (рис.3).

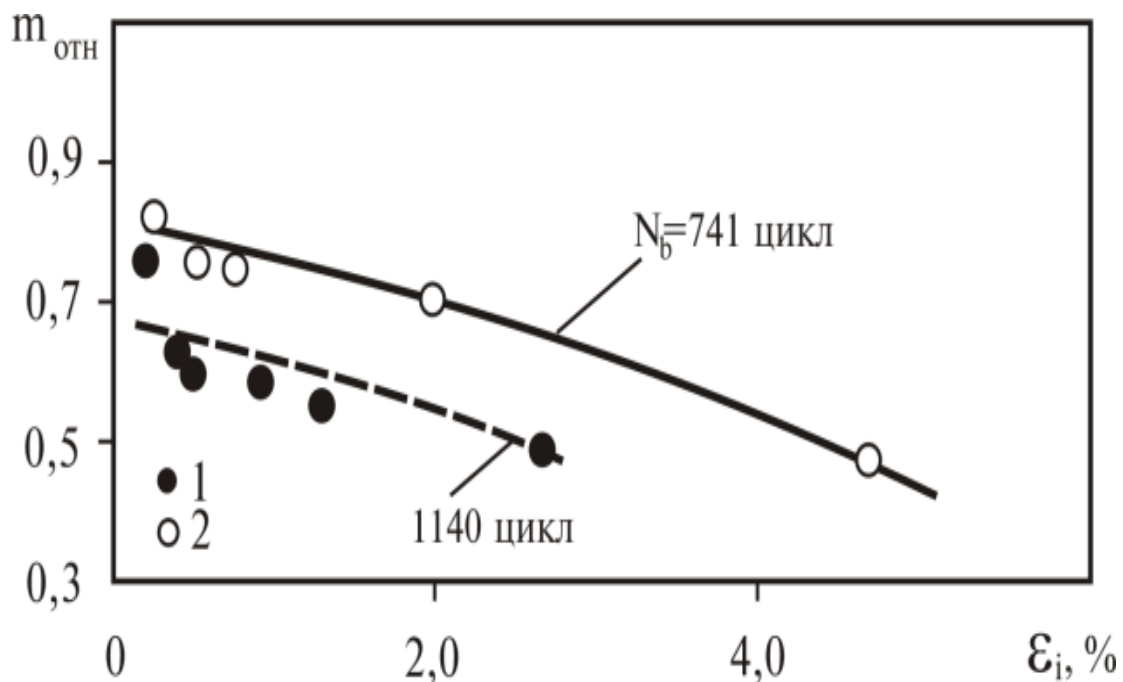


Рис.2. Експериментально встановлені залежності відносного коефіцієнта гомогенності від величини накопиченої інтенсивності деформації повзучості ε_i в умовах ступінчатого статичного навантаження сталі 10ГН2МФА при нерівномірному двовісному розтязі. При різних рівнях максимальної інтенсивності напружень: 1 – $\sigma_{i\max}/\sigma_{ib} = 0,972$; 2 – $\sigma_{i\max}/\sigma_{ib} = 0,987$ ($\sigma_{ib} = 630 \text{ МПа}$)

Після зменшення рівня пікових напружень процес релаксації затухає і напружено-деформований стан об'єкта (деформованого об'єму металу) досягає рівноваги. Тобто релаксація локальних пікових напружень супроводжується актами деформації зсуву в кристалічних зернах, що призводить до утворення остаточної деформації, природа якої така ж, як і одномоментальна пластична деформація. При цьому процес накопичення пошкоджень переходить на стадію уповільнення, що видно з даних рис.3.

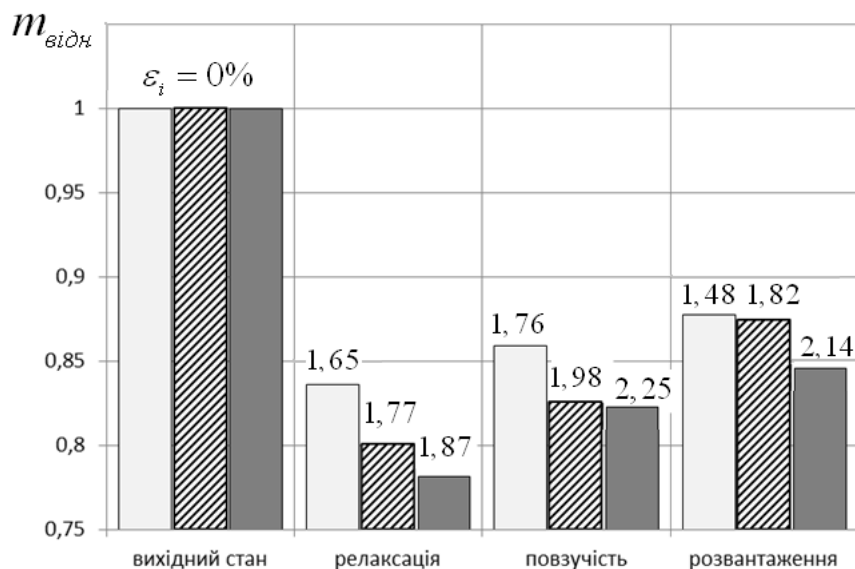


Рис.3. Зміна величини відносного коефіцієнта гомогенності та інтенсивності деформацій в процесі ступінчатого статичного навантаження.

Висновки. Аналіз отриманих результатів показує, що існують закономірності зміни коефіцієнта гомогенності $m_{відн}$ в процесі деформування матеріалу в залежності від напруження. А також встановлено, що коефіцієнт $m_{відн}$ є параметром чутливим до величини накопиченої деформації та рівню максимальних напружень циклу.

Отримані експериментальні данні свідчать про те, що коефіцієнт гомогенності може бути використаний як параметр для оцінки контролюрізних фізико-механічних властивостей в процесі експлуатації елемента конструкції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гігіняк Ф.Ф., Лебедев А.О., Шкодзінський О.К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка, 2003. – 270 с.
2. Гигиняк Ф.Ф., Булах П.А. Усовершенствование упруго-вязкопластической модели деформирования с учетом повреждаемости металла при циклическом нагружения // Пробл. прочности. – 2012. – №.4 – С.102-109.
3. Патент 25197А, МКИ 7, G 01 N 3/00, G 01, N 3/40. Спосіб оцінки деградації матеріалу в наслідок накопичення пошкоджень в процесі напруження “LM-метод твердості” // Лебедев А.О., Музыка М.Р., Волчек Н.Л. – Опубл. 15.01.03. – Бюл. №1.
4. Гигиняк Ф.Ф., Булах П.А. Повреждаемость теплоустойчивых сталей с учетом условий, имитирующих работу энергетического оборудования. // Пробл. прочности. – 2014. – N5. - С.61-68.
5. Булах П.А. Исследование развития процесса накопления повреждений в металле при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Пробл. прочности. - 2011. - №2. - С.122-127.
6. Лебедев А.А., Голубовский Е.Р., Локощенко А.М., Музыка Н.Р., Ламашевский В.П., Швец В.П., Ефименко Е.В. Оценка предельных уровней рассеянных повреждений в материалах при стационарных режимах статического и циклического нагружения.// Пробл. прочности. – 2012. – №6. – С.5 – 13.