

УДК 539.43+620.179.1

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. П. ГРАБОВСКИЙ

*Национальный технический университет Украины
НТУУ «КПИ», г. Киев*

Введение

Процесс эксплуатации оборудования сопровождается его нагружением, что со временем приводит к структурно-физическим изменениям в материале – накоплением рассеянных повреждений различной природы (образование разрывов в субмикро и микрообъемах, выделение новых фаз, химические и физические флуктуации, образование текстуры и т. д.), что сопровождается разрыхлением материала и возникновением пор, которые в дальнейшем трансформируются в локальные дефекты типа трещин.

Большинство исследований, связанных с проблемой разрушения материала, касается изучения заключительной стадии, которая схематизирована в моделях Гриффитса–Орована, положены в основу современных методов оценки ресурса работы конструкции [1], [2]. При описании процесса разрушения на начальной стадии характерен высокий уровень схематизации, а модели, полученные на основе теории поврежденности имеют ограниченное экспериментальное объяснение [3], [4].

Цель работы

Целью работы является рассмотрение результатов исследования кинетики накопления повреждений в высокопластичных (сталь 12Х18Н10Т) и менее пластичных материалах (сплав Д16Т) с использованием параметра разрыхления материала, что приводит к уменьшению модулей упругости при растяжении – E и кручении – G и увеличению удельного электрического сопротивления в процессе испытания.

Результаты экспериментов

Рассмотрим повреждаемость при осевом нагружении.

Накопление повреждений в конструкционных материалах при осевом нагружении – D_σ оценивается соотношением:

$$D_\sigma = 1 - \frac{V_0}{V_i}, \quad (1)$$

где V_0 – начальная величина объема рабочей зоны образца материала; $V_i = V_0 + \Delta V$ – текущая величина объема рабочей зоны образца материала при упругопластическом деформировании; ΔV – изменение объема материала при упругопластическом деформировании.

Из уравнения (1) следует:

$$\Delta V = V_0 \frac{D_\sigma}{1 - D_\sigma}. \quad (2)$$

Как известно [5] при осевом нагружении площадь поперечного сечения – A равняется: $A = \frac{N \cdot l}{\Delta E}$. Учитывая, что поврежденность $D_\sigma = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_i}$, получим величину поврежденности при упругопластическом осевом нагружении.

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E_0}} \cdot \sqrt{\frac{l_0 N_0}{l_i N_i}}, \quad (3)$$

где l_0 и l_i – соответственно начальная и текущая длина рабочей зоны образца при осевом нагружении; $\varepsilon_0 = \frac{\Delta l_0}{l_0}$; $\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i}$ – относительные величины осевой деформации в начале нагружения и при текущих нагружениях на упругих участках диаграмм ступенчатого нагружения и разгрузки.

На начальном этапе упругопластического нагружения $E_0 = E_y$, где E_y – установившаяся величина модуля упругости, которая определяется на первых этапах упругопластического осевого нагружения стали 12X18H10T (кривая 1) и алюминиевого сплава Д16Т (кривая 2) (рис. 1). \tilde{E} – эффективный текущий модуль упругости материала при упругопластическом осевом нагружении. N_0 и N_i – соответственно начальная и текущая осевая сила при нагружении, которая определяется на текущих участках диаграмм ступенчатого нагружения и разгрузки.

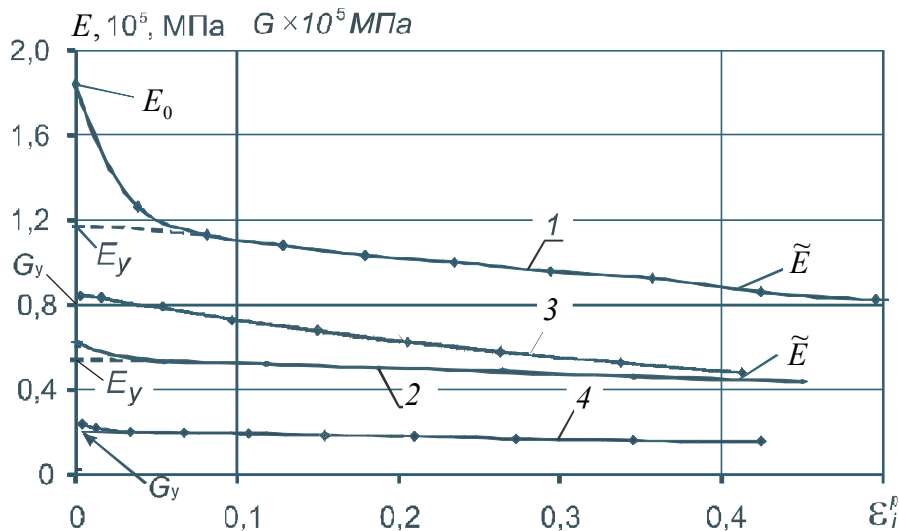


Рис. 1. Изменение эффективных модулей упругости \tilde{E} при осевом нагружении образцов из стали 12X18H10T (кривая 1) и алюминиевого сплава Д16Т (кривая 2), и модулей упругости \tilde{G} при кручении образцов из стали 12X18H10T (кривая 3) и алюминиевого сплава Д16Т (кривая 4)

При упругопластическом деформировании вследствие разрыхления изменяется структура материала [6], [7] и изменяется его электрическое сопротивление [8].

Согласно [9] электрическое сопротивление проводника (рабочей зоны образца) при прохождении через него электрического тока равняется:

$$R = \rho \frac{l}{F} = \rho \frac{l^2}{V}, \quad (4)$$

где ρ – объемное электрическое сопротивление рабочей зоны образца (объемная плотность распределения электрического тока); l и F – длина и площадь рабочей зоны проводника (образца материала).

Из соотношения (4) получим:

$$V = \frac{\rho l^2}{R} = \frac{\rho l^2 I}{U}, \quad (5)$$

где I, U – величина электрического тока и напряжения в проводнике.

Для цилиндрической формы образца при его упругопластическом деформировании начальный $V_{0ц}$ и текущий $V_{iц}$ объемы можно выразить через электрический ток и электрическое напряжение следующим образом:

$$V_{0ц} = \frac{\rho_{0ц} \cdot l_{0ц} \cdot I_0}{U_0}, \quad (6)$$

$$V_{iц} = \frac{\rho_{iц} \cdot l_{iц}^2 \cdot I_i}{U_i}, \quad (7)$$

где $\rho_{0ц}$ и $\rho_{iц}$ – величины начального и текущего электрического сопротивления цилиндрической рабочей области образца перед и в процессе деформирования; $l_{0ц}$ и $l_{iц}$ – начальная и текущая длины рабочей зоны образца; I_0, U_0, I_i, U_i – начальные и текущие величины электрического тока и напряжения в рабочей зоне образца при испытании.

Для материалов, которые при упругопластическом деформировании образуют местное сужение (шейку), величина поврежденности равна

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{V_{0ц}}{V_{iц}} - \frac{V_{iцк}}{V_{iцш}}, \quad (8)$$

где $V_{iцш} \approx 2V_{iцк}$ – объем образца в зоне местного сужения (в первом приближении равен двум переменным объемам конической формы $V_{iцк}$).

Для любого конуса [10] объем

$$V = \frac{h \cdot F}{3}, \quad (9)$$

где h – высота конуса; F – площадь сечения конуса.

Площадь сечения усеченного конуса – $F = \pi(R^2 + r^2 + Rr)$, где R и r – соответственно радиусы усеченного конуса в цилиндрической и утоненной частях местного сужения образца.

Объем шейки образца

$$V_{iцш} = \frac{l_{iцш} \cdot F_{iцш}}{2 \cdot 3}, \quad (10)$$

где $F_{iцш}$ – площадь усеченного конуса в зоне шейки; $F_{iцш} = 2\pi(R_{iцш}^2 + r_{iцш}^2 + R_{iцш}r_{iцш})$; $R_{iцш}$ – текущий радиус цилиндрической зоны образца при нагружении; $r_{iцш}$ – текущий радиус

конической наиболее утонченной зоны образца при деформировании; $l_{iш} / 2$ – удлинение образца в зоне деформирования шейки.

С учетом соотношения (5) изменение объема шейки, выраженное через удельное электрическое сопротивление можно записать в виде:

$$V_{iш} = \frac{\rho_{iш} \cdot l_{iш}^2 \cdot I_{iш}}{U_{iш}}, \quad (11)$$

где $\rho_{iш}$ – величина текущего электрического сопротивления при деформировании образца в зоне местного сужения; $U_{iш}$ и $I_{iш}$ – величины электрического напряжения и тока в образце при упругопластическом деформировании после образования местного сужения.

При условии поддержания тока постоянной величины, проходящего через образец в процессе экспериментального упругопластического нагружения до разрушения, т. е. $I_0 = I_{iш} = I_{iш} = \text{const}$, поврежденность при упругопластическом деформировании до разрушения, выраженное через изменение удельного электрического сопротивления из соотношения (8) с учетом (6), (7), (11), можно выразить следующим образом:

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{iш}} \left(\frac{l_{0ш}^2 \cdot U_{iш}}{l_{iш}^2 \cdot U_0} \right) - \frac{\rho_{iш}}{\rho_{iш}} \left(\frac{l_{iш}^2 \cdot U_{iш}}{l_{iш}^2 \cdot U_{iш}} \right), \quad (12)$$

где $\rho_{iш}$ – удельное электрическое сопротивление образца перед образованием шейки; $l_{iш}$ – первоначальная длина рабочей зоны образца перед образованием местного сужения; $U_{iш}$ – электрическое удельное напряжение в образце перед образованием местного сужения (шейки).

Слагаемые в скобках формулы (12) характеризуют влияние изменения геометрических размеров образца на величину электрического сопротивления при его упругопластическом деформировании.

На рис. 2 и 3 приведены кривые, показывающие зависимости между поврежденностью и относительной линейной деформацией для стали 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава Д16Т. Кривые 1 и 2 в обоих случаях получены с использованием соотношений (12) и (3) соответственно.

Из рис. 2 и 3 следует, что кривые 1 и 2 подобны по характеру и близки по значениям между собой в обоих случаях. Причем, для малопластичных материалов поврежденность накапливается почти линейно, а для высокопластичных материалов – нелинейно, особенно в зоне местного сужения.

Критерий меры поврежденности материала при упругопластическом осевом деформировании характеризуется параметром $\psi_{\sigma}[D_{\sigma}, t]$, который в неявной форме зависит от текущей величины поврежденности – D_{σ} и времени – t определяется из выражения

$$\psi_{\sigma}[D_{\sigma}, t] = \frac{D_{\sigma i}}{D_{\sigma R}}(t), \quad (13)$$

где $D_{\sigma i}$ – поточная поврежденность; $D_{\sigma R}$ – критическое значение поврежденности в материале, при котором наступает разрушение.

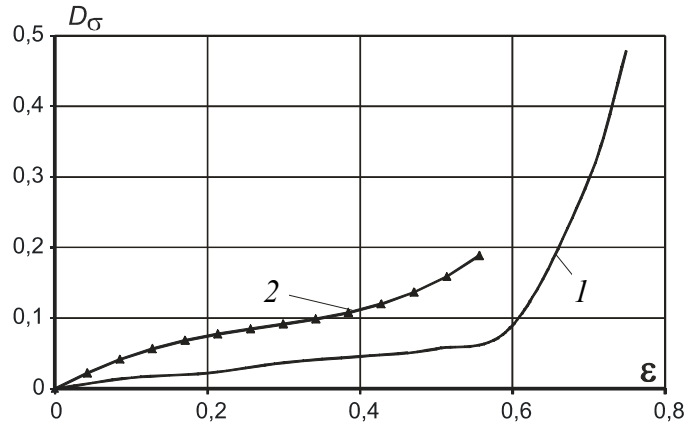


Рис. 2. Зависимость поврежденности стали 12X18H10T от относительной линейной деформации

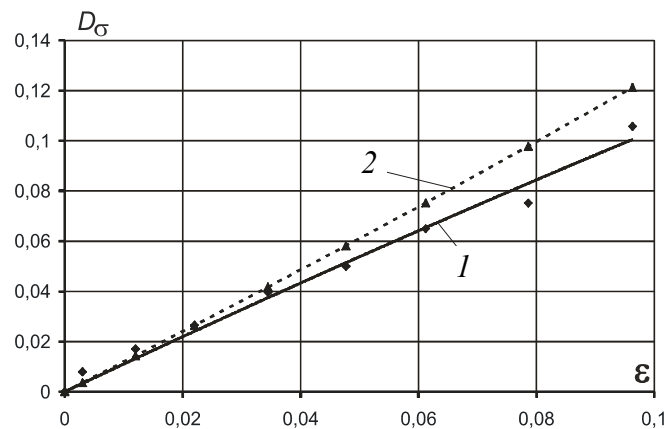


Рис. 3. Зависимость поврежденности алюминиевого сплава Д16Т от относительной линейной деформации

Этот параметр изменяется в пределах $0 \leq \psi \leq 1$; равняется 0 для неповрежденно-го материала и равняется 1 в момент разрушения.

Поврежденность при кручении

При кручении круглого образца D_τ поврежденность может быть определена из выражения

$$D_\tau = 1 - \frac{V_0}{V_i}, \tag{14}$$

где $V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} l_0$ и $V_i = \frac{\pi d_i^2}{4} l_i$; d_0 и d_i – диаметры; l_0 , l_i – длины рабочей зоны образцов, соответственно, до и после нагружения.

Как известно [5], абсолютный угол закручивания φ рабочей зоны образца цилиндрической формы диаметром d и длиной l , нагруженного крутящим моментом $M_{кр}$, равен:

$$\varphi = \frac{M_{кр} \cdot l \cdot 32}{G \cdot \pi \cdot d^4} = \frac{M_{кр} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l^3}{G \cdot V^2}, \tag{15}$$

где G – модуль сдвига; $V = \frac{\pi d^2}{4} l$ – объем рабочей зоны образца.

Отсюда имеем:

$$V = \sqrt{\frac{M_{кр} \cdot 2\pi \cdot l^3}{G \cdot \varphi}} = \sqrt{\frac{M_{кр} \cdot \pi \cdot l^2 \cdot d}{G \cdot \gamma}}, \quad (16)$$

где $\gamma = \frac{\varphi \cdot d_0}{2 \cdot l}$ – относительный угол закручивания.

На первом этапе кручения объем рабочей зоны равен

$$V_0 = \sqrt{\frac{M_{кр0} \cdot \pi \cdot l_0^2 \cdot d_0}{G_y \cdot \gamma_0}}, \quad (17)$$

где $M_{кр0}$ – крутящий момент на первой стадии нагружения; G_y – установившаяся величина модуля упругости при сдвиге, которая определяется на первых этапах закручивания образца; γ_0 – относительный угол закручивания.

Поточное изменение объема рабочей зоны образца при закручивании равно:

$$V_i = \sqrt{\frac{M_{кри} \cdot \pi \cdot l_i^2 \cdot d_i}{\tilde{G} \cdot \gamma_i}}, \quad (18)$$

где $M_{кри}$ – крутящий момент на промежуточных стадиях нагружения; \tilde{G} – эффективный модуль упругости при сдвиге, который учитывает деградацию материала и определяется на промежуточных этапах закручивания образца; γ_i – относительный угол закручивания.

Из выражения (14), учитывая (17), (18), получим:

$$D_\tau = 1 - \sqrt{\frac{M_{кр0} \cdot l_0^2 \cdot d_0 \cdot \tilde{G} \cdot \gamma_i}{M_{кри} \cdot l_i^2 \cdot d_i \cdot G_y \cdot \gamma_0}} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}}{G_y}} \sqrt{\frac{M_{кр0} \cdot l_0^2 \cdot d_0 \cdot \gamma_i}{M_{кри} \cdot l_i^2 \cdot d_i \cdot \gamma_0}}. \quad (19)$$

На основе выражения (12), для рассматриваемого случая, получено следующее соотношение:

$$D_i = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_i} \left(\frac{l_0^2 U_i}{l_i^2 U_0} \right). \quad (20)$$

Для стали 12Х18Н10Т (рис. 4) и сплава алюминия Д16Т (рис. 5) показаны зависимости поврежденности от величины относительного угла закручивания. Кривые 1 и 2 в обоих случаях получены с использованием соотношений (19) и (20) соответственно.

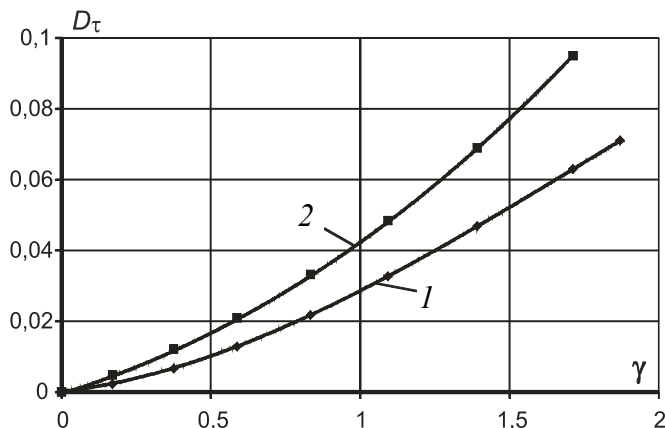


Рис. 4. Зависимость поврежденности стали 12X18H10T от относительного угла закручивания

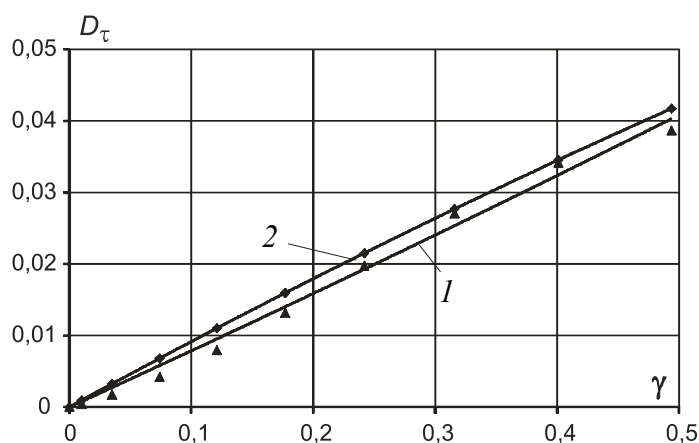


Рис. 5. Зависимость поврежденности алюминиевого сплава Д16Т от относительного угла закручивания

Анализ полученных результатов показывает, что кинетики накоплений повреждений при упругопластическом кручении и растяжении аналогичны для рассмотренных материалов.

Критерий меры поврежденности материала при упругопластическом кручении $\psi_i[D_i, t]$ за промежуток времени t можно представить в виде:

$$\psi_\tau[D_\tau, t] = \frac{D_{\tau i}}{D_{\tau R}}(t), \tag{21}$$

где $D_{\tau i}$ – текущее значение поврежденности при кручении; $D_{\tau R}$ – критическое значение поврежденности при разрушении от действия крутящего момента.

Заключение

1. Разработана методика исследования поврежденности материала на основе данных, полученных в результате определения модуля упругости и удельного электрического сопротивления в процессе упругопластического осевого нагружения и кручения до разрушения.

2. Экспериментально для стали 12X18H10T и алюминиевого сплава Д16Т установлено, что упругопластическое осевое нагружение и кручение приводят к изменению модулей упругости и электрических свойств материалов, вследствие их разрушения.

3. Для оценки надежности использования конструкционного материала предложены критерии определения меры поврежденности в зависимости от величины упругопластического деформирования при растяжении и кручении до разрушения.

Литература

1. Разрушение. В 7 т. / под ред. Г. Либовица. – Мир, 1976.
2. Механика разрушения и прочности материалов: Справочное пособие. В 4 т. / под общ. ред. В. В. Панасюка. – Киев : Наукова думка, 1988.
3. Тамуж, В. П. Микромеханика разрушения полимерных материалов / В. П. Тамуж, В. С. Куксенко. – Рига : Знание, 1978. – С. 167.
4. Лебедев, А. А. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Проблемы прочности. – 2002. – № 4. – С. 5–11.
5. Писаренко, Г. С. Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, А. Л. Квитка, Э. С. Уманський. – Київ : Высш. шк., 1993. – 654 с.
6. Голуб, В. П. Особенности нелинейной ползучести линейно- и нелинейноупругих материалов при осевом нагружении / В. П. Голуб, Ю. М. Кобзарь, П. В. Фернати // Вестн. НТУУ «КПИ». Сер. Машиностроение. – 2003. – № 44. – 35–37 с.
7. Лебедев, А. А. Механика материалов для инженеров : науч. пособие / А. А. Лебедев, Н. И. Бобирь, В. П. Ламашевский. – Киев : НТУУ «КПИ» ; ВПИ ВПК «Политехника», 2006. – 286 с.
8. Дехтяр, И. Я. Изучения влияния пластической деформации на электрические свойства сплавов системы Fe-Al / И. Я. Дехтяр, С. Г. Литовченко, Р. Г. Федченко // Вопросы физики металлов и металловедение. – 1960. – № 11. – С. 121–128.
9. Кузьмичев, В. Е. Законы и формулы физики / В. Е. Кузьмичев. – Киев : Наукова думка, 1989. – 862 с.
10. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике (для инженеров и учащихся втузов) / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1981. – 718 с.

Получено 23.10.2008 г.