ВИЗНАЧЕННЯ ВТОМНОГО ПОШКОДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ЗА СТУПЕНЕМ ВИЧЕРПАННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Г. Цибаньов, А. Новіков

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України

Abstract. In the report, the calculated estimation of fatigue damage kinetics and inelastic deformation under variable cyclic loading amplitude is submited. To this effect the previously developed model of ultimate cyclic plasticity exhaustion (UCPE) was used. On this basis, the model of fatigue damage summation which allows to calculate the kinetics of fatigue damage in irregular load is developed. The model proved that for materials with instabale cyclic inelastic deformation, the fatigue damage summation factor is not equal to 1.

Вступ. Реальні елементи конструкцій в процесі своєї експлуатації зазнають дії експлуатаційного навантаження, яке змінюється в часі за своєю інтенсивністю в залежності від заданого режиму роботи і є в більшості випадків втомним за своєю природою. Так як експлуатація конструкційних елементів в більшості випадків протікає в режимі змінного навантаження, то необхідно мати достовірну методику розрахунку втомного пошкодження і залишкового ресурсу конструкційних матеріалів при нерегулярному навантаженні. Раніше авторами розроблено модель граничного вичерпання циклічної пластичності (ГВЦП), яка використовувалась для розрахунку кінетики непружних деформацій і визначення довговічності до настання граничного стану різних груп конструкційних матеріалів в області багатоциклової втоми. Модель для розрахунку використовує експериментальні дані, одержані в умовах симетричного розтягу–стиску гладких зразків за м'якого режиму навантаження [1]. Сама модель ГВЦП базується на розрахунковому покроковому визначенні зміни локальної циклічної границі текучості матеріалу, його пошкодження і граничного вичерпання пластичності на кожному напівциклі навантаження. Причому, пошкодження матеріалу розглядається як безперервне зміцнення/знеміцнення локальних об'ємів матеріалу, що приводить до вичерпання ресурсу пластичності матеріалу і настання граничного стану – зародження втомної тріщини. Метою роботи є використання розробленої раніше моделі ГВЦП [1] для розрахунків довговічності матеріалів при нерегулярному навантаженні.

Основні співвідношення моделі для підсумовування втомних пошкоджень. Для підсумовування пошкоджень за змінних режимів циклічного навантаження з використанням розробленої моделі ГВЦП, розглянуто отриману раніше залежність набутого пошкодження від границі циклічної текучості [1]. Як і було відзначено, розрахункове пошкодження у такому вигляді супроводжує процес зміни границі циклічної текучості матеріалу від його початкового значення до критичного у відносних величинах. У загальному випадку змінного навантаження для визначення сумарної довговічності необхідно користуватися системою, складеною з раніше знайдених рівнянь для обчислення непружної деформації і границі циклічної текучості в кожному напівциклі [1] з врахуванням умови граничного стану у вигляді:

$$D_{\varepsilon,i} = \frac{\sigma_{T,i} - \sigma_{T,0}}{\sigma_{T,cr} - \sigma_{T,0}} \le \left[D_{cr}\right] = 1. \qquad (1)$$

де $\sigma_{T,0}$, $\sigma_{T,cr}$ – початкове і критичне значення границі текучості, відповідно; $\sigma_{T,i}$, $D_{\varepsilon,i}$ – границя циклічної текучості і пошкодження матеріалу в (i)–тому напівциклі навантаження, відповідно; D_{cr} – критичне значення втомного пошкодження.

Для використання рівнянь для обчислення на кожному циклі навантаження непружної деформації $\varepsilon_{ine,i}$ і границі циклічної текучості $\sigma_{T,i}$ за змінних амплітуд циклічного навантаження необхідно задати закон зміни напруження, залежно від кількості циклів навантаження (i) у вигляді $\sigma_{a,i}=f(i)$. З врахуванням $\sigma_{a,i}$ отримано:

$$\begin{cases} \varepsilon_{ine,i} = A_{\varepsilon} \cdot \left(\sigma_{a,i}\right)^{B_{\varepsilon}} \cdot \left(L_0\left(\sigma_{a,i}\right) + \dfrac{\sigma_{T,i} - \sigma_{T,0}}{\sigma_{T,cr} - \sigma_{T,0}} \cdot \left(L_K\left(\sigma_{a.i}\right) - L_0\left(\sigma_{a,i}\right)\right)\right); \\ \sigma_{T,i+1} = \sigma_{T,i} \pm E \cdot \dfrac{a \cdot b \cdot \left(\varepsilon_{ine,i}\right)^{a-1}}{\left(1 \mp a \cdot b \cdot \left(\varepsilon_{ine,i}\right)^{a-1}\right) \cdot E - a \cdot b \cdot \left(\varepsilon_{ine,i}\right)^{a-1}} \cdot \varepsilon_{ine,i}, \end{cases}, \quad (2)$$

де i – індекс напівциклів навантаження; $\sigma_{a,i}$ – функція зміни амплітуди напруження на кожному напівциклі навантаження; a, b – коефіцієнти моделі ГВЦП.

Довговічність для цього випадку навантаження визначається як половина від кількості напівциклів навантаження до досягнення критичного стану згідно (1) – $N=i/2$. Рівняння (1) і (2) складають модель підсумовування втомних пошкоджень для нерегулярних режимів циклічного навантаження. Рівняння (1) і (2) використовуються для визначення довговічності до настання граничного стану і для попівциклової побудови діаграми вичерпання пластичності та кінетики непружних циклічних деформацій і пошкодження. Коефіцієнт підсумовування S для загального випадку нерегулярного навантаження визначається як:

$$S = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{i} S_j = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{i} \frac{1}{N\left(\sigma_{a,j}\right)} \text{ чи } S = \frac{1}{2}\int_0^i \frac{dn}{N\left(\sigma_a\left(n\right)\right)}. \quad (3)$$

Для багатоступінчастого навантаження система (2) запишеться в спрощеному вигляді. Для цього основне рівняння моделі [1] записується не для граничного стану матеріалу, а для проміжного, з заміною в ньому границі інтегрування. Розрахунки довговічності матеріалів при нерегулярному навантаженні проводяться за критерієм граничного вичерпання пластичності матеріалу в найкритичнішому перетині зразку.

Визначення довговічності за умов ступінчастого навантаження. Далі модель ГВЦП використано для визначення втомної довговічності в умовах змінних амплітуд циклічного навантаження для двоступінчастого навантаження за режимів зміни амплітуди напруження на ступенях навантаження від меншої до більшої (режим М–Б) і від більшої до меншої (режим Б–М). Для двоступінчастого навантаження взято сталь 45(II) і сталь 1Х13(I). Використовуючи (2) визначається дискретна функція вичерпання пластичності, а також кінетика непружного циклічного деформування і пошкодження на кожному напівциклі навантаження. Виходячи з проведеного аналізу, можна сказати що: в умовах нерегулярного навантаження криві пошкодження монотонно зростають, криві зміни границі циклічної текучості можуть як монотонно зростати, так і спадати (зміцнення, знеміцнення), а на кривих кінетики непружних деформацій спостерігаються розриви першого роду через зміну амплітуди напруження.

Далі представлено систему рівнянь нелінійного підсумовування втомних пошкоджень (2) в графічному вигляді (рис. 1). Так як кінетика пошкодження на кожному рівні багатоциклового навантаження різна, то під час варіювання співвідношень напружень на першій і другій ступіні $\sigma_{a,1}$, $\sigma_{a,2}$ і тривалості першого ступеня n_1 та визначеної з (1) залишкової тривалості n_2 другого ступеня отримано, що $S_1+S_2\neq 1$. Де $S_j=n_j/N(\sigma_{a,j})$–коефіцієнт підсумовування, який визначається як відносна кількість циклів напрацювання на (j)–тому ступіні. Видно, що використання моделі приводить до відмінності результатів у порівнянні з лінійною гіпотезою підсумовування втомних пошкоджень. З результатів розрахунку також витікає, що для матеріалів I і II груп режим М–Б приводить до збільшення $S=S_1+S_2$, а режим Б–М – до зменшення S. Для матеріалів III групи – навпаки. Ці закономірності підтверджуються тим, що для реальних матеріалів I і II груп, для режиму М–Б спостерігається збільшення параметра S – явище тренування матеріалу, а для режимів Б–М ($\sigma_{a1}>\sigma_{a2}$) – навпаки, зменшення S – явище погіршення втомних властивостей. Тобто, врахування кінетики непружних деформацій дозволяє показати відмінність у накопиченні втомних пошкоджень між зміцнюваними і знеміцнюваними матеріалами.

Для прогнозування індивідуальних значень кінетики непружних деформацій і пошкодження за допомогою моделі ГВЦП розроблено розрахункову схему переходу від

індивідуальних властивостей зразків до тих, які відповідають 50% кривій втомі. Ця схема дозволяє перейти до індивідуальних напружень, які визначаються за індивідуальною кривою втоми кожного зразка у вигляді: $\sigma_{a,in}=\sigma_a(N(\sigma_a)\cdot P)$. Параметр P – це коефіцієнт для перерахунку напружень σ_a заданих в експерименті в індивідуальні $\sigma_{a,in}$, знайдений за в умови рівності розрахункової і експериментальної довговічності. Для двоступінчастого режиму навантаження схема визначення амплітуди індивідуальних напружень приведено на рис. 2,*а*. На рис 5,*б* наведено порівняння експериментальних коефіцієнтів підсумовування S_E з параметрами P, розрахованими за допомогою моделі ГВЦП і схеми з рис. 2,*а*. З нього видно, що між експериментальними коефіцієнтами підсумовування S_E і розрахованими параметрами P існує кореляція у вигляді прямої лінії.

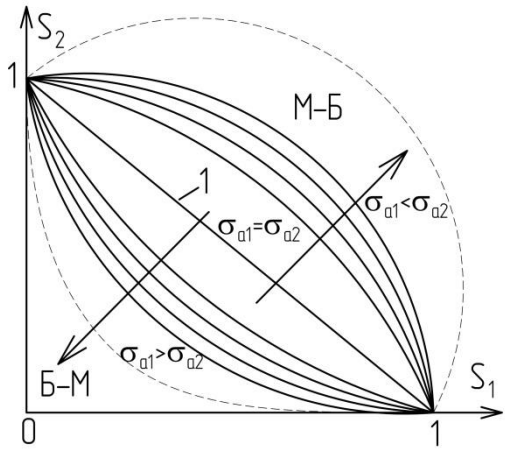
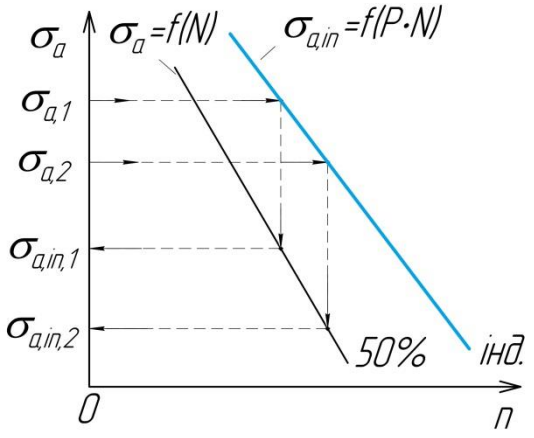


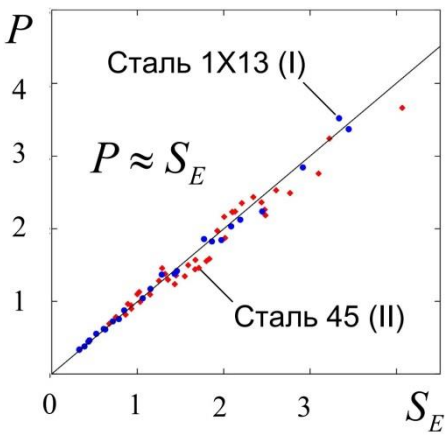
Рисунок 1. Схематичне (*а*) і розрахункове для сталі 45(II) (*б*) поле коефіцієнтів S_1 і S_2 моделі підсумовування пошкоджень (6) і зміна суми коефіцієнтів підсумовування S_1 і S_2 від відношень навантажень другої ступіні до першої $\sigma_{a,2}/\sigma_{a,1}$ (*в*): *1* – лінійна гіпотеза підсумовування пошкоджень і випадок, коли $\sigma_{a,1}=\sigma_{a,2}$. Стрілками позначено в області М–Б – напрямок збільшення, а в області Б–М – напрямок зменшення відношення $\sigma_{a,2}$ к $\sigma_{a,1}$.

Використовуючи рівняння (3) та $P=S_E$, визначено розрахункові значення коефіцієнтів моделі підсумовування пошкоджень в умовах двоступінчастого навантаження сталей 45 (II) (рис. 3,*а*) і 1Х13 (I) (рис. 3,*б*) з врахуванням схеми приведення напружень, наведеної на рис. 2,*а*. Як видно з рис. 3, отримано узгодженість розрахункових і експериментальних даних.

Також за допомогою моделі і схеми приведення отримано кінетику непружних деформацій для зміцнюваної сталі 45(II) і знеміцнюваної 1Х13(I) (рис. 4). З рис. 4 видно, що кінетика, яку отримано за допомогою моделі та схеми приведення напружень, коректно описує експериментальну кінетику на відміну від кривих, отриманих за значеннями напружень, заданими в експерименті. Це підтверджує адекватність розробленої схеми приведення напружень і говорить про обернену можливість: застосування експериментальної кінетики дозволяє прогнозувати індивідуальну довговічність зразків за програмного навантаження.



а



б

Рисунок 2. Схема визначення індивідуальних напружень(*а*) і порівняння експериментальних коефіцієнтів S_E з розрахованими параметрами P (*б*).

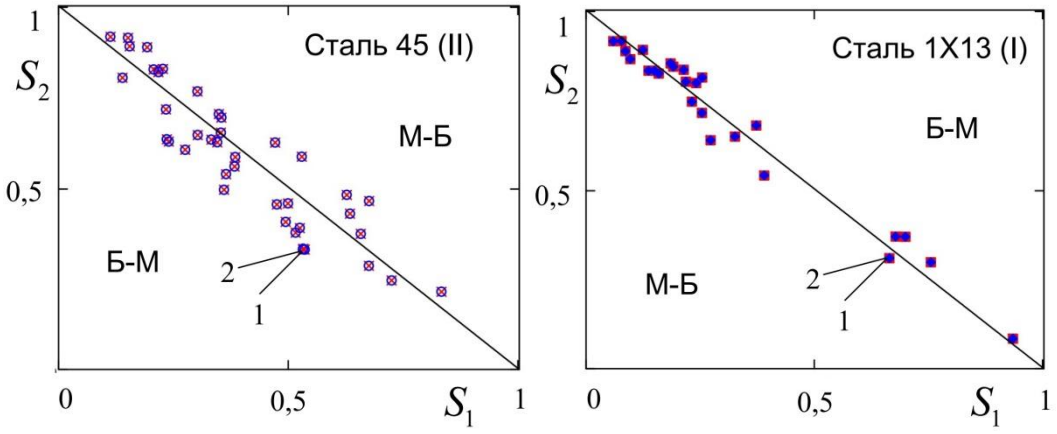


Рисунок 3. Розрахункове підсумовування втомних пошкоджень за моделлю та схемою приведення для сталей 45(II) і 1Х13(I): (*1*) – S_P; (*2*) – S_E.

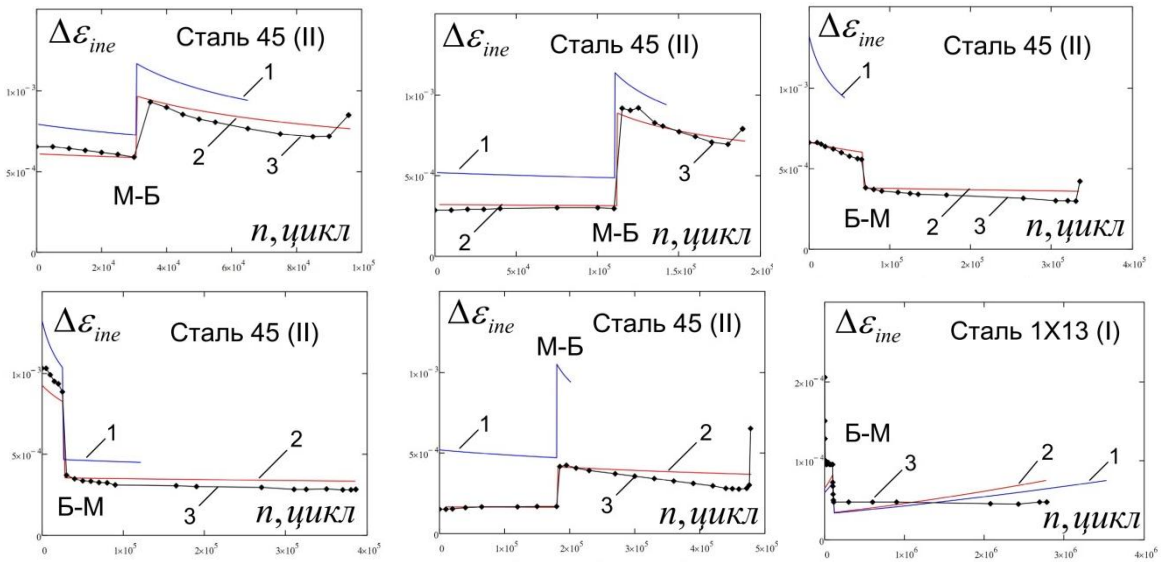


Рисунок 4. Порівняння даних з кінетики непружних деформацій для двоступінчастого режиму навантаження М–Б і Б–М, отриманих за схемою приведення напружень (*2*), та без неї (1) з експериментальними (*3* криві з точками) для різних $\sigma_{a,1}$, n_1, $\sigma_{a,2}$, n_2.

Висновки. В роботі показано використання раніше розробленої моделі ГВЦП для оцінки втомної довговічності матеріалів, кінетики пошкодження та непружних деформацій за змінних амплітуд циклічного навантаження. За допомогою моделі доведено що для матеріалів, які при циклічному навантажені показують нестабільність непружної деформації коефіцієнт підсумовування втомних пошкоджень відрізняється від 1. Для цих матеріалів кінетика втомних пошкоджень також відрізняється від такої, що визначається лінійною гіпотезою підсумовування пошкоджень. Так випадку ступінчатого навантаження матеріалів, які зміцнюються по опуклій траєкторії режим М–Б приводить до збільшення коефіцієнта підсумовування втомних пошкоджень, а режим Б–М – до його зменшення. Для матеріалів які зміцнюються по увігнутій траєкторії – навпаки. Розроблена оригінальна схема врахування індивідуальних властивостей зразків, яка полягає в приведенні експериментальних напружень до індивідуальних напружень, які визначаються за індивідуальною кривою втоми кожного зразка. Показано, що кінетика, яку визначено за допомогою моделі та схеми приведення напружень, коректно описує експериментальну кінетику на відміну від кривих, отриманих за значеннями напружень, заданими в експерименті.

1. Tsyban’ov G.V. Ultimate hardening/softening model of material for fatigue crack initiation onset and determination of its parameters [Текст] / G.V. Tsyban’ov, A.I. Novikov // International Journal of Fatigue. – 2012. – Volume 39. – P. 15 – 24.