

## **Поврежденность конструкционных материалов при сложном малоцикловом нагружении**

**Н. И. Бобырь, Б. О. Яхно, А. П. Грабовский**

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

*На основе положений континуальной механики поврежденности изложен инженерный метод оценки кинетики накопления рассеянных повреждений в металлических конструкционных материалах при их упругопластическом деформировании и малоцикловой усталости. Установлено, что при сложном напряженном состоянии в качестве параметра поврежденности при двух видах разрушения (отрыв и срез) целесообразно в общем виде сложного нагружения принимать удельную энергию дополнительных напряжений с учетом дуги пластического деформирования в цикле нагружения.*

**Ключевые слова:** малоцикловая усталость, эффект Баушингера, феноменологические модели накопления повреждений, удельная энергия дополнительных напряжений.

При упругопластическом деформировании конструкционных материалов происходит зарождение, рост и накопление микроповреждений [1–9]. Под микроповреждениями принято понимать совокупность непрерывных, сложных и не совсем изученных процессов на субмикро-, микро- и макроуровнях изменений в материале при термомеханическом нагружении, что, в свою очередь, приводит к деградации его механических свойств и снижению несущей способности конструкции в целом [1–12].

Для малоцикловой усталости стадия накопления рассеянных повреждений (РП) в высоконагруженных зонах несущих элементов конструкции составляет до 90% общего ресурса (с учетом живучести). Знание и учет кинетики накопления РП в конструкционном материале в зависимости от сложных термосиловых процессов технологической и эксплуатационной нагруженности позволяют расчетно-экспериментальными методами более достоверно прогнозировать ресурс элементов конструкций на стадии их проектирования, а также остаточный ресурс на стадии эксплуатации.

При решении данной проблемы наиболее перспективным является феноменологический подход, согласно которому в качестве количественного параметра используются силовые, деформационные или энергетические величины [13–15]. Этот подход базируется на основных положениях континуальной механики повреждений (КМП). Основные положения КМП (или континуальной механики разрушения на стадии зарождения макротрещины) сформулированы Л. М. Качановым и Ю. Н. Работновым применительно к процессам ползучести [3, 4]. До настоящего времени пока не разработано однозначно признанной достоверной методики определения закономерностей зарождения и накопления РП [16–18]. В первом приближении в качестве параметра поврежденности, как правило, используют скалярную величину и закон ее изменения в зависимости от термосиловых условий нагружения. В общем случае модель поврежденности входит в систему определяющих

уравнений, от достоверности которых зависит точность расчета ресурса элементов конструкций при малоциклового усталости.

Исследование циклической прочности широкого класса металлических материалов и конструктивных элементов при одноосном напряженном состоянии с широким использованием физических методов показало, что основную роль в процессах накопления РП играют микронеоднородности структуры материала и связанные с ними дополнительные напряжения (в литературных источниках – микронапряжения), макропроявлением которых выступает эффект Баушингера [8, 14, 17–19]. В работе [5] КМП получила дальнейшее научное обоснование и развитие на основе положений термодинамики необратимых процессов. Однако единый экспериментально обоснованный подход относительно исследования кинетики накопления РП и критериев разрушения на стадии зарождения макротрещины при сложном малоцикловом нагружении отсутствует.

Цель настоящей работы заключается в установлении закономерностей накопления повреждений в зависимости от истории нагружения с последующей разработкой обобщенной феноменологической модели поврежденности металлических конструкционных материалов. Ниже приведены результаты определения обобщенного феноменологического параметра, который позволяет описывать закономерности кинетики накопления РП при сложном малоцикловом нагружении.

Энергетические трактовки параметра поврежденности  $D_{ij}$  рассматривали на основе наиболее перспективных в настоящее время двух подходов: термодинамики необратимых процессов и удельной энергии дополнительных напряжений [8, 16, 17]. При этом компоненты тензора эффективных напряжений  $\sigma_{ij}^{(эф)}$  с учетом параметра поврежденности  $D_{ij}$  определяли следующим образом [3, 5, 9, 13]:

$$\sigma_{ij}^{(эф)} = \frac{\sigma_{ij}^{(ист)}}{1 - \delta_{ij} D_{ij}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ij}^{(ист)}$  – компоненты тензора истинных напряжений;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Для начально-изотропных конструкционных материалов в первом приближении принят параметр поврежденности как скаляр  $D$ , который зависит от интенсивности необратимых деформаций в цикле  $\Delta \varepsilon_{ip}$  и числа циклов  $N$  сложного малоциклового нагружения. Тогда текущее значение скалярного параметра  $D$  согласно термодинамическому подходу определяется как  $D = \int_0^N \frac{d\Omega}{\Omega_D}$ , по концепции удельной энергии дополнительных напряжений –  $D = \int_0^N \frac{d\Psi}{\Psi_D}$ , где  $\Omega_D$  и  $\Psi_D$  – предельные значения удельных энергий

в соответствии с указанными подходами. Кроме того, они могут быть определены по результатам базовых экспериментов для данного конструк-

ционного материала. Сравним величины этих энергий для активного и малоциклового нагружений при растяжении и кручении.

Полагаем, что накопление повреждений изменяет деформированное состояние первоначально изотропного материала только через эффективное напряжение. Таким образом, деформированное состояние поврежденного материала представлено определяющими уравнениями для неповрежденного материала, в потенциале которого напряжения заменены эффективным напряжением.

Исходя из понятия о свободной энергии Гельмгольца термодинамический потенциал для изотермического процесса ( $\Omega_D$ ) после интегрирования численно равен удельной энергии деформирования материала [5]. Для одноосного активного нагружения величина  $\Omega_D^{(\sigma)}$  показана на рис. 1. Диаграмму деформирования при одноосном растяжении согласно зависимости (1) условно разделим на истинную и эффективную. Эффективная диаграмма деформирования отражает действительно существующие в конструкционном материале напряжения с учетом накопленных повреждений.

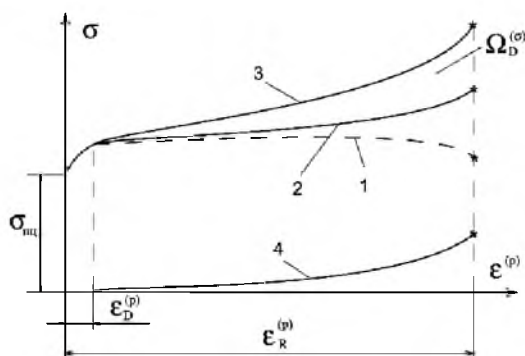


Рис. 1. Условная (1), истинная  $\sigma^{(\text{ист})}$  (2), эффективная  $\sigma^{(\text{эф})}$  (3) диаграммы деформирования конструкционного материала при одноосном растяжении и зависимость дополнительного напряжения  $\sigma_x$  от уровня пластической деформации  $\epsilon^{(p)}$  (4).

Тогда дополнительное напряжение  $\sigma_x$  в материале, возникшее в результате микродефектов, имеет следующий вид:

$$\sigma_x = \sigma^{(\text{эф})} - \sigma^{(\text{ист})} = \sigma^{(\text{ист})}(\epsilon^{(p)}) \frac{D_\sigma(\epsilon^{(p)})}{1 - D_\sigma(\epsilon^{(p)})}, \quad (2)$$

где  $D_\sigma(\epsilon^{(p)})$  – скалярный параметр поврежденности при растяжении.

Аналогично получено выражение для дополнительного напряжения  $\tau_x$  из диаграммы деформирования при чистом сдвиге:

$$\tau_x = \tau^{(\text{эф})} - \tau^{(\text{ист})} = \tau^{(\text{ист})}(\gamma^{(p)}) \frac{D_\tau(\gamma^{(p)})}{1 - D_\tau(\gamma^{(p)})}, \quad (3)$$

где  $D_\tau(\gamma^{(p)})$  – скалярный параметр поврежденности при чистом сдвиге.

Часть механической энергии, которая расходуется на создание микроповреждений при отрыве и срезе, может быть определена по зависимостям:

$$\Omega_D^{(\sigma)} = \int_{\varepsilon_D^{(p)}}^{\varepsilon_R^{(p)}} \sigma^{(\text{ист})}(\varepsilon^{(p)}) \frac{D_\sigma(\varepsilon^{(p)})}{1 - D_\sigma(\varepsilon^{(p)})} d\varepsilon^{(p)}; \quad (4)$$

$$\Omega_D^{(\tau)} = \int_{\gamma_D^{(p)}}^{\gamma_R^{(p)}} \tau^{(\text{ист})}(\gamma^{(p)}) \frac{D_\tau(\gamma^{(p)})}{1 - D_\tau(\gamma^{(p)})} d\gamma^{(p)}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_D^{(p)}$ ,  $\gamma_D^{(p)}$  – пороговые значения пластических составляющих деформации, при которых поврежденность влияет на процессы упругопластического деформирования;  $\varepsilon_R^{(p)}$ ,  $\gamma_R^{(p)}$  – граничные пластические составляющие деформации на уровне образования макротрещины при растяжении и кручении соответственно.

В случае сложного нагружения на основании концепции разрушения путем отрыва и сдвига [9, 13, 14] суммарную удельную энергию  $\Omega_D$  определяли как соответствующую сумму удельных энергий составляющих повреждения:

$$\Omega_D = 2(\Omega_D^{(\sigma)} + \Omega_D^{(\tau)}). \quad (6)$$

Для сложного симметричного малоциклового нагружения на стадии условно установившегося режима суммарную энергию в цикле ( $\Omega_D^{(u)}$ ) логично записать в виде

$$\Omega_D^{(u)} = \int_{\delta_\sigma^{(+)}} \sigma_x^{(+)} d\varepsilon(1+h) + 2 \int_{\delta_\tau} \tau_x d\gamma, \quad (7)$$

где  $\delta_\sigma^{(+)}$  и  $\delta_\tau$  – ширина петли пластического гистерезиса в полуциклах растяжения и кручения соответственно;  $h$  – параметр ( $h < 1$ ), который позволяет учитывать процессы “залечивания” микроповреждений при отрицательном значении первого инварианта тензора напряжений.

Тогда за  $N$  циклов сложного симметричного малоциклового нагружения (деформирования) суммарная удельная энергия  $\Omega_D^{(\Sigma)}$  определяется следующим образом:

$$\Omega_D^{(\Sigma)} = \int_0^N \Omega_D^{(u)} dN. \quad (8)$$

Согласно концепции энергии дополнительных напряжений, макропроявлением которой является эффект Баушингера, накопление микроповреждений обусловлено кинематической составляющей упрочнения конструк-

ционного материала [8, 13, 14]. При этом дополнительные напряжения и связанное с ними смещение поверхности пластичности приводят к изменениям границы упругости (пропорциональности). Приращение предела пропорциональности определяли в зависимости от уровня пластической деформации:

$$\Delta\sigma^{(\pm)}(\varepsilon^{(p)}) = \sigma_{\text{пц}}^{(\pm)}(\varepsilon^{(p)}) - \sigma_{0\text{пц}}^{(\pm)}; \quad (9)$$

$$\Delta\tau^{(\pm)}(\gamma^{(p)}) = \tau_{\text{пц}}^{(\pm)}(\gamma^{(p)}) - \tau_{0\text{пц}}; \quad (10)$$

где  $\sigma_{0\text{пц}}^{(\pm)}$  – предел пропорциональности при растяжении и сжатии в полупериоде  $k=0$ ;  $\tau_{0\text{пц}}$  – предел пропорциональности при кручении в полупериоде  $k=0$ ;  $\sigma_{\text{пц}}^{(\pm)}(\varepsilon^{(p)})$ ,  $\tau_{\text{пц}}^{(\pm)}(\gamma^{(p)})$  – текущие значения предела пропорциональности при растяжении (сжатии) и кручении соответственно.

Введем функцию дополнительных напряжений по компонентам  $\rho_{\sigma}(\varepsilon^{(p)})$  и  $\rho_{\tau}(\gamma^{(p)})$ , которая отражает закономерности накопления микроповреждений в зависимости от уровня пластической деформации в цикле и от цикла к циклу малоциклового нагружения при растяжении и кручении соответственно (рис. 2):

$$\rho_{\sigma}(\varepsilon^{(p)}) = \Delta\sigma^{(+)}(\varepsilon^{(p)}) + \Delta\sigma^{(-)}(\varepsilon^{(p)}); \quad (11)$$

$$\rho_{\tau}(\gamma^{(p)}) = \Delta\tau^{(+)}(\gamma^{(p)}) + \Delta\tau^{(-)}(\gamma^{(p)}). \quad (12)$$

Удельную энергию дополнительных напряжений  $\rho$  в случае статического нагружения при совместном действии осевой силы  $\Psi_{\text{ст}}^{(\sigma)}$  и крутящего момента  $\Psi_{\text{ст}}^{(\tau)}$  определяли следующим образом:

$$\Psi_{\text{ст}} = \Psi_{\text{ст}}^{(\sigma)} + \Psi_{\text{ст}}^{(\tau)} = \int_{\varepsilon_D^{(p)}}^{\varepsilon_R^{(p)}} \rho_{\sigma}(\varepsilon^{(p)}) d\varepsilon^{(p)} + \int_{\gamma_D^{(p)}}^{\gamma_R^{(p)}} \rho_{\tau}(\gamma^{(p)}) d\gamma^{(p)}. \quad (13)$$

При малоцикловой усталости удельная энергия  $\Psi_{\text{ц}}$  дополнительных напряжений за  $N_R$  циклов сложного нагружения имеет вид

$$\Psi_{\text{ц}} = \int_0^{N_R} (\Psi_{\text{ц}}^{(\sigma)} + \Psi_{\text{ц}}^{(\tau)}) dN, \quad (14)$$

где  $\Psi_{\text{ц}}^{(\sigma)} = \int_0^{\Delta\varepsilon^{(p)}} \rho_{\sigma\text{ц}} d\varepsilon^{(p)}$ ,  $\Psi_{\text{ц}}^{(\tau)} = \int_0^{\Delta\gamma^{(p)}} \rho_{\tau\text{ц}} d\gamma^{(p)}$  – приращение удельной энергии дополнительных напряжений в среднем (условно стабилизированном) цикле при растяжении–сжатии и кручении соответственно.

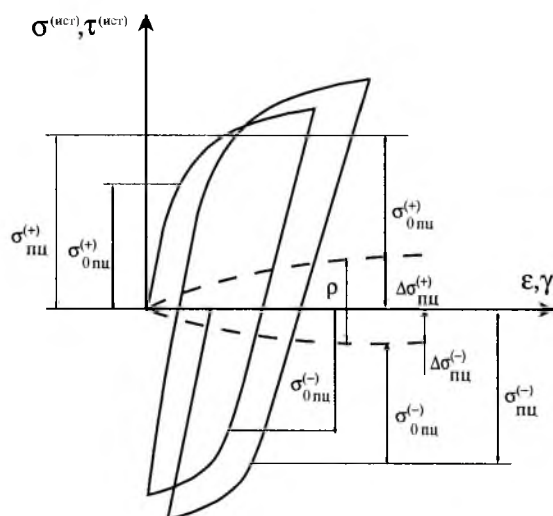


Рис. 2. Изменение предела пропорциональности в конструкционном материале при повторно-переменном нагружении.

В обоих подходах напряжения  $\sigma_x$ ,  $\tau_x$ ,  $\rho_\sigma$ ,  $\rho_\tau$  можно назвать компонентами дополнительных напряжений. Они монотонно увеличиваются в зависимости от уровня пластической деформации. Обе компоненты дополнительных напряжений для каждого из энергетических подходов связаны с возникновением и развитием микрповреждений в конструкционном металлическом материале в общем виде упругопластического упрочнения.

Экспериментальную проверку энергетических подходов осуществляли на модернизированном испытательном стенде типа УМЭ-10ТМ при плоском напряженном состоянии (при совместном действии осевой силы и крутящего момента) и разных траекториях нагружения по методике, детально описанной в работе [18]. Текущее значение интенсивностей дополнительных напряжений  $\rho_i$  и  $\sigma_{xi}$  определяли по зависимостям:

$$\rho_i = \sqrt{\rho_\sigma^2 + 3\rho_\tau^2}; \quad \sigma_{xi} = 2\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_x^2}. \quad (15)$$

Аналогично определена интенсивность полных деформаций  $\varepsilon_i$ :

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon^2 + \left(\frac{\gamma}{\sqrt{3}}\right)^2}.$$

Испытания проводили на образцах [18], изготовленных из сплава Д16Т в состоянии поставки при температуре  $T = 293$  К. Химсостав (%) материала следующий: 92,63 Al; 4,1 Cu; 1,6 Mg; 0,64 Mn; 0,47 Fe; 0,33 Si; 0,03 Ti, 0,02 Cr и 0,18 Zn. Осуществлены траектории пропорционального и непропорционального режимов нагружения с приростом от цикла к циклу необратимых деформаций вплоть до разрушения. Пределы пропорциональности при нагрузке с последующей разгрузкой определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84

и ГОСТ 3565-80. Для случая непропорционального нагружения использовали траекторию в виде замкнутого квадрата. При этом кинетика накопления повреждений проявляется наиболее контрастно.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований согласно зависимостям (2), (3), (7), (13) и (15) показаны на рис. 3.

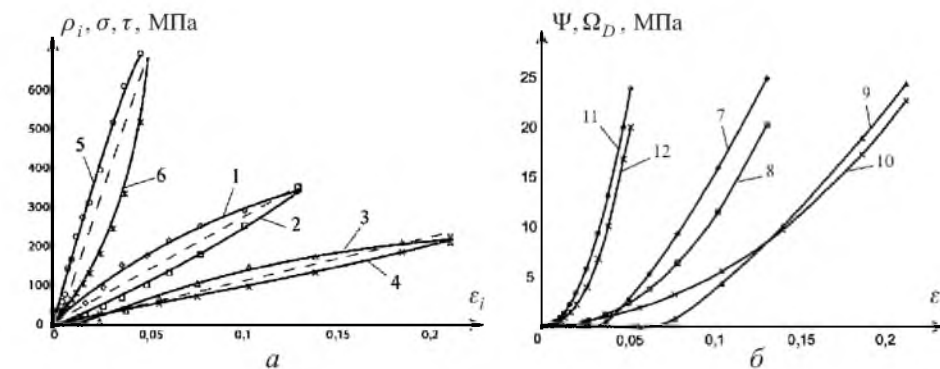
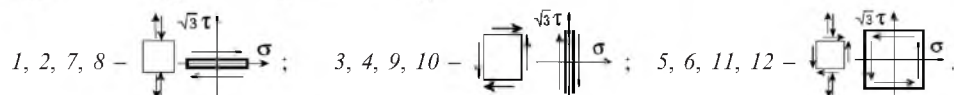


Рис. 3. Зависимости интенсивности дополнительных напряжений (а) и их удельной энергии (б) от уровня интенсивности пластической деформации для алюминиевого сплава Д16Т при  $T = 293$  К: 1 –  $\rho_i^{(\sigma)}$ ; 2 –  $2\sigma_x$ ; 3 –  $\rho_i^{(\tau)}$ ; 4 –  $2\sqrt{3}\tau_x$ ; 5 –  $\rho_i^{(\Sigma)}$ ; 6 –  $2\sigma_{xi}^{(\Sigma)}$ ; 7 –  $\Psi_{ст}^{(\sigma)}$ ; 8 –  $2\Omega_{D_{ст}}^{(\sigma)}$ ; 9 –  $\Psi_{ст}^{(\tau)}$ ; 10 –  $2\Omega_{D_{ст}}^{(\tau)}$ ; 11 –  $\Psi_{ст}^{(\Sigma)}$ ; 12 –  $2\Omega_{D_{ст}}^{(\Sigma)}$ ;



Из рис. 3,а видно, что дополнительные напряжения  $\rho_i$  и  $\sigma_{xi}$  удовлетворительно описывают один и тот же процесс накопления РП в металлическом конструкционном материале и имеют практически одинаковые предельные значения. За основу расчета кинетики накопления РП принята модель, которая базируется на учете параметра  $\rho_i$ . Расчет с помощью этого параметра “идет” в запас прочности, а также позволяет использовать для определения интенсивности дополнительных напряжений  $\rho_i$  теорию пластического течения с анизотропным упрочнением [19].

Характер кинетики накопления РП при статическом и малоцикловом нагружении различается в зависимости от степени хрупкости материала и термосиловых условий упругопластического деформирования (рис. 4).

Так, для сплава Д16Т поврежденность при активном нагружении в условиях растяжения с использованием в качестве параметра относительной величины удельной энергии дополнительных напряжений  $D_{ст} = \Psi_i / \Psi_{ст(\max)}$  ( $0 \leq D \leq 1$ ) является практически линейной функцией от уровня пластической деформации  $\varepsilon^{(p)}$ ;  $\Psi_{ст(\max)} = \Psi_{ст(\max)}^\sigma$  – предельное значение удельной энергии дополнительных напряжений согласно зависимости (13) при одноосном активном растяжении. Для более пластичных материалов (на рис. 4 кривые 2, 3) характер накопления повреждений существенно нелинейный.

Кинетика накопления повреждений при статическом и малоцикловом нагружении в относительных величинах описывается зависимостью

$$\frac{dD_q}{dq} = B_1 \rho_i^{1+B_2q} + B_3 U. \quad (16)$$

Решение уравнения (16) можно отыскивать в следующем виде:

$$D_q = B_1 \int_0^q \rho_i^{1+B_2q} \exp[B_3(1-q)] dq, \quad (17)$$

где  $B_1, B_2, B_3$  – постоянные материала.

Для статического нагружения примем параметр  $q = \varepsilon^{(p)} / \varepsilon_R^{(p)}$ , для малоциклового –  $q = N / N_R$ , где  $\varepsilon^{(p)}$  и  $N$  – текущие значения пластической деформации и числа циклов малоциклового нагружения соответственно;  $\varepsilon_R^{(p)}$  и  $N_R$  – их предельные значения.

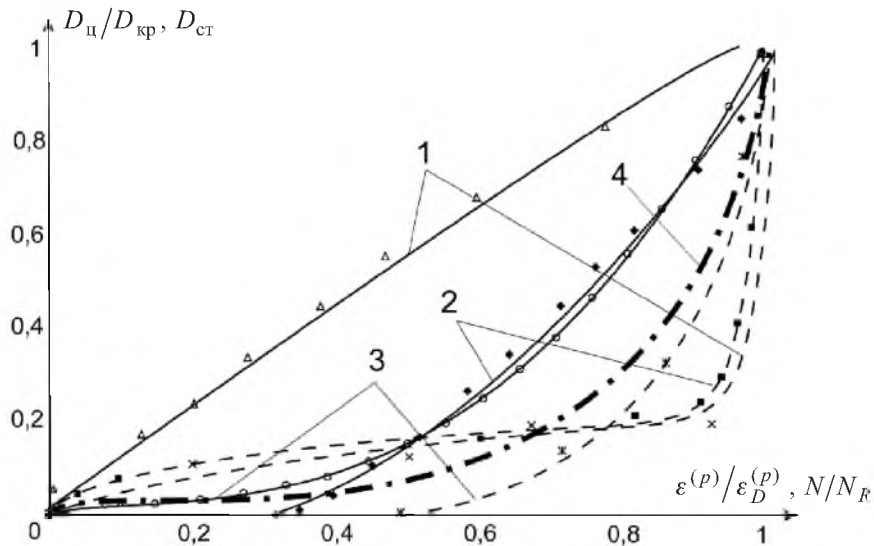


Рис. 4. Кинетика накопления повреждений в конструкционных материалах при активном (сплошные линии) и малоциклового (штриховые линии) нагружения: 1, 4 – сплав Д16Т; 2 – медь 99,9% [17]; 3 – сталь 316 [17].

Расчетная кривая кинетики накопления повреждений для сплава Д16Т при малоциклового нагружении и значениях  $B_1 = 3,2$ ,  $B_2 = 0$ ,  $B_3 = -3$  с асимметрией цикла  $R_\sigma = -1$  показана на рис. 4 кривой 4. Сравнение ее с соответствующими экспериментальными данными (на рис. 4 штриховая линия 1) показало удовлетворительное их соответствие.

Таким образом, для уточнения инженерных расчетов ответственных элементов конструкций в зонах их повышенной нагруженности в систему определяющих уравнений необходимо вводить параметр поврежденности в виде удельной энергии, который позволяет учитывать два вида разрушения: отрыв и срез.



**Резюме**

На базі положень континуальної механіки пошкоджуваності викладено інженерний метод оцінки кінетики накопичення розсіяних пошкоджень у металічних конструкційних матеріалах при їх пружно-пластичному деформуванні та малоцикловій втомі. Установлено, що за складного напруженого стану за параметр пошкоджуваності при двох видах руйнування (відрив та зріз) доцільно в загальному випадку складного навантаження приймати питому енергію додаткових напружень з урахуванням дуги пластичного деформування в циклі навантаження.

1. Троценко В. Т., Красовский А. Я., Стрижало В. А. и др. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. – Киев: Наук. думка, 1994. – Т. 2. – 700 с.
2. Махутов Н. А., Воробьев А. З., Гаденин М. М. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1983. – 270 с.
3. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. От-ние техн. наук. – 1958. – № 8. – С. 26 – 35.
4. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
5. Леметр Д. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластических материалов // Теорет. основы инж. расчетов. – 1985. – 107, № 1. – С. 90 – 98.
6. Гусенков А. П., Котов П. И. Малоцикловая усталость при неизотермическом нагружении. – М.: Машиностроение, 1983. – 242 с.
7. Казанцев А. Г. К расчету малоцикловой усталости при непропорциональных режимах нагружения // Пробл. прочности. – 1989. – № 6. – С. 31 – 36.
8. Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. – 279 с.
9. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О., Недосека С. А. Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании // Пробл. прочности. – 1996. – № 5. – С. 23 – 30.
10. Троценко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
11. Одесский П. Д. О деградации свойств сталей для металлических конструкций // Завод. лаб. – 2003. – 69, № 10. – С. 41 – 49.
12. Байков В. М., Бутушин С. В., Махутов Н. А. Исследование деградации механических характеристик конструкционного сплава Д16Т в результате воздействия эксплуатационной наработки // Там же. – 2003. – 70, № 11. – С. 50 – 54.
13. Мовчан А. А. О малоцикловой усталости при непропорциональном симметричном деформировании // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1983. – № 3. – С. 102 – 108.

14. *Коротких Ю. Г.* Описание процессов накопления повреждений материала при изотермическом вязкопластическом деформировании // Пробл. прочности. – 1985. – № 1. – С. 18 – 23.
15. *Голуб В. П.* Нелинейная механика континуальной поврежденности и ее приложение к задачам ползучести и усталости // Прикл. механика. – 2000. – **36**, № 3. – С. 31 – 59.
16. *Barbero E. and Greco F.* Continuum damage-healing mechanics with application to self-healing composites // Int. J. Damage Mech. – 2005. – **14** (January). – P. 51 – 81.
17. *Lemaitre J.* Damage mechanics. – Great Britain: The Bath Press, 1990. – 556 p.
18. *Бобырь Н. И., Грабовский А. П., Тимошенко А. В., Халимон А. П.* Методика определения накопления повреждений в металлических конструкционных материалах при сложном упругопластическом нагружении // Пробл. прочности. – 2006. – № 1. – С. 128 – 137.
19. *Новожилов В. В., Кадашевич Ю. И.* Микронапряжения в конструкционных материалах. – Л.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

Поступила 25. 04. 2006