

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Н.И. Бобыр, Б.О. Яхно, А.П. Грабовский

MODELING OF THE DAMAGE ACCUMULATION PROCESSES UNDER LOW-CYCLE LOADING

N. I. Bobyr, B. O. Yakhno, A. P. Grabovskiy

*Национальный технический университет Украины «Киевский
политехнический институт», Киев, Украина.*

Процессы эксплуатационного нагружения конструкционных материалов сопровождаются зарождением, ростом и накоплением микроповреждений [1-12]. Для условий малоциклового усталости стадия накопления рассеянных повреждений (РП) в высоконагруженных зонах несущих элементов конструкции составляет до 90% от общего их ресурса (схема накопления повреждений и разрушения при сложном напряженном состоянии представлена на рис.1). Знание и учет кинетики накопления РП в конструкционном материале в зависимости от сложных термосиловых процессов технологической и эксплуатационной нагруженности позволяет расчетными методами более достоверно прогнозировать ресурс эксплуатации названных элементов конструкций на стадии их инженерного проектирования.

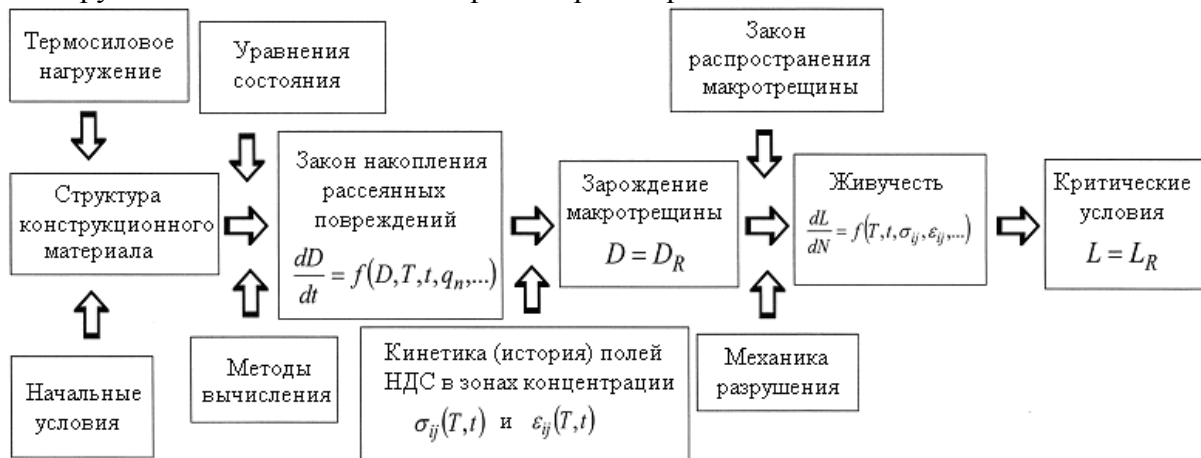


Рис.1. Поврежденность и предельное состояние конструктивных элементов.

Для решения названной проблемы наиболее перспективным для инженерного использования является феноменологический подход, когда 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 сформулированы Л.М. Качановым и Ю.Н. Работновым применительно к процессам ползучести [3,4]. В то же время на сегодня пока не разработано однозначно признанной достоверной методики определения закономерностей зарождения и накопления РП на стадии зарождения макротрещины [16]. 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, достоверность которых играет основную роль в точности расчета ресурса эксплуатации элементов конструкций на малоцикловую усталость.

Исследование циклической прочности широкого класса металлических материалов при одноосном напряженном состоянии с широким использованием физических методов показало, что основную роль в процессах накопления РП играют микронеоднородности структуры материала и связанные с ним дополнительные напряжения, макропроявлением которых выступает эффект Баушингера [8,14,17]. Позднее в работе [5] на основе положений термодинамики необратимых процессов КМП получила дальнейшее научное обоснование и развитие. Однако на сегодня пока отсутствует единый экспериментально обоснованный подход по исследованию кинетики накопления РП и критериев разрушения на стадии зарождения макротрещины при сложном малоцикловом нагружении. В связи с этим целью настоящей работы является установление закономерностей накопления повреждений в зависимости от истории нагружения с последующей разработкой обобщенной феноменологической модели поврежденности металлических конструкционных материалов.

Энергетические трактовки параметра поврежденности D рассмотрены на основе термодинамики необратимых процессов и удельной энергии дополнительных напряжений (микронапряжений). При этом компоненты тензора эффективных напряжений $\sigma_{ij}^{(эф)}$ с учетом параметра поврежденности определены следующим образом:

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

где $\sigma_{ij}^{(ucm)}$ – компоненты тензора истинных напряжений, δ_{ij} – символ Кронекера.

В работе принято, 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 (Ω_D) после интегрирования численно равен удельной энергии деформирования материала [5]. Для условий одноосного активного нагружения величина Ω_D^σ показана на рис.2. Для этого диаграмму деформирования при одноосном растяжении условно разделено на истинную и эффективную. Эффективная диаграмма деформирования отражает действительно существующие в конструкционном материале напряжения с учетом поврежденности.

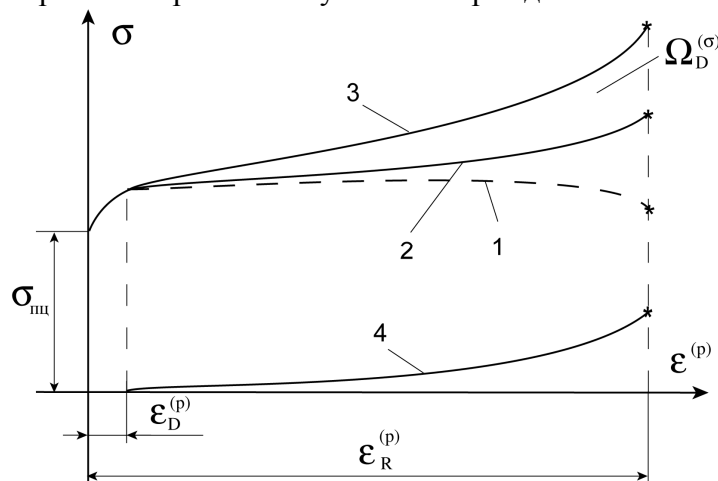


Рис.2. Диаграммы деформирования конструкционного материала при одноосном растяжении (1 – условная, 2 – истинная ($\sigma^{(ucm)}$), 3 – эффективная ($\sigma^{(эф)}$)) и зависимость дополнительного напряжения σ_x (4) от уровня пластической деформации $\varepsilon^{(p)}$.

Тогда дополнительное напряжение (σ_x), которое возникает в материале в результате возникновения микродефектов, имеет следующий вид:

$$\sigma_x = \sigma_{эф} - \sigma_{ист} = \sigma_{ист}(\varepsilon^{(p)}) \frac{D_\sigma(\varepsilon^{(p)})}{1 - D_\sigma(\varepsilon^{(p)})} \quad (2)$$

Аналогичным образом получено выражение для дополнительного напряжения τ_x из диаграммы деформирования при чистом сдвиге:

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

Часть механической энергии, которая тратится на создание микроповреждений в условиях отрыва и среза, может быть определена следующими зависимостями:

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

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

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

В общем случае сложного нагружения, исходя из концепции разрушения путем отрыва и сдвига [9,13,14], суммарная удельная энергия дополнительных напряжений определена, как соответствующая сумма удельных энергий повреждения:

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

Для условий сложного симметричного мало циклового нагружения на стадии условно установившегося режима суммарную энергию дополнительных напряжений в цикле ($\Omega_D^{(y)}$) логично записать в виде:

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

где $\delta_\sigma^{(+)}$ та δ_τ - ширина петли пластического гистерезиса в полупериоде растяжения и полупериоде кручения, соответственно; h - параметр ($h < 1$), который учитывает процессы «залечивания» микроповреждений при отрицательном значении первого инварианта тензора напряжений.

Тогда за N циклов сложного малоциклового нагружения (деформирования) суммарная энергия дополнительных напряжений $\Omega_D^{(\Sigma)}$ определяется:

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

Согласно концепции энергии микронапряжений, накопление микроповреждений связано с кинематической составляющей упрочнения конструкционного материала [8,13,14]. При этом микронапряжения и связанное с ними смещение поверхности пластичности приводит к изменениям границы упругости (пропорциональности). В работе определено приращение предела пропорциональности в зависимости от уровня пластической деформации как:

$$\Delta\sigma^{(\pm)}(\varepsilon^{(p)}) = \sigma_{m\mu}^{(\pm)}(\varepsilon^{(p)}) - \sigma_{0m\mu}^{(\pm)} \quad (9)$$

$$\Delta\tau^{(\pm)}(\gamma^{(p)}) = \tau_{m\mu}^{(\pm)}(\gamma^{(p)}) - \tau_{0m\mu}^{(\pm)} \quad (10)$$

где $\sigma_{0m\mu}^{(\pm)}$ - предел пропорциональности в полупериоде $k=0$ при растяжении и сжатии, соответственно; $\tau_{0m\mu}^{(\pm)}$ - предел пропорциональности при кручении в полупериоде $k=0$;

$\sigma_{нц}^{(\pm)}(\varepsilon^{(p)})$ и $\tau_{нц}^{(\pm)}(\gamma^{(p)})$ - текущие значения предела пропорциональности при растяжении (сжатии) и кручении, соответственно.

Введено функцию микронапряжений по компонентам $\rho_\sigma(\varepsilon^{(p)})$ и $\rho_\tau(\varepsilon^{(p)})$, которая отражает закономерности накопления микроповреждений в зависимости от уровня пластической деформации в цикле и от цикла к циклу малоциклового нагружения (рис. 3):

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

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

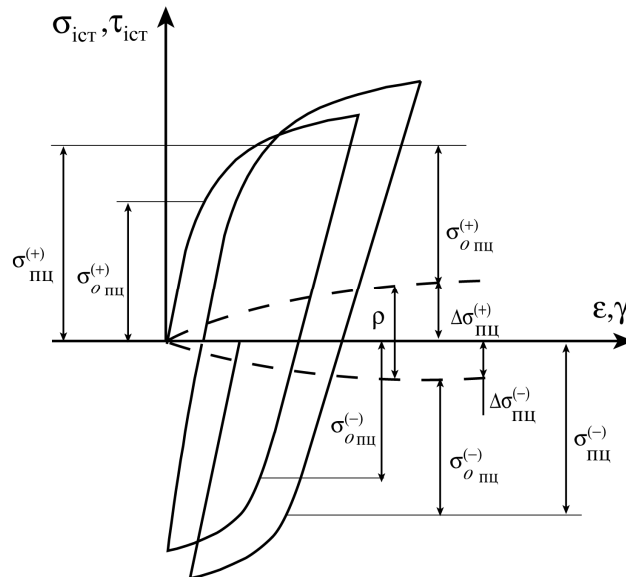


Рис.3. Изменение предела пропорциональности в конструкционном материале при повторно-переменном нагружении.

Удельная энергия дополнительных напряжений ρ в случае статического нагружения при совместном действии осевой силы ($\Psi_{cm}^{(\sigma)}$) и крутящего момента ($\Psi_{cm}^{(\tau)}$) записана следующим образом:

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

Для условий малоциклового усталости удельная энергия дополнительных напряжений Ψ_u за N_R циклов сложного нагружения определена:

$$\Psi_u = \int_0^{N_R} (\Psi_u^{(\sigma)} + \Psi_u^{(\tau)}) dN \quad (14)$$

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

Дополнительные напряжения, которые определяются величинами ρ и σ_x монотонно увеличиваются в зависимости от уровня пластической деформации. Обе этих величины вызваны возникновением и развитием микроповреждений в конструкционном металлическом материале в общем виде упругопластического упрочнения.

Экспериментальная проверка изложенных результатов осуществлена на модернизированном испытательном стенде типа УМЭ-10ТМ для условий плоского напряженного состояния (при совместном действии осевой силы и крутящего момента) и разных траекторий нагружения по методике, которая детально описана в работе [18].

Текущее значение интенсивностей дополнительных напряжений ρ_i и σ_x определены по зависимостях:

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

Аналогичным образом была вычислена и интенсивность полных деформаций ($\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon^2 + \left(\frac{\gamma}{\sqrt{3}}\right)^2}$). Испытания проведены на образцах, которые изготовлены из сплава

Д16Т при температуре $T=293\text{K}$. В состоянии поставки материал состоял из: Al – 92,63%; Cu – 4,1%; Mg – 1,6%; Mn – 0,64%; Fe – 0,47%; кремний – 0,33%; Ti – 0,03%, Xr – 0,02% и Zn – 0,18%. 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 определены в соответствии с ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 3565-80. Для случая непропорционального нагружения выбрана траектория в виде замкнутого квадрата, при котором кинетика накопления повреждений проявляется наиболее контрастно.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований согласно зависимостей (2, 3, 7, 13 и 15) показаны на рис.4. При этом в скобках показаны обозначения для рис.3б.

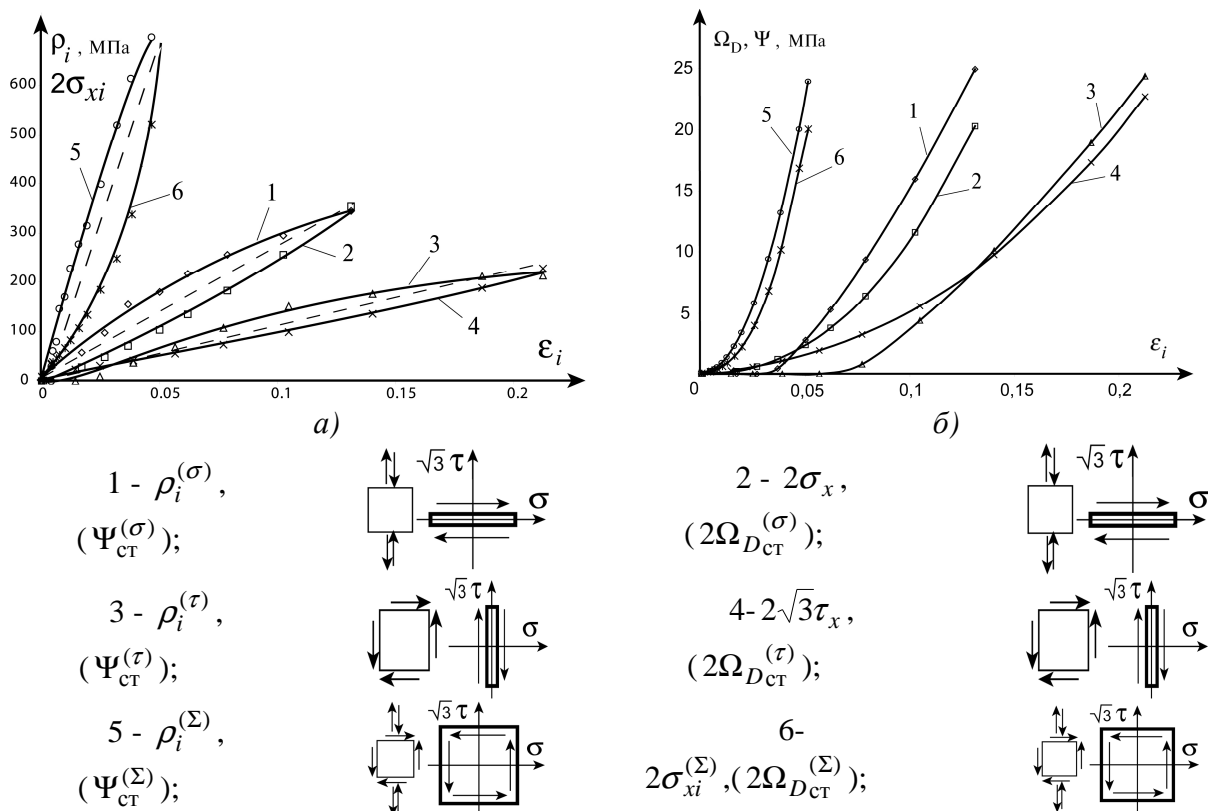


Рис.4. Зависимость интенсивности дополнительных напряжений (а) и удельной энергии дополнительных напряжений (б) от уровня интенсивности пластической деформации для алюминиевого сплава Д16Т при $T=293\text{K}$.

Из рис. За видно, что дополнительные напряжения ρ и σ_x удовлетворительно описывают один и тот же процесс накопления РП в металлическом конструкционном материале и имеют практически одинаковые свои предельные значения. В дальнейшем за основу расчета кинетики накопления РП принята модель, которая базируется на параметре ρ_i . При этом расчет на базе этого параметра «идет» в запас прочности, а также позволяет использовать теорию пластического течения с анизотропным упрочнением.

Кинетика накопления РП при статическом и малоцикловом нагружениях имеет различный характер в зависимости от степени хрупкости материала и термосиловых условий упругопластического деформирования (рис.5).

Так для сплава Д16Т поврежденность при активном нагружении в условиях растяжения с использованием в качестве параметра относительной величины удельной энергии дополнительных напряжений $U = \frac{\Psi_i}{\Psi_{ст.макс}}$ ($0 \leq U \leq 1$) является практически

линейной функцией от уровня пластической деформации $\varepsilon^{(p)}$. Для более пластичных материалов (кривые 2, 3 на рис.4) характер накопления повреждений носит существенно нелинейный характер.

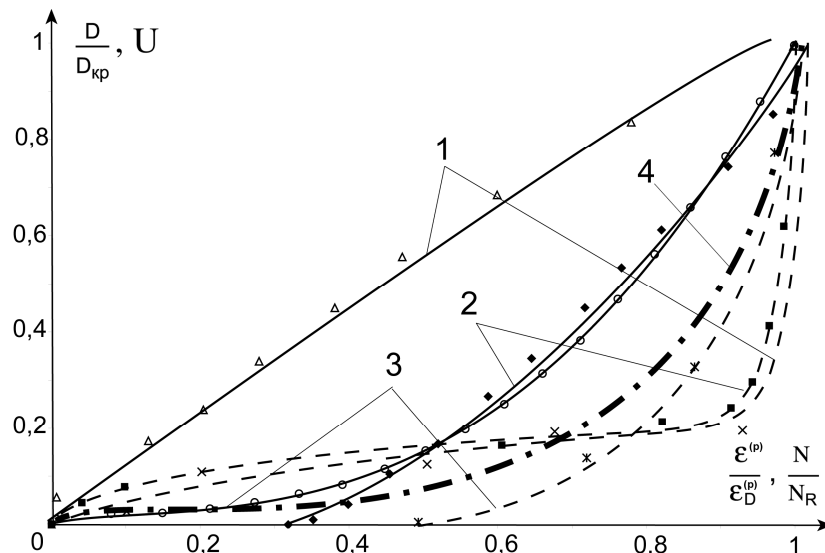


Рис.5. Кинетика накопления повреждений в конструкционных материалах при активном (сплошные линии) и малоцикловом (пунктирные линии) нагружении: 1, 4 – сплав Д16Т; 2 – медь 99,9% [17]; 3 – сталь 316 [17]

Кинетика накопления повреждений при статическом и малоцикловом нагружениях в относительных величинах описана зависимостью:

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

Решение уравнения (16) можно искать в следующем виде

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

Где параметры B_1 , B_2 , B_3 - константы материала.

Параметр $q = \frac{\varepsilon^{(p)}}{\varepsilon_R^{(p)}}$ - для статического нагружения и $q = \frac{N}{N_R}$ - для малоциклового.

Величины $\varepsilon^{(p)}$ и N - это текущие значения пластической деформации и числа циклов малоциклового нагружения соответственно, а $\varepsilon_R^{(p)}$ и N_R их предельные значения.

Расчетная кривая кинетики накопления повреждений при малоцикловом нагружении, значения $B_1 = 3,2$, $B_2 = 0$, $B_3 = -3$, с асимметрией цикла $R_\sigma = -1$ сплава Д16Т показана на рис.5 (кривая 4). Сравнение ее с соответствующими экспериментальными данными (кривая 1 - пунктир) показала 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

дополнительных напряжений (уравнение 7), который учитывает два вида разрушения: отрыв и срез.

Резюме

Согласно положений континуальной механики разрушения изложено инженерный метод по исследованию кинетики накопления рассеянных повреждений в металлических конструкционных материалах при их упругопластическом нагружении и малоциклового усталости в условиях сложного напряженного состояния. Установлено, что в качестве параметра поврежденности, с учетом двух видов разрушения (отрыва и среза), целесообразно принять в общем случае сложного нагружения удельную энергию дополнительных напряжений. Это дает возможность использовать многоповерхностную теорию пластического течения с анизотропным упрочнением для нахождения компонент девиатора дополнительных напряжений

Литература

1. Трощенко В.Т., Красовский А.Я., Стрижало В.А. 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 // Изд. 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 пластичных материалов // Теорет. основы инж. расчетов. – 1985. – 107, №1. – С. 90-98.
6. Гусенков А.П., Котов П.И. Малоцикловая усталость при неизотремическом нагружении. – М.: Машиностроение, 1983. – 242 с.
7. Казанцев А.Г. К расчету малоциклового 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. Трощенко 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 // Заводская лаборатория. – 2003. – Т.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 // Заводская лаборатория. – 2003. – Т.70, №11. – с. 50 – 54.
13. Мовчан А.А. О малоциклового 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 изотремическом 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., Greco F. Continuum damage-healing mechanics with application to self-healing composites // Intern/ Journal of Damage Mechanics. – 2005. – vol.14 – January – P.51-81.
17. Lemaitre J. Damage mechanics. – The Bath Press, Great Britian, - 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.