

# ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК І КІНЕТИКА ВТОМНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ЗА УМОВ М'ЯКОГО І ЖОРСТКОГО РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ

А.І. Новіков, Г.В. Цибаньов

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка

The previously developed model of the ultimate exhaustion of cyclic plasticity is applied to the summation of fatigue damages in predicting the longevity of cyclic loading regimes under irregular loading, namely the rigid loading regime. The developed method is used to determine the durability and kinetics of SSS for steels 45 and 1X2M under conditions of severe loading regimes in the amplitude of total and in elastic deformation.

Для відтворення умов роботи матеріалів в умовах конструкції виконують випробування в умовах м'яких і жорстких режимів регулярного і нерегулярного (програмного) навантажень. Тому, за наявності експериментальних даних за одного режиму навантаження, інтерес представляють методи їх перерахунку, за іншого режиму. Для цього запропоновано методи, включаючи використання лінійної і нелінійних гіпотез накопичення пошкоджень. Зважаючи на це розроблену модель граничного вичерпання циклічної пластичності (ГВЦП) [1] застосовано до підсумовування втомних пошкоджень для прогнозування довговічності за нерегулярних режимів циклічного навантаження, а саме за ступінчастого [2] і жорсткого режимів. Розроблений метод застосовано для визначення довговічності і кінетики НДС для сталей 45 і 1X2M в умовах жорстких режимів навантаження за амплітудою повної і розмахом непружної складової деформації.

Задачу переходу до жорстких режимів навантаження розв'язано як варіант ступінчастого м'якого циклічного навантаження: в основні рівняння моделі вводилося  $\sigma_a$ , залежне від поточного значення  $D_\varepsilon$  і заданого жорсткого режиму.

Розрізняють два типи жорсткого режиму – за контролем постійного значення амплітуди повної деформації  $\varepsilon_a = \text{const}$  і за контролем постійного значення розмаху непружної деформації  $\varepsilon_{ine} = \text{const}$ . Далі на ПДЦД показано траєкторії навантаження, які відповідають м'якому і двом типам жорстких режимів для випадку, коли параметри навантаження (амплітуда напруження, амплітуда повної чи розмах непружної деформації) співпадають для половини довговічності в умовах цих режимів. Це представлено схематично у вигляді рис. 1 для циклічно зміцнюваного матеріалу.

На рис. 2 у відносних довговічностях схематично порівняно проекції отриманих траєкторій навантаження, які відповідають м'якому і двом типам жорстких режимів, згідно з рис. 1.

Як видно з рис. 2, режим  $\varepsilon_{ine} = \text{const}$  в порівнянні  $\varepsilon_a = \text{const}$  більш агресивний за зміною напружень, так як для нього спостерігається більша різниця між значеннями амплітуди напруження на початку і перед руйнуванням. А м'який режим більш агресивний за зміною непружної деформації. Виходячи з рис. 2 видно, що описані жорсткі режими навантаження можна вважати ступінчастим з змінюваною на кожному напівциклі навантаження амплітудою напруження.

Як видно з рис. 2, для режиму  $\varepsilon_a = \text{const}$  під час навантаження змінюються і амплітуда напруження і непружна складова деформації тобто –  $\sigma_a = f(\varepsilon_a, D_\varepsilon)$  і  $\varepsilon_{ine} = f(\varepsilon_a, D_\varepsilon)$  (1). За режиму  $\varepsilon_{ine} = \text{const}$  під час навантаження змінюються амплітуда напруження і повна амплітуда деформації, тобто –  $\sigma_a = f(\varepsilon_{ine}, D_\varepsilon)$  і  $\varepsilon_a = f(\varepsilon_{ine}, D_\varepsilon)$  (2).

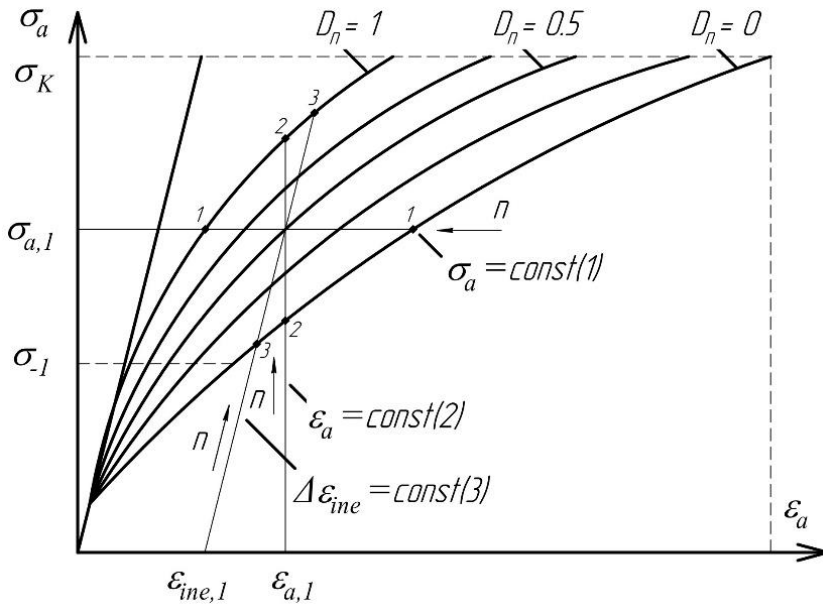


Рисунок 1 – Траєкторії навантаження, на прикладі зміцнюваної сталі, які відповідають м'якому (1) і жорстким режимам навантаження за амплітудою повної (2) і розмахом непружної деформації (3). Стрілкою показано напрямок напрацювання.

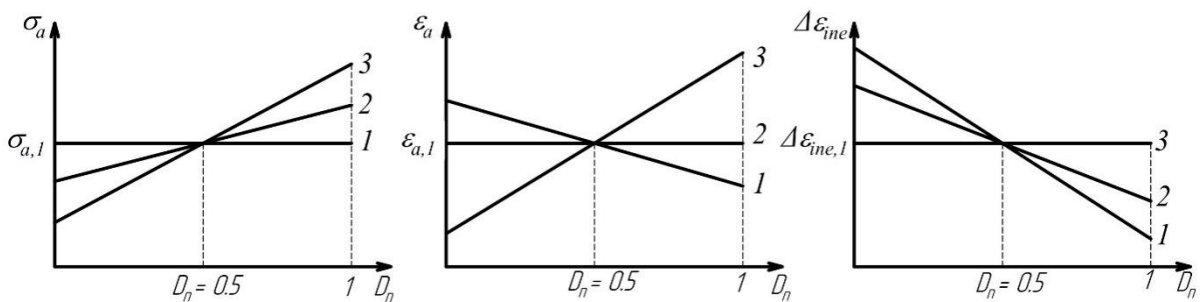


Рисунок 2 – Порівняння кінетики зміни амплітуди напруження (а) амплітуди повної (б) і непружної деформації (в) для різних режимів навантаження: 1 – м'який режим; 2 – жорсткий режим за амплітудою повної деформації; 3 – жорсткий режим за розмахом непружної деформації. Стрілкою показано напрямок зміни параметрів для зміцнення, для знеміцнення – навпаки.

Тобто, в процесі навантаження за дії постійної амплітуди одного з параметрів навантаження два інші параметри неперервно змінюються. Тоді, для жорстких режимів навантаження записано, що:

$$\begin{cases} \varepsilon_a = const; \\ \{\sigma_a, \varepsilon_{a,ine}\} = f(\varepsilon_a, D_\varepsilon); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon_{ine} = const; \\ \{\sigma_a, \varepsilon_a\} = f(\varepsilon_{ine}, D_\varepsilon). \end{cases} \quad (2)$$

Тоді системи рівнянь для визначення зміни параметрів навантаження (кінетики НДС) для описаних жорстких режимів (1)–(2) записано за допомогою рівнянь моделі ГВЦП у вигляді (3)–(4).

Для описаних жорстких режимів навантаження за моделлю ГВЦП розраховані криві втоми для сталей 45 і 1Х2М (рис. 3). Розраховані за моделлю криві втоми добре узгоджуються з експериментальними кривими (рис. 3). Якщо ввести в розгляд коефіцієнт підсумовування  $S$ , то з врахуванням отриманої кінетики  $\sigma_a$  (рис. 3), для зміцнених матеріалів він дорівнює 1,07 для знеміцнених – 0,93 від розрахованого за лінійною гіпотезою.

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_a = const; \\ \varepsilon_a - \frac{\sigma_{a,i}}{E} = A_\varepsilon \cdot (\sigma_{a,i})^{B_\varepsilon} \cdot \left( L_0(\sigma_{a,i}) + \frac{\sigma_{T,i} - \sigma_{T,0}}{\sigma_{T,cr} - \sigma_{T,0}} \cdot (L_K(\sigma_{a,i}) - L_0(\sigma_{a,i})) \right); \\ \varepsilon_{ine,i} = \varepsilon_a - \frac{\sigma_{a,i}}{E}; \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{ine} = const; \\ \varepsilon_{ine,i} = A_\varepsilon \cdot (E(\varepsilon_{a,i} - \varepsilon_{ine}))^{B_\varepsilon} \cdot \left( L_0(E(\varepsilon_{a,i} - \varepsilon_{ine})) + \frac{\sigma_{T,i} - \sigma_{T,0}}{\sigma_{T,cr} - \sigma_{T,0}} \cdot (L_K(E(\varepsilon_{a,i} - \varepsilon_{ine})) - L_0(E(\varepsilon_{a,i} - \varepsilon_{ine}))) \right); \\ \sigma_{a,i} = E(\varepsilon_{a,i} - \varepsilon_{ine}), \end{array} \right. \quad (4)$$

де  $\sigma_{T,i}$  – циклічна границя текучості в  $i$ -ому напівциклі навантаження, причому  $i \in 0 \dots 2N$ , а  $N$  – кількість циклів до руйнування при заданій амплітуді циклічного напруження  $\sigma_a$ ;  $E$  – модуль пружності  $I$ -го роду;  $\varepsilon_{ine}$ ,  $\varepsilon_{ine,i}$  – амплітуда непружної деформації і її значення в  $(i)$ -му циклі навантаження;  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{T,0}$ ,  $\sigma_{T,cr}$  – поточне, вихідне і критичне значення циклічної границі текучості;  $\varepsilon_a(\sigma_a, D_\varepsilon)$ ,  $\varepsilon_e(\sigma_a)$ ,  $\varepsilon_{ine}(\sigma_a, D_\varepsilon)$  – функції, які описують амплітуду повної, пружної і непружної складової повної діаграми циклічного деформування, відповідно;  $f(\sigma_a, D_\varepsilon)$  – функція, яка враховує зміну значення непружної деформації при циклічній деградації матеріалу, що враховується пошкодженням  $D_\varepsilon$ ;  $A_\varepsilon$ ,  $B_\varepsilon$  – коефіцієнти рівняння діаграми (4) на стадії стабілізації непружної деформації,  $L_0$ ,  $L_K$  – функції непружної деформації в початковому і кінцевому стані, відповідно.

Враховуючи зміну параметрів навантаження, розрахованою за системою рівнянь (3)–(4) з умовами, описаними вище, визначено кінетику НДС для жорсткого режиму за  $\Delta\varepsilon_{ine}$ , як для більш агресивного режиму (рис. 4). З рис. 4 видно, що для зміцнюваних матеріалів (на прикладі сталі 45) відбувається збільшення амплітуди напружень і амплітуди повної деформації, для знеміцнюваних (1X2M) – навпаки.

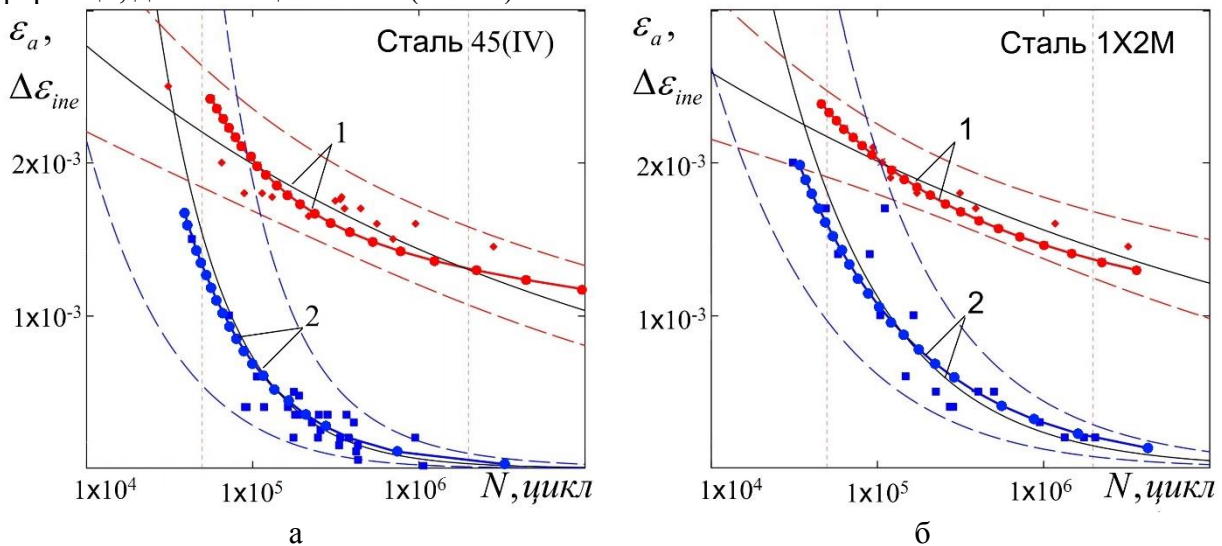


Рисунок 3 – Розраховані (лінії з точками) і експериментальні (гладкі лінії) криві втоми для жорстких режимів навантаження за амплітудою деформації (1, червоні лінії) і за розмахом непружних деформацій (2, сині лінії) для сталей 45 (а) і 1X2M (б): штрихові лінії – границі розсіювання; точки – експериментальні дані.

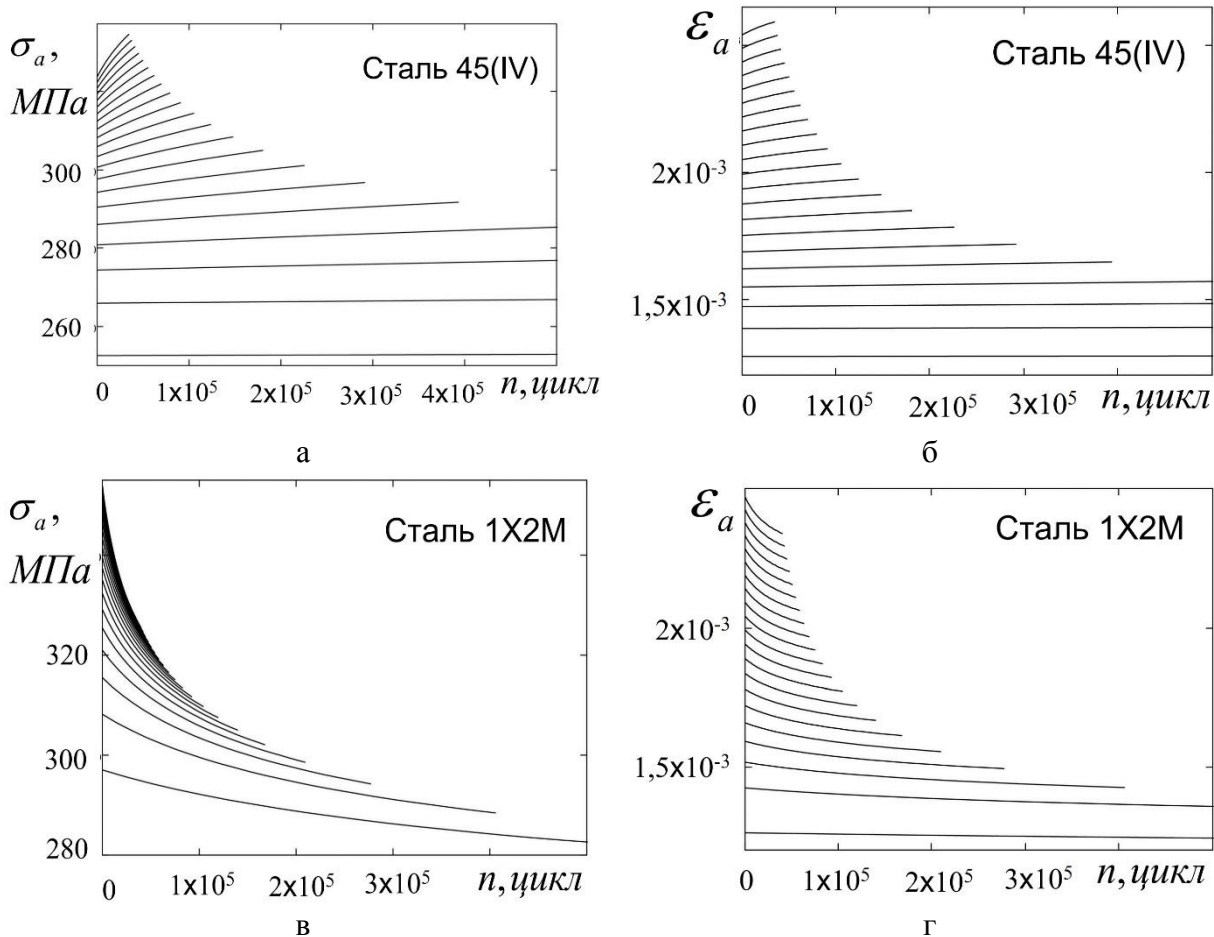


Рисунок 4 – Кінетика напружень і амплітуд повної деформації для жорсткого режиму навантаження за розмахом непружної деформації  $\Delta \epsilon_{ine}$  для дискретних значень  $\Delta \epsilon_{ine}$ , які відповідають багатocyкловій втомі.

Показано використання розробленої моделі ГВЦП для оцінки втомної довговічності, а також кінетики непружних деформацій, напружень і пошкодження за наявності експлуатаційних факторів – змінних амплітуд циклічного навантаження. Наведено розрахунок довговічності для змінних амплітуд циклічного навантаження і побудови кривих втоми, що відповідають жорстким режимам навантаження за  $\epsilon_{ine} = \text{const}$  і  $\epsilon_a = \text{const}$ , виходячи з даних, отриманих за умов м'якого режиму навантаження. Результати розрахунку показали добру відповідність експериментальних і розрахункових даних.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Tsyban'ov G.V., Novikov A.I. Ultimate hardening / softening model of material for fatigue crack initiation onset and determination of its parameters // International Journal of Fatigue. – 2012. – Volume 39. – P. 15 – 24.
2. Цибаньов Г.В., Новіков А.І. Оцінювання втомного пошкодження і залишкового ресурсу матеріалу за моделлю граничного вичерпання пластичності // Вісник ТДТУ. – 2009. – №3. – С. 53 – 65.