

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРУ НА КІНЕТИКУ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ТЕПЛОСТІЙКИХ МАТЕРІАЛІВ**П.О. Булах¹, О.М. Масло¹, Т.М. Можаровська²**¹ Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Україна² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

The paper presents the analysis of the laws of the influence of the form of the stressed state on the damage kinetics of heat-resistant steels of 10GN2MFA and 15X2MΦA under conditions of cyclic loading in the range of operating temperatures.

Вступ. Розвиток науки про міцність інженерних виробів вимагає безперервного розвитку й уточнення існуючих уявлень про механічні властивості матеріалів, особливо в зв'язку з інтенсифікацією роботи енергогенеруючих об'єктів, експлуатації транспортних систем, виникнення ряду проблем, що відносяться до безпеки, зокрема техногенного ризику. Це безпосередньо пов'язано із науковим обґрунтуванням методів оцінки продовження ресурсу машин, високонавантажених споруд та конструкцій, в тому числі залишкового, для об'єктів близьких або тих, що вже відпрацювали свій розрахунковий ресурс.

Недостатньо залишається вивченим питання про вплив пошкоджень на закономірності деформування та настання граничного стану конструкційних матеріалів. Незворотні зміни структури, які в тій чи іншій мірі, відбуваються на всіх стадіях деформування, приводять до визначеної пошкоджуваності матеріалу, і, як наслідок – в кінці кінців, до його руйнування. Одним із чинників, що супроводжують експлуатацію багатьох виробів, зокрема енергетичного устаткування, та значно впливають на поведінку матеріалу під навантаженням, є вид напруженого стану.

Аналіз впливу різних співвідношень головних напружень на кінетику пошкодження теплостійких сталей 10ГН2МФА та 15Х2МФА при 20°C в умовах циклічного навантаження, який був представлений у [1 – 3], засвідчив важливість врахування вказаного фактора при розрахунках ресурсу високонавантажених елементів конструкцій.

У наших дослідженнях особливу увагу приділяли вивченню закономірностей поведінки металу, перш за все його пошкоджуваності, на стадіях уповільненої і усталеної повзучості з урахуванням впливу процесів, що розвиваються на цих стадіях, на довговічність високо навантажених елементів конструкцій в умовах складного напруженого стану. При цьому використовуються результати оцінки кінетики пошкодження металу при різних співвідношеннях головних напружень циклу.

Методика експерименту і аналіз експериментальних даних. Експериментальні дослідження виконувались з використанням стенда СНТ-8У в умовах ступінчатого та безперервного циклічного навантаження з різними співвідношеннями головних напружень циклу ($K=\sigma_z/\sigma_\theta=\infty; 2; 1; 0,5$) теплостійких сталей 10ГН2МФА при 20; 285; 320°C і 15Х2МФА при 20; 270; 350°C за методикою, детально описаною у [1, 2]. Для оцінки пошкоджуваності досліджених сталей використовували стандартизований в Україні метод ЛМ- твердості (ДСТУ 7793-15) [4], в якому за параметр стану металу прийнята ступінь розсіювання чисел твердості при масових випробуваннях, за характеристику якої взято параметр m в розподілі Вейбулла, що має зміст коефіцієнта гомогенності матеріалу. Цей параметр можна визначити за формулою Гумбеля:

$$m = 0,4343 \times d(n) \times \left[\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

де величину $d(n)$ визначають в залежності від кількості n вимірювань, H_i - значення твердості за i -м вимірюванням, $\overline{\lg H}$ - середнє значення логарифма твердості за результатами n вимірювань.

В наших дослідженнях в якості параметра пошкодження приймаємо відносну величину коефіцієнта гомогенності металу кожного зразка, що досліджується. При цьому

$$m_{\text{відн}} = \frac{m_i}{m_{\text{вихідн}}} \quad (2)$$

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

Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про зростання пошкоджуваності металу з підвищенням температур. Найбільше таке зростання спостерігається при $T=350^\circ\text{C}$ та 320°C для сталей 15Х2МФА і 10ГН2МФА, відповідно. Зауважимо, що інтенсивність вказаних змін для досліджених сталей у процесі циклічного навантаження при всіх реалізованих співвідношеннях головних напружень різна з підвищенням температури. Причому, основні закономірності змін відносного коефіцієнта гомогенності під час циклічного навантаження при різних видах напруженого стану та рівнях температури, реалізованих в наших дослідах, багато в чому співпадають між собою для досліджених сталей. Підтвердженням вказаного, як приклад, є експериментальні дані, представлені на рис.1, та 2.

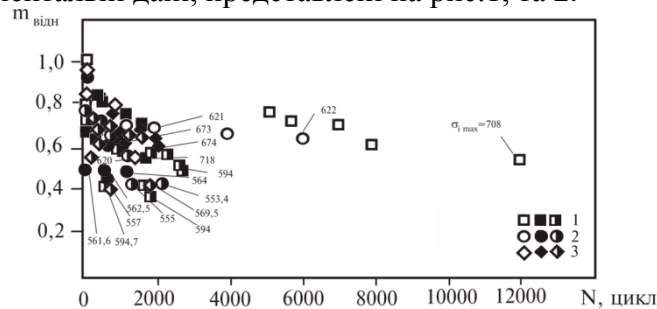


Рис.1. Залежності відносного коефіцієнта гомогенності $m_{\text{відн}}$ від напрацювання при ступінчатому циклічному навантаженні сталі 10ГН2МФА з частотою 2 цикл./хв. при різних співвідношеннях головних напружень: 1 - $K=\sigma_z/\sigma_\theta=\infty$; 2 - $K=0,5$; 3 - $K=1$ та різних температурах: $\square \circ \diamond$ - 20°C ; $\blacksquare \bullet \blacklozenge$ - 285°C ; $\blacksquare \bullet \blacklozenge$ - 320°C .

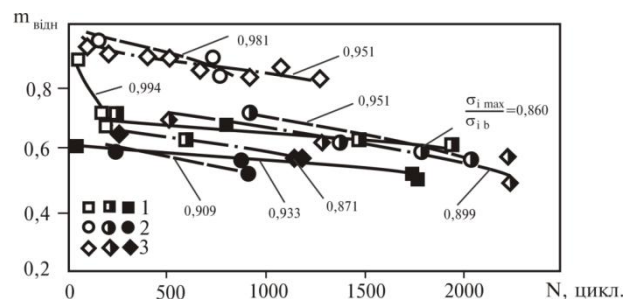


Рис.2. Залежність відносного коефіцієнта гомогенності $m_{\text{відн}}$ від напрацювання при ступеневому циклічному навантаженні сталі 15Х2МФА з частотою 2 цикл./хв. при різних співвідношеннях головних напружень: 1 - $K=\sigma_z/\sigma_\theta=\infty$; 2 - $K=0,5$; 3 - $K=1$; та різних температурах: $\square \circ \diamond$ - 20°C ; $\blacksquare \bullet \blacklozenge$ - 270°C ; $\blacksquare \bullet \blacklozenge$ - 350°C .

Отримані експериментальні результати дозволяють стверджувати, що в умовах підвищених температур при всіх досліджених співвідношеннях головних напружень

циклу темп накопичення пошкоджень металу зростає у порівнянні з темпом подібного процесу при 20°C, не зважаючи на те, що швидкість циклічної повзучості при зростанні температури зменшується. При цьому зменшуються і величини граничних деформацій ε_{ibe} , які відповідають руйнуванню для різних видів напруженого стану.

Порівняння інтенсивності зміни відносного коефіцієнту гомогенності $m_{відн.}$ під дією температури у залежності від рівня досягнутої пластичної деформації ε_i^p при всіх реалізованих в експериментах видах напруженого стану обох сталей свідчить про більшу інтенсивність вказаних змін у сталі 10ГН2МФА при зміні температури від 20 до 320°C, чим у сталі 15Х2МФА - від 20 до 350°C (рис. 3; рис.4).

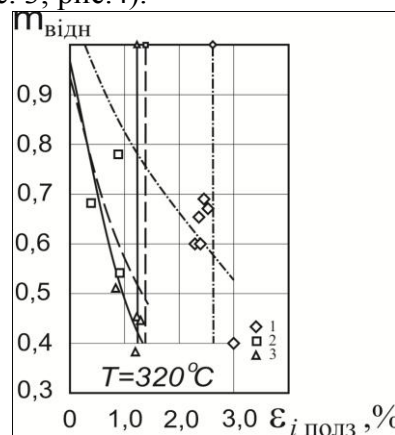
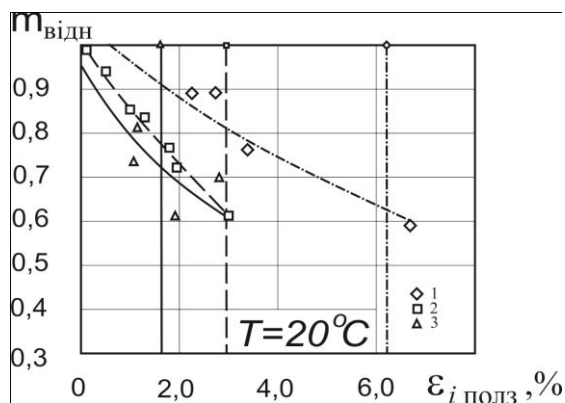


Рис.3. Залежність відносного коефіцієнта гомогенності $m_{відн.}$ від деформації циклічної повзучості сталі 10ГН2МФА при $\varepsilon_{i0} > 1,5\%$ в умовах циклічного навантаження при різних співвідношеннях головних напружень: 1 – $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$; 2 – $K = 2$; 3 – $K = 0,5$.

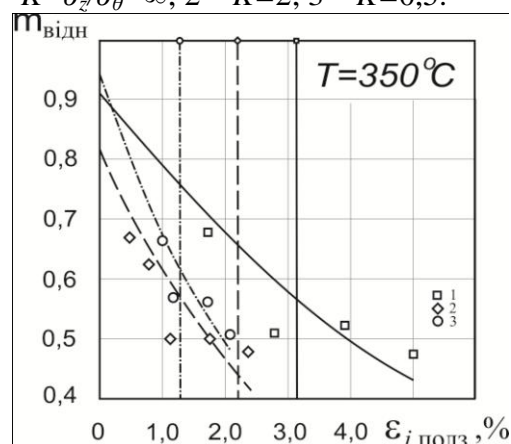
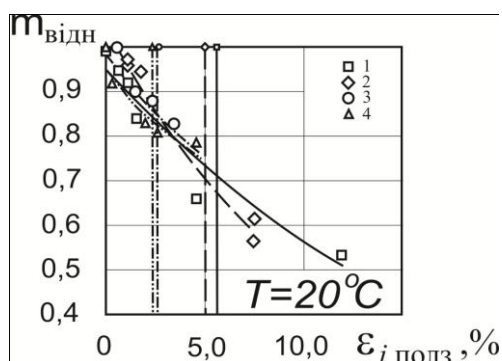


Рис. 4. Залежність відносного коефіцієнта гомогенності $m_{відн.}$ від рівня деформації повзучості сталі 15Х2МФА в умовах циклічного навантаження при різних співвідношеннях головних напружень: 1 – $K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$; 2 – $K = 1$; 3 – $K = 0,5$, 4 – $K = 2$

Аналізуючи результати досліджень, що представлені на рис. 1 – 4 можна стверджувати, що в умовах двовісного циклічного м'якого розтягу обидва досліджені метали пошкоджуються більш інтенсивніше, в порівнянні з одноосьовим циклічним навантаженням у дослідженому діапазоні температур. При чому, оцінка кінетики коефіцієнта гомогенності $m_{відн.}$ в умовах циклічного навантаження при різних співвідношеннях головних напружень циклу свідчить про більш ранню інтенсифікацію пошкоджуваності металу (при більших за абсолютною величиною значеннях $m_{відн.}$) в умовах двовісного навантаження у порівнянні з одновісним у процесі переходу зі сталого стадії повзучості до початку процесу втрати стійкості пластичного деформування металу зразка.

Відмічені вище закономірності кінетики пошкоджування досліджених сталей логічно зв'язувати зі зміною локалізації викривлень кристалічної решітки металу при переході від одноосьового до двоосьового розтягу. Така особливість зміни співвідношень головних напружень циклу навантаження, припускаємо, зменшує опір

пластичному деформуванню при більш низькій ($\dot{\epsilon}_{повз.} < 3 \times 10^{-3}$) швидкості усталеної повзучості в умовах двоосьового розтягу у порівнянні з одноосьовим. Підтвердженням логічності викладеного припущення можуть бути міркування, розглянуті у [5, 6], щодо результатів оцінки впливу частоти навантаження на пошкодження однієї з досліджених сталей та результати, представлені у звіті далі.

Отримані результати свідчать, що граничного значення пошкоджуваність металу в умовах високих температур досягається раніше при 285°C і дещо пізніше при 320°C у порівнянні з кімнатною температурою для однакових видів напруженого стану.

Аналізуючи отримані експериментальні дані щодо впливу температури на пошкоджуваність металу, відмітимо, що у порівнянні з кімнатною температурою при температурі 320°C спостерігається зростання пошкоджуваності металу у середньому на 20%, особливо в умовах рівномірного двоосьового розтягу.

Викладене вище призводить до висновку, що для дослідженої сталі з підвищенням температури до 320°C, як і для цього металу у вихідному стані інтенсивність накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні підвищується для всіх реалізованих співвідношень головних напружень.

Висновки. На основі аналізу отриманих результатів приходимо до висновку щодо суттєвого впливу виду напруженого стану та температури випробувань на закономірності пошкоджуваності досліджених матеріалів в умовах їх експлуатації, а використаний при виконанні експериментів метод ЛМ-твердості є достатньо апробованим і придатним для практичного використання та дозволить значно спростити і здешевити експериментальні дослідження, направлені на удосконалення методів оцінки довговічності високо навантажених елементів конструкцій широкого класу використання.

Достатньо великий об'єм експериментальних даних, що отримані на лабораторних зразках, стосовно закономірностей кінетики накопичення пошкоджень конструкційних матеріалів у різних умовах навантаження складають основу розвитку та поглиблення розуміння вказаних процесів. Цьому будуть також сприяти різні за формою графічні представлення таких отриманих експериментально залежностей.

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. Булах П.А. Исследование развития процесса накопления повреждений в металле при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния. // Проблемы прочности. - 2011. - №2. - С. 122-127.
3. Гигиняк Ф.Ф., Булах П.А. Некоторые подходы к оценке долговечности теплоустойчивых сталей с учетом повреждаемости металла. // Проблемы прочности. 2015, № 6 –С. 66 – 70.
4. ДСТУ 7793-15 Матеріали металеві. Визначення рівня розсіяних пошкоджень методом ЛМ-твердості. К.: ДП «Укр. НДНЦ» - 2016. – 16 с
5. Гігіняк Ф.Ф., Масло О.М. Закономірності пошкодження сталі 10ГН2МФА при симетричному знакозмінному жорсткому циклічному навантаженні. // Проблемы прочности. - 2017. - №2, - С. 158-164.
6. Гігіняк Ф.Ф., Ламашевський В.П., Масло О.М., Котляренко А.А. Експериментальні дослідження деградації сталі 10ГН2МФА при жорсткому циклічному навантаженні./ Збірник «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». – К.: ІЕС ім. Є.О.Патона, - 2015, С. 340 – 349.