УДК 539.375

С.О. Пискунов, д-р техн. наук,
О.І. Гуляр, д-р техн. наук,
С.В. Мицюк, канд. техн. наук.

ОГЛЯД СПІВВІДНОШЕНЬ КОНТИНУАЛЬНОЇ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ДЛЯ ОПИСУ ПРОЦЕСІВ ПОВЗУЧОСТІ І ВТОМИ

Проведено огляд рівнянь накопичення пошкодженості, наведено загальні алгоритми підсумовування пошкодженості і вирази для визначення ресурсу при втомі, повзучості, а також при їх одночасному виникненні.

Вступ. Конструкційні елементи відповідальних об’єктів часто функціонують в умовах тривалого сталого або циклічного силового навантаження в тому числі при підвищених температурах. В цих умовах відбуваються відповідно процеси повзучості або втоми, характерним для яких є поступове погіршення фізико-механічних характеристик матеріалу та накопичення розсіяних пошкоджень, утворення і зростання зон руйнування (макроскопічних дефектів), яке має бути враховано для достовірного аналізу тривалої міцності і величини реусрсу.

Для опису зазначених процесів накопичення розсіяних пошкоджень широкого розповсюдження набули підходи, що ґрунтуються на концепції механіки континуального руйнування і полягають у введенні до розгляду параметра пошкодженості матеріалу.

Механіка континуального руйнування була ініційована роботами Л.М. Качанова і Ю.Н. Работнова. Її розвиток стосовно процесів багатоциклового деформування здійснений в роботах С.В. Серенсона, В.П. Голуба, Т. Нішіхари, В.А. Кузьменка, І.М. Сільвестрова та інших учених.

Для опису зміни параметрів пошкодженості використовуються кінетичні рівняння, при побудові яких припускається, що прирощення функції $\omega(t)$, що описує параметр пошкодженості за малий проміжок часу t залежить від поточного стану матеріалу (значення параметра пошкодженості) та навантажень (силових, деформаційних і температурних впливів) [2, 6]:

$$\frac{d\omega}{dt}=\Phi\left(\omega, p_j\right), \tag{1.1}$$

© Пискунов С.О., Гуляр О.І., Мицюк С.В.

де $\Phi(\omega, p_j)$ – деяка функція; p_j – вектор навантажень, що характеризує перелічені впливи.

Значення $\omega(t=0)=\omega_0$ відповідає початковому стану матеріалу (зокрема, наявності початкових пошкоджень, у випадку відсутності яких $\omega(t=0)=0$), а значення $\omega(t^*)=1$ – критичне значення пошкодженості, що відповідає повністю пошкодженому стану, в якому несуча здатність є вичерпаною, t^* – час до досягнення цього стану.

Кінетичне рівняння типу (1.1) дозволяє описувати режими стаціонарного і нестаціонарного навантаження елементів конструкцій і доповнює класичну систему рівнянь механіки, що містить рівняння рівноваги, граничні умови, рівняння сумісності деформацій і стану матеріалу.

У випадку припущення незалежності процесу накопичення пошкоджень від історії навантаження, тобто пропорційності величини накопиченої пошкодженості величині часу навантаження та її незалежності від послідовності прикладення навантажень, час до початку руйнування матеріалу t^* може бути визначений на основі безпосереднього інтегрування рівняння (1.1) з урахуванням умови [2]:

$$\int_0^{t^*} \Phi(\omega, q_i)\, dt = 1 . \qquad (1.2)$$

Однак, таке припущення лінійності підсумовування пошкодженості не враховує низки факторів, які суттєво впливають на процес навантаження [14].

При розв’язанні задач континуального руйнування важливим є коректний вибір співвідношень для опису пошкодженості з точки зору урахування неоднорідного напружено-деформованого стану. З іншого боку серед рівнянь визначення пошкодженості найбільшого розповсюдження набули рівняння, які містять скалярний а не векторний чи тензорний параметри пошкодженості, що пояснюється простотою визначення констант кінетичних рівнянь. Метою даної роботи є огляд рівнянь накопичення пошкодженості при різних умовах деформування – окремій дії повзучості та втоми, а також у випадку їх одночасного виникнення та формулювання загальних алгоритмів визначення пошкодженості при розв’язанні задач континуального руйнування.

1. Фізичні співвідношення механіки континуального руйнування при циклічному навантаженні. При циклічному наватаженні для параметру пошкодженості в більшості випадків використовуєтсья позначення D, а парметром, що визначає ресурс є кількість циклів навантаження N. Серед рівнянь відомі рівняння із визначення пошкодженості при багато- та малоцикловому навантаженні. Зокрема при малоцикловому наванатженні використовується модифікований підхід Менсона [2]:

$$D_i = (n_i / N_i)^{q(\omega)},$$

де $q(\omega) = \left(\frac{N}{N_r}\right)^{\alpha} + \frac{2\omega}{\pi}\left[1 - \left(\frac{N}{N_r}\right)^{\alpha}\right]$; $\omega = arctg\left(\frac{\gamma_a}{\varepsilon_a} \times \frac{\varepsilon_{fs}}{\gamma_{fs}}\right)$ – кут орієнтації траєкторії деформування, який визначає домінуючий вид деформованого стану; γ_{fs} – гранична та амплітуда деформації зсуву в умовах чистого кручення для заданої довоговічності; ε_{fs} – гранична амплітуда осьової деформації в умовах розтягу-стиску для цієї ж довговічності [16].

У випадку багатоцилового навантаження в роботі [15] В.В. Болотіним був запропонований вираз наступного вигляду:

$$F(D,\sigma) = \frac{\eta(\sigma)}{B}\sigma^b D^{1-\frac{1}{\eta(\sigma)}}, \tag{1.3}$$

де B і b – параметри рівняння кривої втоми, $\eta(\sigma)$ – незростаюча функція σ, що визначається по результатам програмних досліджень з урахуванням граничних умов.

Зазначений вираз дозволяє врахувати вплив послідовності прикладання програмного навантаження на довговічність.

Для опису монотонної зміни інтенсивності накопичення пошкодженості із збільшенням кількості циклів в роботі [11] був запропонований вираз вигляду:

$$\frac{dD}{dN} = k(\sigma) m(\sigma) N^{m(\sigma)-1}, \tag{1.4}$$

де $k(\sigma)$ і $m(\sigma)$ – залежні від напруження σ коефіцієнти; пошкодженість в даному випадку залежить як від рівня напружень, так і від накопиченої кількості циклів навантаження.

В роботі [12] із посиланням на [13] зазначено, що для певного класу конструкційних матеріалів процес накопичення пошкодженості при циклічному навантаження характеризується уповільненням із зростанням кількості циклів. Урахування цього ефекту запропоновано здійснювати введенням в вираз для $\frac{dD}{dN}$ спадаючої функції $\psi(\sigma, N)$:

$$\frac{dD}{dN} = e^{A\sigma+B}\psi(\sigma, N), \tag{1.5}$$

де $\psi(\sigma,N)=e^{-m\sigma(N-1)}$, σ – амплітудне значення напружень; A і B експериментальні константи які визначаються по кривій втоми, поданої рівнянням $\dfrac{1}{N}=e^{A\sigma+B}$ [12].

В роботі [3] для обчислення пошкоджень анізотропних композитних матеріалів вводяться визначальні рівняння у вигляді кінетичних рівнянь еволюційного типу:

$$\frac{dD_{ij}}{dN}=k(R)*(W^e)^n*M_{ijkl}*\breve{\sigma}_{kl}, \tag{1.6}$$

де $k(R)$ - функція, яка залежить від параметра циклу; M_{ijkl} - симетричний тензор четвертого рангу, компоненти якого відображають вплив напряму головних осей тензора напруження відносно площини симетрії пружних властивостей композиту; W^e - максимальна за цикл питома енергія пружної деформації.

При плоскому напруженому стані кінетичне рівняння пошкоджуваності спрощується й його можна переписати в матричній формі як:

$$\begin{pmatrix}\dfrac{dD_{11}}{dN}\\ \dfrac{dD_{22}}{dN}\\ \dfrac{dD_{12}}{dN}\end{pmatrix}=k(R)*(W^e)^n*\begin{pmatrix}m_{11} & 0 & 0\\ 0 & m_{22} & 0\\ 0 & 0 & m_{12}\end{pmatrix}*\begin{pmatrix}\breve{\sigma}_{11}\\ \breve{\sigma}_{22}\\ \breve{\sigma}_{12}\end{pmatrix}. \tag{1.7}$$

В роботі [3] вигляд рівняння накопичення пошкодженості передбачає урахування зменшення ефективного перерізу елемента конструкції, що відповідає первісному фізичному трактуванню пошкодженості, запропонованому Ю.Н. Работновим [11]. Для урахування циклічного навантаження вираз для пошкодженості містить номінальне значення напруження σ_1^0 :

$$\frac{dD}{dN}=\begin{cases}B\left(\dfrac{\sigma_1^0}{1-D}\right)^m & (\sigma_1^0>0);\\ 0 & (\sigma_1^0<0);\end{cases} \tag{1.8}$$

де $\sigma_1^0=\sigma_{m0}+\sigma_{a0}\sin(2\pi ft)$ – номінальне напруження, f – частота прикладання навантаження . При конкретизації величини σ_1^0 для окремих випадків вираз (1.8) отримаємо у вигляді:
для симетричного навантаження ($\sigma_m=0$, $\sigma_a\neq const$):

$$\frac{dD}{dN}=C\frac{\left(\sigma_{a0}\sin 2\pi N\right)^m}{2^m\left(1-D\right)^m}, \tag{1.9}$$

для асиметричного навантаження ($\sigma_m=const$, $\sigma_a=const$):

$$\frac{dD}{dN}=C\frac{\left(\sigma_{m0}+\sigma_{a0}\sin 2\pi N\right)^m}{2^m\left(1-D\right)^m}, \tag{1.10}$$

де m і C константи матеріалу, σ_a; σ_{m0}, σ_{a0} – номінальні значення статичної та циклічної компонент відповідно.

Вираз, що ґрунтується на концепцій пошкодженості Ю.Н.Работнова [11]. запропонований також в роботі [13]:

$$\frac{dD}{dN}=A\left(\frac{\sigma}{\sigma_B(1-D)}\right)^n, \tag{1.11}$$

де A та n – експериментально визначені константи; σ_B – межа міцності матеріалу.

В роботі [13] вище наведене рівняння було розв'язане в замкненому вигляді, що дозволило отримати вираз для величини пошкодженості у вигляді:

$$D=1-\sqrt[(n+1)]{1-\frac{A}{(n+1)\,\sigma_B^n}\int\limits_0^{N^*}\sigma^n dN}, \tag{1.12}$$

де N* - кількість циклів навантаження в даний момент часу ($0\leq N^*\leq N$).

При відомій історії навантаження $\sigma(N)$ цей вираз дозволяє обчислити пошкоджуваніcть D в будь-який момент часу. У випадку коли $\sigma=\sigma_a=const$, вираз (1.12) матиме вигляд [13]:

$$D=1-\sqrt[(n+1)]{1-\frac{A}{(n+1)\sigma_B^n}\sigma^n N}, \tag{1.13}$$

з цього виразу може бути знайдена кількість циклів для початку руйнування :

$$N^*=\frac{(n+1)\sigma_B^n(1-(1-D)^{n+1})}{A\sigma^n}. \tag{1.14}$$

Даний вираз містить скалярний параметр пошкодженості і характеризується простотою визначення констант кінетичних рівнянь

У випадку коли $D=1$ кількість циклів навантаження дорівнює кількості циклів до руйнування. Використовуючи відоме рівняння кривої втоми вигляду $N=C\,\sigma^{-m}$ і можна визначити константи рівняння (1.12) у вигляді:

$$n=m,\ A=((n+1)\sigma_B^n)/C. \tag{1.15}$$

В загальному випадку процес циклічного навантаження може здійснюватись із змінними параметрами циклу (середнім значенням напруження і амплітуди). Для моделювання процесу деформування, континуального руйнування та повзучості чи сумісної дії даних процесів процес навантаження необхідно розділити на певну кількість етапів – кроків розв'язання задачі – S^*, при цьому в межах кожного етапу s навантаження відбувається із сталим середнім напруженням σ_{0s} і сталою амплітудою σ_{as} протягом N_s циклів. При визначених таким чином параметрах навантаження на кожному кроці виконується визначення напружено-деформованого стану. Величина пошкодженості D_S, за всю попередню історію навантаження (кількість циклів навантаження $N_S = \sum\limits_{s=1}^{S} N_s$) визначається за формулою (1.13), поданою із урахуванням покрокової дискретизації процесу навантаження:

$$D_S = 1 - \sqrt[(n+1)]{1 - \frac{A}{(n+1)\sigma_B^n} \sum_{s=1}^{S} \left(\sigma_{as}\right)^n N_s}. \qquad (1.16)$$

У випадку циклічного навантаження із сталими параметрами циклу визначення напружено-деформованого стану достатньо виконати лише один раз, а визначення кількості циклів до початку руйнування N^* виконується за формулою (1.14) при $D = D^* = 1$:

$$N^* = \frac{(n+1)\sigma_B^n}{A\sigma^n}, \qquad (1.17)$$

При необхідності моделювання перебігу процесу накопичення пошкодженості здійснюється послідовним використанням формули (1.17) при значеннях N: $0 \le N \le N^*$.

Такий підхід не потребує додаткових експериментальних випробувань для визначення рівнянь накопичення пошкодженості при циклічному навантаженні і в подальшому використовується для моделювання виникнення дефектів, пов'язаних із зміною фізико-механічних характеристик матеріалу.

2. Фізичні співвідношення механіки континуального руйнування в умовах повзучості. Серед рівнянь визначення моделювання пошкодженості у випадку повзучості також відомі рівняння що потребують складних експериментів для визначення констант рівнянь пошкодженості так і ті, де визначення констант є простішим.

У зв'язку з тим, що процес накопичення пошкодженості відбувається за двома механізмами – виникнення і росту дефектів [1, 5], в роботі [5] було запропоновано обчислювати скалярну величину пошкодженості як функцію двох величин $\frac{d\omega}{dt}=f\left(\frac{d\omega_1}{dt},\frac{d\omega_2}{dt}\right)$, одна з яких пов'язана з величиною інтенсивності дотичних напружень τ_i, що визначають інтенсивність зародження тріщин, а друга – з величиною найбільшого головного напруження σ_1, що визначає швидкість їх росту:

$$\frac{d\omega_1}{dt}=A_1\frac{\tau_i^n}{(1-\omega_1)^{n_1}},\quad \frac{d\omega_2}{dt}=A_2\frac{\sigma_1^k}{(1-\omega_2)^{n_2}},$$

$$(1-\omega)^{-q}=(1-\omega_1)^{-f}+(1-\omega_2)^{-p},$$

де A_1, n, n_1, A_2, k, n_2, q, f, p – константи матеріалу

Найбільш простим є ізотропний параметр пошкодженості. У цьому випадку функція $\Phi(\omega,q_i)$, як зазначено в роботі [4], найбільш часто приймається у вигляді ступеневої функції напруження, або у вигляді рівняння Качанова [7], Работнова [11], Шестерикова [5], Леметра [17],
або рівнянь, що містять додаткові параметри, які враховують характер складного напруженого стану q_j [10]:

$$\frac{d\omega}{dt}=B\,f(q_j)\left(\frac{\sigma_e}{1-\omega}\right)^k. \tag{2.1}$$

Узагальненням цих та подібних рівнянь є наведений в роботах [4] вираз:

$$\frac{d\omega}{dt}=C\left[\frac{\sigma_e}{1-\omega^r}\right]^m\frac{1}{(1-\omega)^q}\omega^\beta, \tag{2.2}$$

де C, B, m, q, k, r, β – константи матеріалу.

Величина σ_e, що входить до кінетичних рівнянь пошкодженості є значенням еквівалентного напруження, обчисленого відповідно до обраного критерію міцності [6]: максимального нормального напруження $\sigma_e=\sigma_1$, інтенсивності дотичних напружень $\sigma_e=\sigma_1-\sigma_3$, критеріїв Сдобирєва: $\sigma_e=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_i)$; Труніна: $\sigma_e=\frac{1}{2}(\sigma_1+\sigma_i)\,e^{1-2\eta}$, $\eta=\frac{3\sigma_1}{\sigma_1+\sigma_i}$; Г.С.Писаренка–О.О.Лєбєдєва: $\sigma_e=\frac{3}{\sqrt{2}}\chi\tau_{\text{окт}}+(1-\chi)\,\sigma_1$.

Згідно з роботою [4] найбільш загальною структурою виразу для еквівалентного напруження при ізотропному характері накопичення пошкодженості є

$$\sigma_e=\alpha\sigma_1+\beta I_1(\sigma_{ij})+\gamma I_2(s_{ij}), \tag{2.3}$$

де $I_1(\sigma_{ij}), I_2(s_{ij})$ – відповідно перший і другий інваріанти тензора σ_{ij} і девіатора напружень s_{ij} ; α, β, γ – константи матеріалу, α+β+γ = 1.

Конкретизація виразу (2.3) для практичних розрахунків має вигляд:

$$\sigma_e = \alpha\,\sigma_1 + (1-\alpha)\,\sigma_i\,.$$

Рекомендації щодо використання критеріїв міцності надаються залежно від характеру напружено-деформованого стану. При розвязанні задач повзучості час процесу навантаження t подається у вигляді сукупності кроків $t = \sum \Delta t_i$. На кожному кроці здійнюється розвязання нелінійної (з урахуванням деформацій повзучості) задачі із визначення напружено-деформованого стану. Після чого виконується покрокове інтегрування [9] рівнянь пошкодженості за часом:

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \Delta\omega_i = \omega_{i-1} + \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_i * \Delta t_i$$

де $T^* = t(\omega = 1)$, i - номер кроку, $\Delta\omega_i$ -прирощення пошкодженості на кроці навантаження.

Таким чином, для проведення математичного моделювання процесу деформування і континуального руйнування матеріалу в умовах повзучості доцільно використовувати скалярний параметр пошкодженості, а для опису його зміни в часі – кінетичні рівняння вигляду (2.1) – (2.2). Такий спосіб подання пошкодженості є найбільш використовуваним у розрахунковій практиці і найбільш перспективним [2; 4; 8], тому орієнтація на нього при побудові алгоритму розв’язання задач континуального руйнування при повзучості дозволяє проводити чисельні дослідження, використовуючи наявні експериментальні дані про властивості матеріалів у розглядуваних умовах деформування.

3. Фізичні співвідношення механіки континуального руйнування при взаємодії повзучості та втоми. У випдку сумісного виникнення втоми і повзучості модель накопичення сумарної пошкодженості ω_Σ здебільшого задається системою рівнянь, яка містить окремі доданки, що описують складові пошкодження від повзучості ω_c і втоми ω_f . При цьому швидкість накопичення кожної із силових пошкодженості залежить від параметрів напруженого стану (сталих та амплітудних напружень) та величини сумарно накопиченої пошкодженості ω_Σ [3].

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega_c(\sigma_m, \omega_\sigma)}{dt} + \frac{1}{\nu}\frac{d\omega_c(\sigma_a, \omega_\Sigma)}{dt}.$$

Рівняння визначення пошкодженості при взаємодії повзучості та втоми при багатоцикловому навантаженні можна подати у такому вигляді:

$$\frac{d\omega_\Sigma}{dt}=B\left(\frac{\sigma_m}{1-\omega_\Sigma}\right)^n\left(\frac{1}{1-\omega_\Sigma}\right)^{q(\sigma_m)}+\frac{C}{\nu}\left(\frac{\sigma_m}{1-\omega_\Sigma}\right)^m\left(\frac{1}{1-\omega_\Sigma}\right)^{q(\sigma_a)},$$

$$\omega_\Sigma=\omega_c+\omega_f=\int_0^{t_c}\frac{d\omega_c}{dt}d\tau+\frac{1}{\nu}\int_{t_c}^{t_c+t_{f*}}\frac{d\omega_f}{dt}d\tau\,,$$

де t_c – час дії попередньої повзучості, t_f – залишкова втомна довготривалість.

У випадку малоциклового навантаження розрахунок довговічності в умовах одночасного розвитку процесів повзучості і втоми здійснюється на основі нелінійної моделі методом покрокового інтегрування відповідних рівнянь пошкодженості

$$\overset{*}{\omega}=D\frac{(g_1g_2\sigma_e^0)^r}{(1-\omega^0)^1},\quad \omega(0)=\omega_0,\quad \omega(t^*)=1,$$

$$g_1=\left(\int_0^0\left(1+M\left(\frac{2}{3}-\sum_{k=1}^{\infty}\frac{4}{\pi^2k^2}\cos(2\pi k\xi)\right)\right)^s d\xi\right)^{1/s};$$

$$g_2=\left(\int_0^1(1+A_2\sin(2\pi k\xi))^s d\xi\right)^{1/s},\ A_2=\frac{A}{g_1}.$$

Таким чином, для проведення математичного моделювання процесу руйнування матеріалу в умовах одночасної дії повзучості та втоми доцільно використовувати скалярний параметр пошкодженості, а для опису його зміни в часі – кінетичні рівняння вигляду (2.1) –(2.2).

Таким чином, при наявності визначених параметрів напружено-деформованого стану використання вищенаведених рівнянь і визначених за викладеним підходом констант цих рівнянь дозволяє визначати величину пошкодженості при мало- та багатоцикловому навантаженні та умовах повзучості.

Розвязання задач деформування в умовах сумісного виникнення повзучості і втоми також здійснюється на основі кроковоих алгоритмів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бойл Дж.*. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести./ *Бойл Дж., Спенс Дж.* // – М.: Мир, 1976. – 360 с.
2. *Болотин В.В.* Ресурс машин и конструкций. / *Болотин В.В.* // – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
3. *Голуб В.П.* Нелинейная механика континуальной поврежденности и ее приложения к задачам ползучести и усталости / Голуб В.П. // Прикл. механика – 2000. – №3. – С. 31-66.

4. *Голуб В.П.* Определяющие уравнения в нелинейной механике поврежденности // / Голуб В.П. // Прикладная механика.– 1993. – № 10. – С. 37–49.
5. Закономерности ползучести и длительной прочности. Справочник / Под ред. С.А. Шестерикова – М.: Машиностроение, 1983. –101 с.
6. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения. / *Качанов Л.М. //* – М.: Наука, 1974.– 312 с.
7. *Качанов Л.М.* Теория ползучести ./ *Качанов Л.М. //* – М.: Физматгиз, 1960. – 456 с.
8. *Колмогоров В.М.*. Феноменологическая модель накопления повреждений и разрушения при различных условиях нагружения./ *Колмогоров В.М., Мигалев Б.А. //* – Екатеринбург, 1994.– 105 с.
9. Анализ критериев длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии / *Локощенко А.М., Назаров В.В., Платонов Д.Д. Шестериков С.А.* // Известия РАН: Механика твердого тела. – 2003. – №2. – С. 139–149.
10. *Любарт Е.Л.* Об одном параметре состояния при ползучести с учетом разрушения. / *Любарт Е.Л.* // Известия АН СССР. Механика твердого тела.– 1974. – № 1.– С. 141–142.
11. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций / Работнов Ю.Н.// – М.: Наука, 1966. – 752с.
12. *Серенсон С.В.* Усталость материалов и элементов конструкций / С.В. Серенсон - К.:Наук. думка, 1985. с.424
13. *Сильверстов И.Н.* Расчет ресурса и длительной прочности с использованием критерия повреждаемости / Сильверстов И.Н. – Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2006. - №6. – С.116-118.
14. Справочное пособие по расчету машиностроительных конструкций на прочность / Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Уманский С.Э.и др. – К.: Техника, 1990. – 240 с.
15. *Трощенко В.Т.*. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении./ *Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. //* – К.: Наук. думка, 1987. – 257 с.
16. *Шукаєв С.,* Кінетика накопичення розсіяних пошкоджень у металах при короткочасному і тривалому навантаженні / Шукаєв С.,Панасовский К., Назаренко І.// Машинознавство. – 2006. – №9-10. – С. 27–29.
17. *Lemaitre J.* Coupled Elasto-Plasticity and Damage Constitutive Equations. // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1985. – № 51. – P. 31–49.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013 р.

Гуляр О.И., Пискунов С.О., Мицюк С.В.

ОБЗОР СООТНОШЕНИЙ КОНТИНУАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОЛЗУЧЕСТИ И УСТАЛОСТИ.

Выполнен обзор уравнений накопления повреждаемости, приведены общие алгоритмы суммирования повреждений и выражения для определения ресурса при усталости, ползучести, а также при их одновременном возникновении.

Gulyar O.I., Pyskunov S.O., Mytsyuk S.V.

REVIEW OF CORRELATIONS OF CONTINUAL DAMAGE MECHANICS FOR PROCESSES OF CREEP AND FATIGUE DESCRIPTION.

The review of the equations of damage accumulation is carried out, the general algorithms of damage summation and expression for life-time definition are given at fatigue, creep, and also at their simultaneous emergence.