

Методика определения накопления повреждений в металлических конструкционных материалах при сложном упругопластическом нагружении

Н. И. Бобырь, А. П. Грабовский, А. В. Тимошенко, А. П. Халимон

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

На основе положений континуальной механики разрушения изложен инженерный подход к оценке кинетики накопления рассеянных микрповреждений в металлических материалах при их упругопластическом нагружении в условиях плоского напряженного состояния. Описан автоматизированный экспериментальный стенд и соответствующая методика исследований. Стенд разработан на базе испытательной установки электромеханического типа УМЭ-10Т. При автоматизации использованы современные компьютерные технологии и микропроцессорная техника. Рассмотрена методика экспериментальной оценки кинетики накопления повреждений в металлических конструкционных материалах при сложном упругопластическом нагружении с учетом двух процессов разрушения (путем отрыва и среза), которая базируется на измерении удельного электросопротивления образца.

Ключевые слова: накопление повреждений, сложное упругопластическое нагружение, удельное электросопротивление образца, испытательная установка.

Введение. При активном упругопластическом деформировании, процессах ползучести и малоциклового усталости элементов конструкций в зонах их повышенной нагруженности в материале происходит накопление микрповреждений (возникновение микропор и микротрещин) [1–6]. Повышение точности прогнозирования ресурса эксплуатации таких элементов конструкции на стадии их инженерного проектирования или при конкретизации остаточного ресурса на стадии эксплуатации в первую очередь зависит от достоверности системы определяющих уравнений, в которую должны входить параметры повреждаемости [4, 5]. Повреждаемость характеризует плотность микродефектов в определенной плоскости сечения элемента материала по отношению к воздействию внешних термосиловых факторов. В настоящее время физическая суть параметра повреждаемости окончательно не определена [7–14].

В течение последних сорока лет успешно развивается механика континуального разрушения (МКР) как перспективное научное направление в механике деформируемого твердого тела. Начало формирования этого направления было положено в работах Л. М. Качанова [4] и Ю. Н. Работнова [5] при использовании концепции внутренних переменных [3, 9, 12] с системой соответствующих кинетических уравнений и критериев разрушения на стадии зарождения микротрещины.

Для инженерных расчетов кинетику накопления микрповреждений наиболее удобно оценивать через макрохарактеристики механических свойств конструкционного материала в виде силовых, деформационных или энергетических подходов [12, 15–17]. При этом в МКР, как правило, используется

гипотеза об усреднении микродефектов по объему материала, а феноменологический параметр повреждаемости представляется скаляром [16], вектором [17] или тензором [18]. Анализ приведенных в литературных источниках данных показал [17, 19, 20], что для условий сложного напряженного состояния обобщенные кинетические уравнения поврежденности и методика определения их параметров пока не разработаны.

При исследовании процессов сложного программного нагружения (деформирования) и связанных с ними процессов накопления повреждений перспективным является использование в качестве переменной поврежденности энергетических характеристик материала в виде энтропии, энергии упрочнения, энергии микронапряжений и др. [21–25].

Цель настоящей работы – разработка методики построения кинетических диаграмм накопления микроповреждений в металлических конструкционных материалах при плоском напряженном состоянии. Исследовали закономерности упругопластического деформирования и сопровождающие их процессы континуального разрушения путем отрыва и среза с учетом истории статического и малоциклового нагружения.

Экспериментальный стенд и методика исследований. Исследование закономерностей деформирования и разрушения конструкционных материалов при сложных траекториях статического и малоциклового нагружения связано со значительными трудностями, обусловленными особенностями проведения испытаний и многообразием возможных режимов нагружения. Заметим, что в настоящее время имеется достаточно ограниченное количество экспериментальных исследований, выполненных в условиях малоциклового непропорционального нагружения [17, 18, 26].

При комбинированном нагружении крутящим моментом $M_{кр}(t)$ и осевой силой $N(t)$ возрастают возможности исследования двух процессов разрушения (отрыв и срез). Для осуществления непропорциональных статических и циклических нагружений была усовершенствована испытательная машина типа УМЭ-10Т, предназначенная для проведения испытаний при одноосном статическом и малоцикловом нагружении. В машине добавлен узел нагружения крутящим моментом, что позволяет реализовать следующие статические и циклические программы нагружения: осевое нагружение, кручение образца, сложное нагружение по заданным программам [27, 28].

Принципиальная электромеханическая схема установки показана на рис. 1. Образец 1 закрепляется в нижнем 2 и верхнем 3 захватах. Осевое нагружение происходит путем перемещения траверсы 4 от электропривода с коробкой скоростей 5 с помощью силового винта 6. Верхний захват установлен на динамометре 8, который связан с неподвижной траверсой 7. На динамометре наклеены в виде мостовых схем полупроводниковые датчики для измерения осевой силы $N(t)$ и крутящего момента $M_{кр}(t)$.

Посредством блока управления 9 и ПЭВМ осуществляются управление испытательной установкой и обработка данных с датчиков динамометра, двух оптоэлектронных датчиков, установленных осесимметрично на алюминиевых дисках 12 измерения осевых перемещений 10 с точностью до 1 мкм, и оптоэлектронного датчика угла закручивания образца 11 с точностью до

20 с. Выходной сигнал датчиков в импульсном виде передается на плату дискретного ввода 13 типа Encocder 300. Питание датчиков 10 осуществляется от блока 14. Датчик 11 позволяет передать импульсный сигнал с помощью адаптера 15.

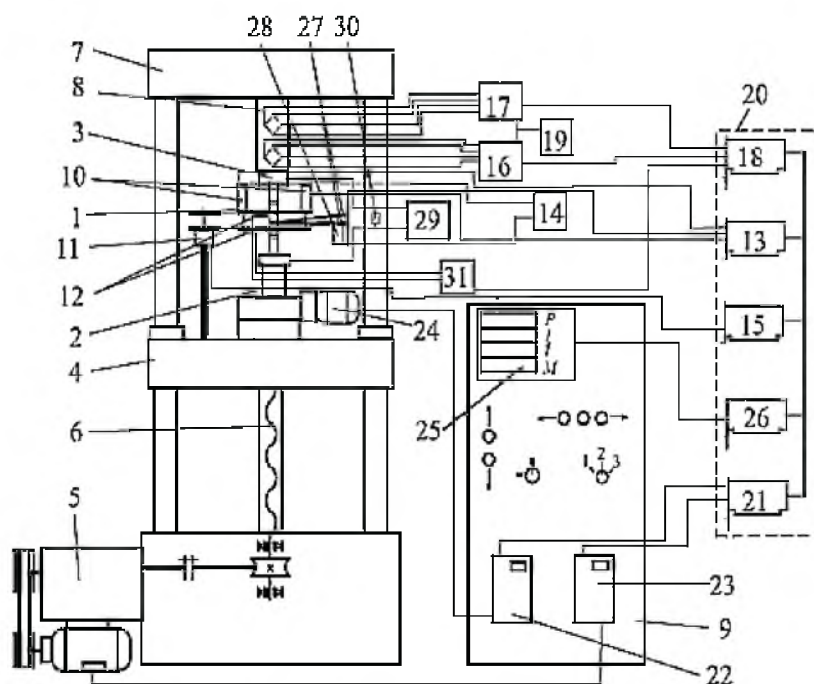


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Исходящие сигналы с динамометра подаются на одноканальные изолированные аналоговые нормализаторы сигналов 16 и 17, нормированный выходной сигнал – на плату аналогового ввода 18, установленную на системной плате ПЭВМ. Питание нормализаторов осуществляется от блока питания 19.

Выработанные на ПЭВМ программой управления 20 данные управления силовыми приводами 5 и 24 подаются с помощью установленной на ней интерфейсной платы 21 и интерфейса RS-485 на транзисторные преобразователи частоты 22 и 23.

На пульте ручного управления 9 имеется цифровое табло 25 для визуального контроля осевой силы $N(t)$, линейного перемещения образца $\Delta l(t)$, в мм, угла закручивания $\Delta\varphi(t)$, крутящего момента $M_{кр}(t)$. Вывод данных происходит посредством интерфейсной платы 26.

Для измерения поперечной деформации рабочей части образца при упругопластическом нагружении используется отдельный тензометр 27.

На рычагах устанавливается оптоэлектронный датчик измерения перемещений 28, который запитывается напряжением от блока питания 14. Сигнал с этого датчика передается на плату дискретного ввода и регистрируется на ПЭВМ.

Испытательный стенд оснащен системой измерения падения электрического напряжения в рабочей зоне образца при его упругопластическом деформировании. Постоянный электрический ток подается на образец через токоизолированные верхний и нижний захваты от стабилизированного источника постоянного тока 29. Токоснимателями с рабочей части сплошного образца на начальной базе 25 мм снимаются текущие показания электрического тока. Данный сигнал поступает на усилитель 31 и далее на плату аналогового ввода, где обрабатывается по программе и выдается на монитор в графическом виде в координатах $N = f(\Delta U)$ и $M_{кр} = f(\Delta U)$. Для того чтобы при разрушении образца не произошло резкого колебания электрического тока, в цепи блок питания–образец вставлено штучное высокостабильное сопротивление 30 величиной 1 Ом.

Применение в конструкции испытательной установки высокоточных оптоэлектронных датчиков для измерения осевого перемещения образца, поперечной деформации рабочей зоны и угла его закручивания, системы измерения $N(t)$ и $M_{кр}(t)$, преобразователей частоты трехфазного тока в системе питания силового привода для управления двигателями, устройств для эффективного отслеживания помех в измерительной системе, а также специальной интегрированной оболочки на основе ПЭВМ для обработки данных с датчиков перемещения и усилий и управления силовыми приводами дает возможность реализовать сложные виды нагружения исследуемых образцов в полностью автоматическом режиме.

Программное обеспечение экспериментальной установки создано на основе объектно-ориентированного языка программирования современного уровня Delphi 6.0, что позволяет эффективно использовать аппаратные возможности внутреннего и внешнего присоединенного комплексов оборудования.

Для реализации сложного (согласно А. А. Ильюшину) статического и циклического режимов нагружения в основном используют тонкостенные трубчатые образцы [23, 26, 28]. Однако при использовании таких образцов в $N(t) - M_{кр}(t)$ экспериментах нельзя достаточно точно измерить их поперечную деформацию из-за существенного в процессе деформирования изменения формы поперечного сечения.

Поэтому для комплексного исследования процессов поврежденности и разрушения конструкционных материалов при сложном нагружении рекомендуется методика, которая предусматривает замену тонкостенного трубчатого образца двумя сплошными [29].

Для расчета касательных напряжений τ_r используется гипотеза плоских сечений для сплошного и трубчатого образцов, которые закручиваются крутящим моментом $M_{кр}(t)$ в упругопластической области. Тогда в сечениях будут действовать касательные напряжения, которые зависят только от текущего радиуса r . По известной диаграмме деформирования при кручении имеем

$$M = \frac{\pi d^3}{4\gamma_{\max}^3} \int_0^{\gamma_{\max}} \tau \gamma^2 d\gamma; \quad (1)$$

$$\gamma_{\max} = \frac{d}{2} \theta, \quad (2)$$

где $\theta = d\varphi/dz$ – относительный угол закручивания.

После дифференцирования (1) получим

$$\frac{d}{d\gamma_{\max}} (M\gamma_{\max}^3) = \frac{\pi d^3}{4} \tau_{\max} \gamma_{\max}^2, \quad (3)$$

где τ_{\max} – максимальное касательное напряжение в поперечном сечении стержня.

С учетом (2) зависимость (3) примет вид

$$\tau_{\max} = \frac{4}{\pi d^3} \left(3M + \theta \frac{dM}{d\theta} \right). \quad (4)$$

Если учесть, что в условиях чистого сдвига интенсивность деформаций $\varepsilon_i = \frac{\gamma_r}{\sqrt{3}}$, а угол сдвига на текущем радиусе r будет $\gamma_r = \theta r$, то из физических уравнений теории пластичности следует

$$\tau_r = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \gamma_r = \frac{A\gamma_r^n}{(\sqrt{3})^{n+1}}, \quad (5)$$

где A, n – постоянные материала при степенном характере упругопластического упрочнения.

Крутящий момент в образце круглого поперечного сечения с радиусом R при упругопластическом деформировании запишем следующим образом:

$$M_{\text{кр}} = 2\pi \int_0^R \tau_r r^2 dr. \quad (6)$$

Рассмотрим два сплошных образца круглого поперечного сечения с внешними радиусами R_1 и R_2 , причем $R_2 = \alpha R_1$ ($\alpha < 1$).

Проинтегрируем (6) с учетом (5). Тогда для образцов с радиусами R_1 и R_2 получим

$$M_{\text{кр}k} = \frac{2\pi A \theta^n R_k^{n+3}}{(\sqrt{3})^{n+1} (n+3)} \quad (k = 1, 2). \quad (7)$$

Крутящий момент $M_{\text{кр,т}}$ для тонкостенного трубчатого образца с внешним радиусом R_1 и внутренним $R_2 = \alpha R_1$ при заданном угле закручивания φ имеет вид [23]

$$M_{кр.г} = \frac{\pi A \theta^n R_1^{n+3}}{(\sqrt{3})^{n+1} (n+3)} (1 - \alpha^{n+3}). \quad (8)$$

Уравнение (8) полностью совпадает с разностью крутящих моментов ($M_{кр1} - M_{кр2}$), которая получена согласно уравнению (7) при условии $\theta = \text{const}$.

Таким образом, диаграмма деформирования $M_{кр} = f(\varphi)$ для тонкостенного трубчатого образца может быть построена на основании испытания двух сплошных образцов путем вычитания значений крутящих моментов при одинаковых углах закручивания φ_j . Затем результаты экспериментальных исследований обрабатывали известным способом [28]. Так, при совместном действии осевой силы $N(t)$ и крутящего момента $M_{кр}(t)$ компоненты напряжений и деформаций для “тонкостенной трубки” определялись соответственно следующим образом:

$$\sigma_z = \frac{N(t)}{\pi R_k^2}; \quad \tau_{\theta z} = \frac{2M_{кр.г}(t)}{\pi D^2 \delta}; \quad \varepsilon_z = \ln(1 + \varepsilon'_z); \quad \gamma = \Delta\varphi D/2l, \quad (9)$$

где R_k , l – соответственно текущее значение радиусов образца ($k = 1, 2$) и его рабочей длины; $D = D_1 - \delta$ – текущий средний диаметр образца, $D = D_{0T}(1 + \varepsilon_\theta)$; $\delta = \delta_0(1 + \varepsilon_r)$; $\varepsilon'_z = \Delta l/l_0$.

При этом компоненты деформаций ε_θ и ε_r определялись с учетом сжимаемости конструкционного материала при упругопластическом деформировании.

$M_{кр}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$

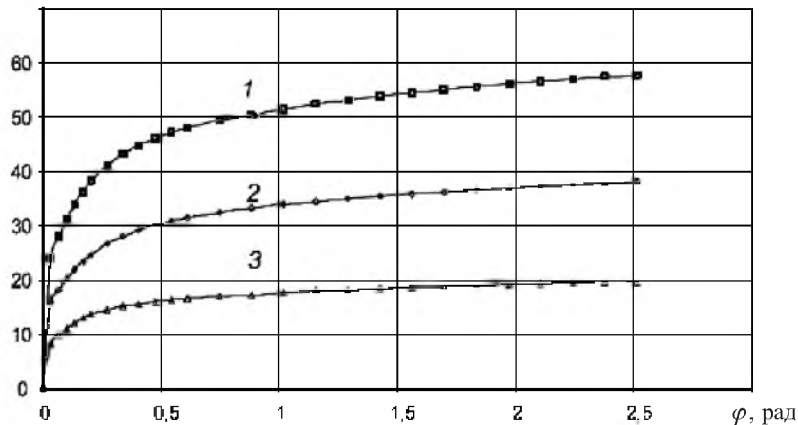


Рис. 2. Диаграмма деформирования при кручении стали 30ХГСА при $T = 293 \text{ К}$: 1 – $D_1 = 7,48 \text{ мм}$; 2 – $D_2 = 6,55 \text{ мм}$; 3 – “трубка”.

Уравнения для сложного программного нагружения таковы:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + (\sqrt{3}\tau)^2}; \quad \varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon^2 + (\gamma/\sqrt{3})^2}.$$

В качестве примера на рис. 2 приведены усредненные (по данным двух образцов) результаты испытаний стали 30ХГСА при кручении. Кривые деформирования при кручении образцов из стали 30ХГСА и алюминиевого сплава Д16Т при $T = 293$ К, построенные по описанной методике, показаны на рис. 3. Образцы изготовляли из прутка в состоянии поставки. Сравнение полученных кривых с диаграммой деформирования при кручении тонкостенного трубчатого образца из стали 30ХГСА (на рис. 3 штриховые линии) свидетельствует об удовлетворительном их совпадении (на начальном участке упругопластического деформирования) и правомочности использования предложенной методики.

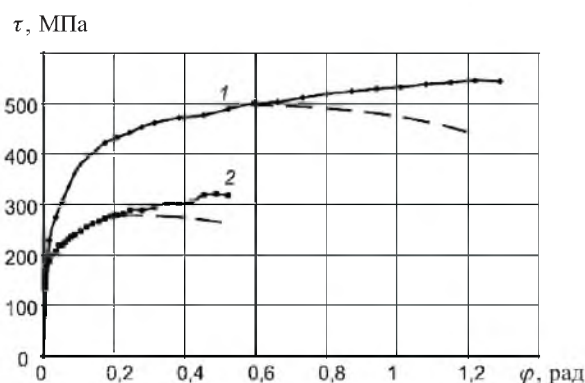


Рис. 3. Кривые деформирования при кручении образцов из стали 30ХГСА (1) и алюминиевого сплава Д16Т (2) при $T = 293$ К.

Обобщенные по результатам испытания трех образцов кривые накопления повреждений до разрушения (на стадии зарождения макротрещины) ряда металлических конструкционных материалов при активном упруго-пластическом деформировании в условиях одноосного растяжения и кручения показаны на рис. 4 и 5 соответственно.

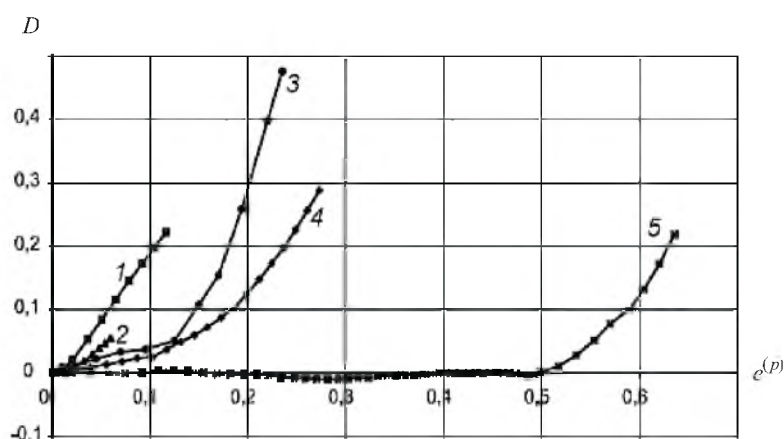


Рис. 4. Кинетические кривые накопления повреждений при упругопластическом деформировании в условиях растяжения алюминиевого Д16Т (1) и титанового BT22 (2) сплавов, а также сталей 45 (3), 30ХГСА (4), 12Х18Н10Т (5).

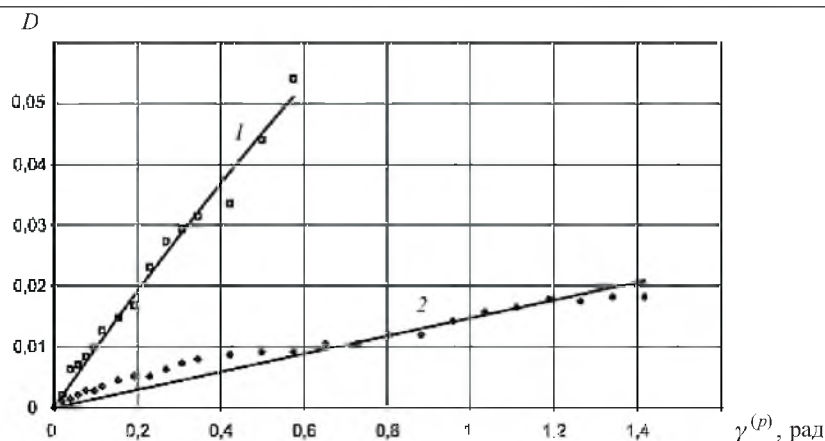


Рис. 5. Кинетические кривые накопления повреждений при упругопластическом деформировании в условиях кручения алюминийевого сплава Д16Т (1) и стали 30ХГСА (2).

Таким образом, для уточнения инженерных расчетов элементов конструкций в зонах их повышенной нагруженности необходимо учитывать параметр повреждаемости по нормальным и касательным составляющим тензора эффективных напряжений.

Резюме

На основі положень континуальної механіки руйнування викладено інженерний підхід до оцінки кінетики накопичення розсіяних мікропошкоджень у металічних матеріалах при їх пружно-пластичному навантаженні в умовах плоского напруженого стану. Описано автоматизований експериментальний стенд та відповідну методику досліджень. Стенд розроблено на базі випробувальної установки електромеханічного типу УМЕ-10Т. При автоматизації використано сучасні комп'ютерні технології та мікропроцесорну техніку. Розглянуто методику побудови кінетичних рівнянь пошкоджуваності металічних конструкційних матеріалів при складному пружно-пластичному навантаженні з урахуванням двох процесів руйнування (шляхом відриву та зсуву), що базується на вимірі питомого електроопору зразка.

1. Троценко 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. Lemaitre Y. Coupled elasto-plasticity and damage constitutive equations // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. – 1985. – 51. – P. 31 – 49.
4. Качанов Л. М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изд. АН СССР. От-ние техн. наук. – 1958. – № 8. – С. 26 – 35.
5. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.

6. Леметр Д. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов // Теорет. основы инж. расчетов. – 1985. – **107**, № 1. – С. 90 – 98.
7. Гусенков А. П., Котов П. И. Малоцикловая усталость при неизотермическом нагружении. – М.: Машиностроение, 1983. – 242 с.
8. Казанцев А. Г. К расчету малоцикловой усталости при непропорциональных режимах нагружения // Пробл. прочности. – 1989. – № 6. – С. 31 – 36.
9. Мовчан А. А. О малоцикловой усталости при непропорциональном симметричном деформировании // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1983. – № 3. – С. 102 – 108.
10. Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. – 279 с.
11. Мруз З. Упрочнение и накопление повреждений в металлах при монотонном и циклическом нагружении // Теорет. основы инж. расчетов. – 1983. – **105**, № 2. – С. 44 – 50.
12. 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.
13. Golos K. Energetic formulation of fatigue strength criterion // Arch. Bud. Maszyn. – 1998. – **35**, No. 5. – P. 5 – 15.
14. Бобырь Н. И., Понамаренко Т. Б. Уравнение состояния конструкционных материалов при сложном малоцикловом нагружении // Прогресивна техника та технологія машинобудування. – 1998. – № 2. – С. 58 – 67.
15. Socie D. F., Kurath P., and Koch J. A. Multiaxial Fatigue Damage Parameter Biaxial and Multiaxial Fatigue. – London: Mechanical Engineering Publications, 1989. – P. 535 – 550.
16. Коротких Ю. Г. Описание процессов накопления повреждений материала при изотермическом вязкопластическом деформировании // Пробл. прочности. – 1985. – № 1. – С. 18 – 23.
17. Голуб В. П. Нелинейная механика континуальной поврежденности и ее приложение к задачам ползучести и усталости // Прикл. механика. – 2000. – **36**, № 3. – С. 31 – 59.
18. Мовчан А. А. О малоцикловой усталости при сложных и, в частности, непропорциональных путях пластического деформирования. – М., 1980. – 16 с. – Деп. в ВИНТИ, № 2176-80.
19. Соси Д. Модели разрушения при многоосной усталости // Теорет. основы инж. расчетов. – 1988. – № 3. – С. 9 – 20.
20. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Гохфельд Д. А. и др. Уравнение состояния при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1981. – 244 с.
21. Боднер С. Р., Линдхолм И. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов // Теорет. основы инж. расчетов. – 1976. – № 2. – С. 51 – 58.

22. *Zhu V. V. and Cescotto S.* A fully coupled elasto-visco-plastic damage theory for anisotropic materials // *Int. J. Solids Struct.* – 1995. – **32**, No. 11. – P. 1607 – 1641.
23. *Трощенко В. Т., Лебедев А. А., Стрижало В. А. и др.* Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – Киев: Логос, 2000. – 571 с.
24. *Арутюнян Р. А.* О критериях разрушения в условиях ползучести // *Пробл. прочности.* – 1982. – № 9. – С. 42 – 45.
25. *Браун М., Гао Н., Миллер К.* Прогнозування втомної довговічності з урахуванням впливу витримки у часі та багатовісного навантаження на характер закриття тріщин // Там же. – 2000. – № 6. – С. 13 – 34.
26. *Бобырь Н. И.* Обобщенная модель повреждаемости конструкционных материалов при сложном малоцикловом нагружении // Там же. – № 5. – С. 112 – 121.
27. *Грабовський А. П., Тимошенко О. В., Масло О. М., Халімон О. П.* Дослідження кінетики пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при складному напруженому стані // *Вестн. НТУУ “КПІ”. Машиностроение.* – 2003. – № 44. – С. 43 – 47.
28. *Деклараційний патент № 65499А 7G01N3/08.* Спосіб визначення кінетики руйнування матеріалів в процесі їх пружно-пластичного деформування / М. І. Бобир, А. П. Грабовський, О. В. Тимошенко. – Опубл. 15. 03. 2004. Бюл. № 3.
29. *Максак В. Н., Доцинский Г. А.* Методика исследования больших пластических деформаций при простом нагружении // *Изв. Том. политехн. ин-та.* – 1970. – **173**. – С. 3 – 9.

Поступила 05. 08. 2004