

## О КИНЕТИКЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ.

Грабовский А.П., Тимошенко А.В., Халимон А.П.  
(НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина)

*The present paper examines the influence of a kinetic damage on principal stress distribution in net-section of constructional materials under elasto-plastic tension and compression. The results confirms by experimental investigations for the steel 20.*

При деформировании, в конструкционном материале в условиях постоянного напряженного состояния в нем, в закономерной последовательности, возникают и развиваются рассеянные повреждения различной природы (образование разрывов в субмикро – и микрообъемах, выделение новых фаз, химическая и физическая флуктуации, образование текстуры, точечных, линейных, поверхностных и объемных дефектов и т.д.), что сопровождается разрыхлением материала, возникновением пор, которые в дальнейшем преобразуются в локальные дефекты и приводят, в конечном результате, к образованию локальных разрушающих трещин [1-3].

В том случае, если при нагружении напряженно-деформированное состояние и направление деформирования меняются, то уже возникшие в материале дефекты могут видоизменяться, при этом меняется интенсивность поврежденности. Указанные особенности не в полной мере отражены в известных моделях поврежденности [4, 5].

Целью работы является определения влияния изменения направления упругопластического деформирования на кинетику поврежденности в конструкционных материалах. В большинстве случаев поврежденность -  $D$  рассматривается как изотропная величина, которая представляет площадь деформационных дефектов, приходящихся на единицу поверхности сечения элемента, плоскостью перпендикулярной к линии приложения нагрузки [2,6,7,9]

$$D = \frac{F_i - \tilde{F}_i}{F_i}; \quad (1)$$

где  $F_i$  - полное геометрическое изменение площади минимального сечения элемента детали (образца) без учета поврежденности при деформировании;

$\tilde{F}_i$  - эффективная поточная площадь, которая несет нагрузку в минимальном сечении без учета различного вида дефектов.

$$\tilde{F}_i \leq F_i - F_D \quad (2)$$

$F_D$  - площадь различного вида повреждений в минимальном сечении.

Параметр поврежденности  $0 < D \leq D_R$  и где  $D_R$  - критическое значение параметра, граничное значение которого  $D_R = 1$ .

Экспериментально определено, что существует разница в поведении материалов при растяжении и сжатии.

Поврежденность связана с модулем упругости материала -  $E$  и истинными напряжениями в поперечном сечении -  $\sigma$  соотношениями [2, 6, 7]

$$D = \frac{E - \tilde{E}_p}{E} \quad (3)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D}, \quad (4)$$

где  $\tilde{E}$ ,  $\tilde{\sigma}$  - соответственно эффективные модуль упругости материала и напряжения в сечении с учетом микрповреждений при деформировании.

Во многих случаях поврежденность может рассматриваться как изотропная величина. Практикой установлено, что существует разница в поврежденности при растяжении и сжатии. Это явление ассоциируется с залечиванием микрповреждений при сжатии, что указывает на разные величины эффективного напряжения, которые действуют в поперечном сечении при растяжении и сжатии. Так при растяжении

$$\tilde{\sigma}^+ = \frac{\sigma^+}{1 - D}, \quad \sigma > 0; \quad (5)$$

При сжатии

$$\tilde{\sigma}^- = \frac{\sigma^-}{1 - hD}, \quad \sigma < 0. \quad (6)$$

где  $h$  - коэффициент закрытия микрповреждений при сжатии:  $0 \leq h \leq 1$

$h=0$  соответствует случаю существования односторонних условий поверхности чистых микрповреждений;

$h=1$  соответствует случаю существования двусторонних условий сферических микрополостей, которые не закрываются;

$0 < h < 1$  - соответствует промежуточным случаям.

В связи с тем, что определение эффективного напряжения не зависит от структуры, эта концепция является сложной для объемного напряженного состояния.

Разделим тензор напряжений Коши на «положительную»  $\langle \sigma \rangle$  и «отрицательную»  $\langle -\sigma \rangle$  части [9]

$$\langle \sigma \rangle = \langle \sigma \rangle - \langle -\sigma \rangle$$

которые определены положительными и отрицательными частями главных напряжений  $\sigma_i$

$$\langle \sigma \rangle = \begin{bmatrix} \langle \sigma_1 \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle \sigma_2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle \sigma_3 \rangle \end{bmatrix}; \quad \langle -\sigma \rangle = \begin{bmatrix} \langle -\sigma_1 \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle -\sigma_2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle -\sigma_3 \rangle \end{bmatrix}. \quad (7)$$

где символ  $\langle \sigma_i \rangle$  обозначает  $\langle \sigma_i \rangle = \sigma_i$ , если  $\sigma_i \geq 0$ ;

$$\langle \sigma_i \rangle = 0, \quad \text{если } \sigma_i < 0.$$

В одноизмеряемом случае изменение эффективной величины напряжения за цикл нагружения равно:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\langle \sigma \rangle}{1 - D} - \frac{\langle -\sigma \rangle}{1 - Dh} \quad (8)$$

Коэффициент  $h$  характеризует закрытие микротрещин та микрополостей и зависит от плотности и формы дефектов, свойств материала и как первая

аппроксимация, для упрощения рассматривается  $h$  как константа. В законе упругости параметр  $h$  связан с жесткостью при растяжении-сжатии

$$\sigma = (1-D)E\xi_e \quad \text{при растяжении} \quad (\sigma > 0)$$

$$\sigma = (1-Dh)E\xi_e \quad \text{при сжатии} \quad (\sigma < 0)$$

где  $\xi_e$  - упругая составляющая деформирования.

Если модуль упругости  $E$  известный, находим:

- текущий модуль упругости при растяжении –  $\tilde{E}_p$

$$\tilde{E}_p = E(1 - D); \quad (9)$$

- текущий модуль упругости при сжатии –  $\tilde{E}_c$

$$\tilde{E}_c = E(1 - Dh); \quad (10)$$

Для поврежденного материала коэффициент  $h$  находится из соотношений (9), (10) с учетом (3)

$$h = \frac{E - \tilde{E}_c}{E - \tilde{E}_p} \quad (11)$$

Пример определения параметра  $h$  показан на рис.1 для нескольких циклов до разрушения при упруго-пластическом малоцикловом нагружении в координатах

$$\frac{\tilde{E}}{E} = f\left(\frac{N_i}{N_R}\right)$$

где  $N_i$  - текущее число циклов повторно-переменного нагружения;

$N_R$  - число циклов соответствующее разрушению.

На рис. 1 кривые 1 и 2 построены в относительных величинах изменения модулей упругости при растяжении  $\frac{\tilde{E}_p}{E}$  (кривая 1) и при сжатии  $\frac{\tilde{E}_c}{E}$  (кривая 2)

Для экспериментального определения параметров поврежденности при знакопеременном однонаправленном растяжении-сжатии нами были проведены исследования образцов из стали 30 до разрушения, в мягком режиме нагружения, согласно методики [8]. В качестве характеристики поврежденности использовалось изменение относительного удельного электросопротивления рабочей зоны образца, вследствие возникновения и развития в нем рассеянных микроповреждений при упруго-пластическом деформировании. На рис. 2 приведено распределение напряжений в образце стали 20 при знакопеременном растяжении-сжатии до разрушения. Кривые - 1 характеризуют условные напряжения -  $\sigma_{усл}$  полученные при делении усилия нагружения на начальную площадь образца -  $F_0$ ; кривые - 2 характеризуют истинные напряжения -  $\sigma_{ист}$ , которые определяются делением усилия нагружения на геометрическую минимальную площадь сечения образца -  $F_i$  при деформировании и кривые - 3 характеризуют эффективные напряжения в образце -  $\tilde{\sigma}$ , которые учитывают поврежденность при растяжении и сжатии и получены из соотношений (5) и (6). Анализ кривых 1, 2, 3 показывает, что реально в образце действуют эффективные напряжения, которые выше истинных, и существенное различие наблюдается при больших пластических деформациях, близких к пределу прочности и за ним.

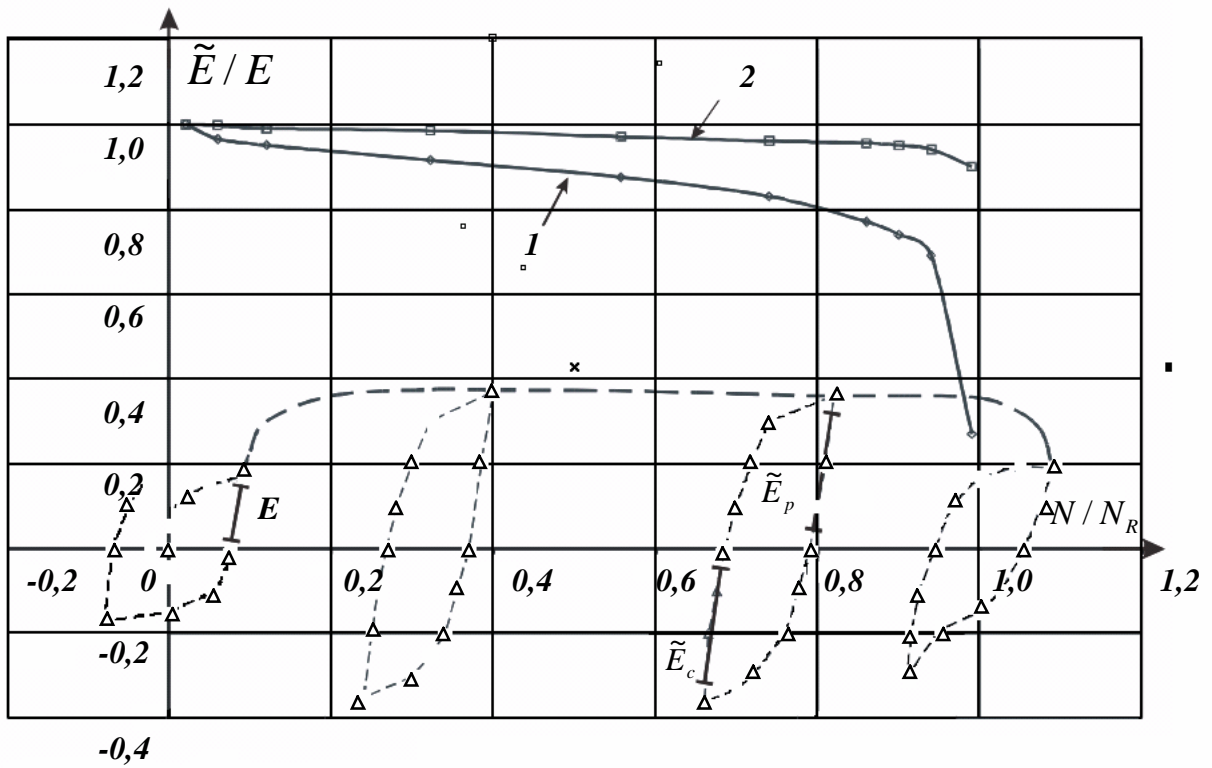


Рис. 1. Пример определения коэффициента закрытия микроповреждений при сжатии  $h$

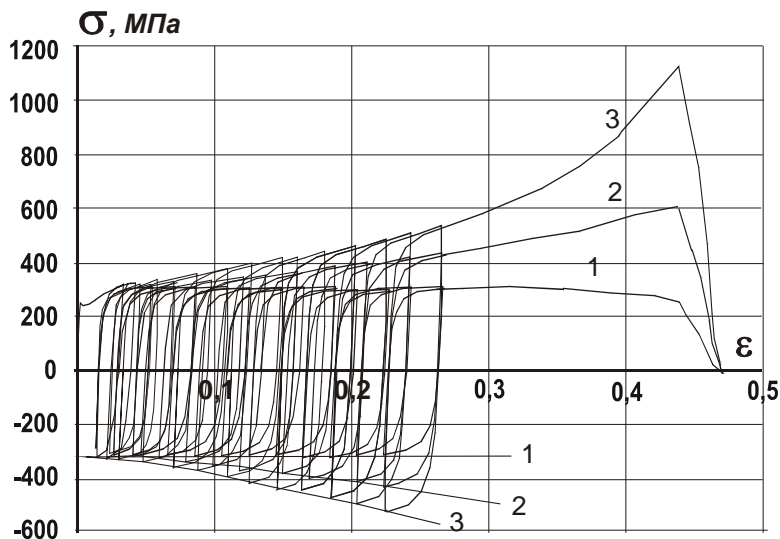


Рис. 2. Распределение напряжений в образце стали 20 при знакопеременном упругопластическом деформировании

На рис. 3 показано изменение модуля упругости при знакопеременном упругопластическом растяжении (кривая 1) и сжатии (кривая 2). Анализ кривых 1 и 2 показывает, что текущие модули упругости на растяжении -  $\tilde{E}_p$  и сжатии -  $\tilde{E}_c$  с ростом упругопластической деформаций уменьшаются. По изменению

экспериментальных значений модулей получена величина коэффициента закрытия микроповреждений при переходе от растяжения к сжатию -  $h=0,8$ . На рис. 4 приведены кривые кинетики роста повреждений при растяжении (кривая 1) и сжатии (кривая 2) в образце. Экспериментальная величина коэффициента  $h = D_C / D_P$  которая может быть получена из рис. 4 изменяется в разных точках в пределах  $h=0,75-0,8$ , что близко к  $h$  полученных при обработке модулей упругости на растяжение и сжатие по формуле (11).  $D_C$  и  $D_P$  - кинетика поврежденности при знакопеременном упругопластическом деформировании соответственно на сжатие и растяжение.

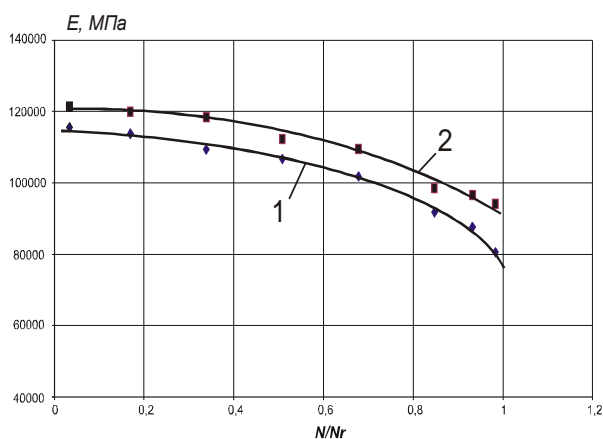


Рис. 3. Кинетика изменения модуля упругости в образце стали 20 при упругопластическом переменном нагружении

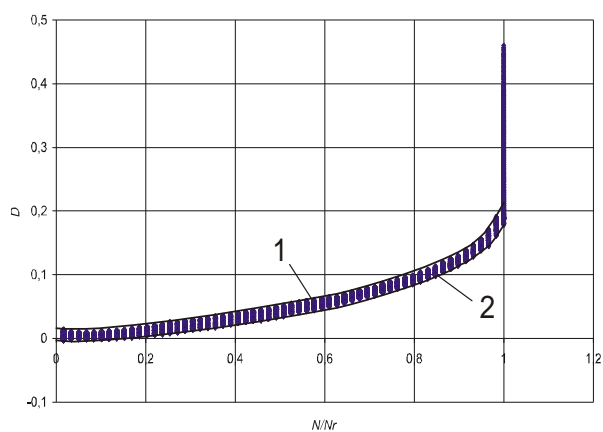


Рис. 4. Поврежденность в образце стали 20 при упругопластическом переменном нагружении

Анализ совокупности полученных данных позволил сделать следующие выводы:

- при одноизмеряемом знакопеременном упруго-пластическом деформировании в конструкционном материале развивается рассеянная микроповрежденность, которая создает эффективные напряжения выше истинных. Не учет микроповреждений в расчетных схемах на прочность приводит к их погрешности, особенно для больших упруго-пластических деформаций.

- экспериментально и теоретически рассмотрено явление частичного залечивания микроповреждений от упруго-пластического растяжения к упруго-пластическому сжатию, которое оценивается коэффициентом закрытия  $h$  (для стали 20  $h \approx 0,8$ ). Приведена методика определения коэффициента закрытия микроповреждений при знакопеременном упруго-пластическом растяжении-сжатии.

- упруго-пластическое деформирование приводит к уменьшению модулей упругости при растяжении- сжатии, что связано с физическими процессами кинетики повреждений.

- приведены экспериментальные результаты кинетики поврежденности для образцов стали 20 при упруго-пластических деформациях растяжения-сжатия до разрушения

**Список литературы:** 1. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Богинич И.О. Модель накопления повреждения в металлических материалах при статическом нагружении // Проблемы прочности, 1995, №7, с.31-34. 2. Леметр Д. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов. //Теоретические основы инженерных расчетов – 1985. – т.107– №1 – с.90-97. 3. Бобырь

Н.И., Мукоида О.Н. Уравнение состояния конструкционных материалов в условиях многоосной циклической ползучести с учетом поврежденности // Проблемы прочности, 1990, №5, с. 10-19. 4. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Металлургия, 1970, 232 с. 5. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984, 144 с. 6. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести. //Изв. АН СССР, Механика твердого тела, – 1958. – с.61-67. 7. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения. // Вопросы прочности материалов и конструкций. – М.: Изд-во АН СССР, 1959, с.5-7. 8. Грабовський А.П., Тимошенко О.В., Масло О.М., Халімон О.П. Дослідження кінетики пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при складному напруженому стані. // Вестник НТУУ „КПІ”, серія Машиностроение. К. 2003, №44, с. 43-47. 9. Jean Lemaitre. Mechanics of solid materials., Cambridge university press, 1992, s. 210.

Сдано в редакцию 23.05.05  
Рекомендовано д.т.н., проф. Керекеш Т.

## ФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ІНІЦЮВАННЯ РОЗРЯДІВ ПРИ РОЗМІРНІЙ ОБРОБКИ ДУГОЮ

Гросул І. А., Боков В. М. (КНТУ, м. Кіровоград, Україна)

*The results of investigations of electric arc and erosion products interaction with the electrodes surfaces under the influence of hydrostatic and hydrodynamic pressures are presented. It is shown, that such influence leads to electric arc become compressed in time and space. By means of conventional photography was investigated the integral effect of electrodes surfaces interaction with electric arcs of different currents and by means of high-speed photorecord method abovementioned interaction was investigated in dynamic.*

Електроерозійна обробка металів, зокрема електроімпульсна обробка (ЕІО), посідає важливе місце у сучасному машино- та приладобудуванні. Її широке використання пов'язано, насамперед з простою схемою реалізації (один поступальний рух електрода-інструмента) та можливістю обробляти деталі будь-якої форми, з будь-яких ступопровідних матеріалів, поза залежністю від твердості, з потрібною технологічною точністю та якістю обробленої поверхні. Прогнозування кінцевого результату ЕІО стало можливим завдяки ретельному вивченню багатьма авторами [1, 2, 3] фізичного механізму електричної ерозії як феномена руйнування металу.

Однак продуктивність ЕІО приблизно в 10-20 разів менша продуктивності механічної обробки, що суттєво обмежує галузь її використання, зокрема в основному виробництві. Одна із причин низької продуктивності ЕІО – дискретне (з паузами) підведення енергії в зону обробки.

Подальше збільшення продуктивності обробки (в десять і більше разів) пов'язано з використанням способу розмірної обробки електричною дугою (РОД) [4], при якому енергія вводиться в зону обробки неперервно з використанням джерел живлення постійним технологічним струмом. Але фізичний механізм ерозії способу РОД ще недостатньо вивчений і в основному описаний з точки зору простої суті [4]. Наукова цікавість до фізичних особливостей цього способу пов'язана з прагненням більш повно реалізувати його переваги, а саме, підвищити якість обробки при збереженні високої продуктивності. На теперішній час шорсткість отриманих способом РОД поверхонь ни