

## Оценка предельных повреждений в материалах при статическом нагружении с учетом вида напряженного состояния

А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, А. З. Богданович

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*На основе разработанной модели накопления повреждений в материале при многоосном нагружении предложена схема построения поверхности предельной поврежденности материала конструкций с учетом наработки и вида напряженного состояния, которая может рассматриваться как своего рода паспорт материала при расчетах конструкций по критериям поврежденности.*

**Ключевые слова:** модель накопления повреждений, структурно-физическая деградация, предельная поврежденность, вид напряженного состояния, критерий поврежденности.

В процессе эксплуатации конструкций вследствие термомеханических воздействий на материал происходит его структурно-физическая деградация: накапливаются рассеянные микрповреждения различной природы, слияние которых в наиболее напряженных зонах приводит к появлению макротрещин.

Поврежденность материала, связанная с образованием дефектов структурного уровня, относится к категории представительных показателей его качества и должна контролироваться в процессе эксплуатации конструкций [1, 2]. Так, например, действующий порядок проведения работ при оценке ресурса паровых турбин [3] наряду с определением текущих коэффициентов запаса прочности конструкции по пределам текучести и прочности металла предусматривает обязательную оценку коэффициентов запаса по поврежденности материала. В связи с тем что контролируемые параметры поврежденности независимо от метода их определения имеют существенный разброс [4–6], в указанном нормативном документе [3] устанавливаются более высокие значения коэффициента запаса по поврежденности материала ( $n_{\text{повр}} = 5$ ) по сравнению с коэффициентами запаса прочности конструкции по пределам текучести и прочности металла.

К сожалению, в нормативных документах других отраслей, в частности касающихся порядка проведения работ при оценке индивидуального ресурса ответственного оборудования в газовой и нефтеперерабатывающей промышленности и продления срока их эксплуатации сверх расчетного ресурса [7, 8], такая важная характеристика, как поврежденность, вообще не учитывается, т.е. оценка надежности и прочности оборудования осуществляется без учета реального состояния основного металла и сварных соединений.

Рост плотности повреждений в материале, сопровождающийся изменением их геометрии, размеров и распределением по ориентациям, существенно влияет на механические свойства материала, в частности приводит к снижению ресурса пластичности [9–12].

По изменению характеристик механических свойств в процессе обработки можно судить о текущем состоянии материала при эксплуатации конструкций.

Интенсивность отмеченных выше структурных трансформаций в материале определяется условиями и режимом нагружения. Поэтому мониторинг остаточного ресурса конструкций по критериям поврежденности может дать достоверный прогноз только при условии учета основных факторов, влияющих на развитие процесса накопления повреждений и уровень предельной поврежденности, при которой формируется и начинает развиваться трещина.

К таким факторам прежде всего следует отнести вид напряженного состояния, что подтверждено экспериментально. Так, в работах [9–12] показано, что степень деградации структуры и свойств материала при деформировании существенно зависит от жесткости напряженного состояния, которая может быть оценена количественно параметром

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_0}{\sigma_i},$$

где  $\sigma_0$  – среднее напряжение,  $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ ;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений,  $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ .

В работе [13] для оценки текущей поврежденности  $\varepsilon^*$  материала в условиях кратковременного деформирования при сложном напряженном состоянии предложена формула

$$\varepsilon^* = \varepsilon_p B^{3K_{\sigma}-1}, \quad (1)$$

где  $B$  – характеристика чувствительности материала к виду напряженного состояния, численно равная отношению его поврежденности (деформации разрыхления) при одноосном растяжении и чистом сдвиге при одной и той же интенсивности деформаций;  $\varepsilon_p$  – поврежденность материала в условиях одноосного растяжения при той же эквивалентной деформации  $\varepsilon_i$ , что и в случае рассматриваемого напряженного состояния,

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1 + \mu)} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}.$$

При реальных значениях коэффициента поперечной деформации ( $\mu = 0,3 \dots 0,45$ ) можно принять  $\frac{\sqrt{2}}{2(1 + \mu)} \cong 0,5$ .

Оказалось, что формулу (1) можно распространить также на случай, когда поврежденность достигает предельных уровней, о чем свидетельствуют результаты специально поставленных опытов.

При испытании стали 20 поврежденности материала ставилось в соответствие изменение объема материала в связи с его “разрыхлением”.

Методика испытаний заключалась в следующем. Гладкие образцы и образцы диаметром 8 мм с исходными концентраторами  $R2$  и  $R4$  растягивали в условиях равновесного деформирования до стадии, предшествующей образованию макротрещины, т.е. до стадии, когда плотность рассеянных повреждений достигает критических значений. После этого образцы разгружали, из центральной зоны вырезали пробы металла с одинаковым весом (примерно 0,7 г) и устанавливали по описанной ранее [14] методике остаточное увеличение объема материала в процессе деформирования. Результаты соответствующих измерений и расчетная кривая для стали 20 показаны на рис. 1.

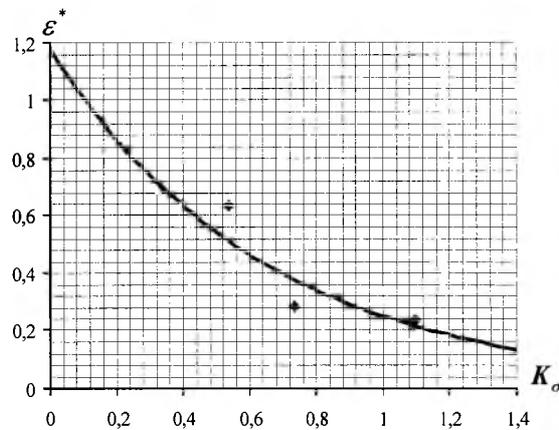


Рис. 1. Зависимость остаточного увеличения объема стали 20 от вида напряженного состояния. (Здесь и на рис. 2 кривые построены при  $B = 0,6$ .)

Результаты аналогичной обработки экспериментальных данных Даля и его сотрудников [15, 16] приведены на рис. 2. Испытания сталей St33 и St690 проводили практически по той же методике.

В качестве параметра поврежденности принято относительное изменение плотности материала  $f = (\rho' - \rho'')/\rho'$ . Здесь  $\rho'$  – исходная плотность материала;  $\rho''$  – плотность поврежденного материала.

Из рис. 1, 2 видно, что зависимость предельной поврежденности материала от вида напряженного состояния у всех сталей качественно одинакова и с достаточной для инженерных расчетов достоверностью может быть описана формулой (1), в которой параметры повреждения  $\varepsilon^*$  и  $\varepsilon_p$  заменены предельными значениями  $\bar{\varepsilon}^*$  и  $\bar{\varepsilon}_p$  соответственно:

$$\bar{\varepsilon}^* = \bar{\varepsilon}_p \cdot B^{3K_\sigma - 1}. \quad (2)$$

Как уже отмечалось, в процессе наработки исчерпывается ресурс пластичности материала, что приводит к росту коэффициента  $B$  и снижению уровня предельной поврежденности материала. В результате кривая  $\bar{\varepsilon}^*(K_\sigma)$  смещается в область низких значений предельной поврежденности, стано-

вится более пологой и для полностью охрупченного материала ( $B \rightarrow 1$ ) вырождается в лежащую в горизонтальной плоскости прямую, параллельную оси абсцисс.

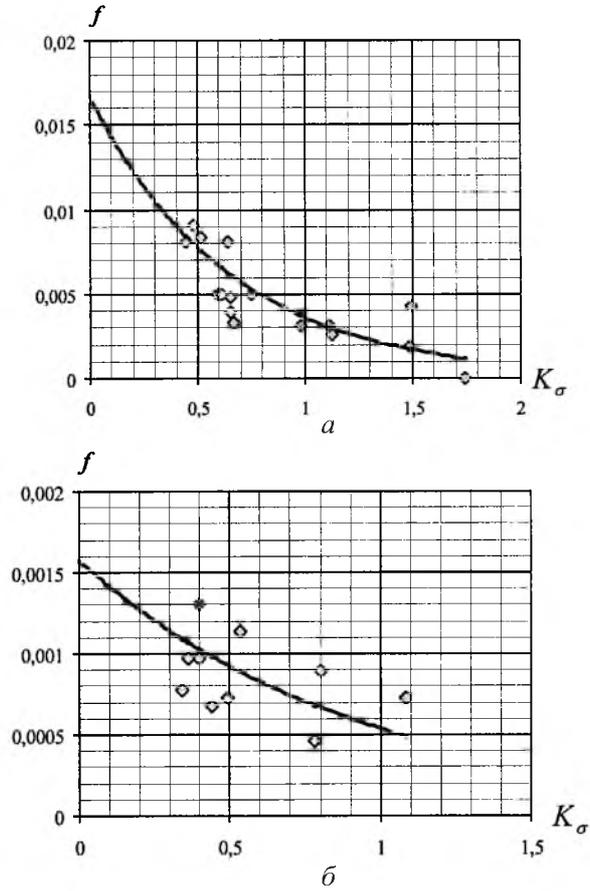


Рис. 2. Зависимость предельной поврежденности сталей St33 (а) и St690 (б) от вида напряженного состояния.

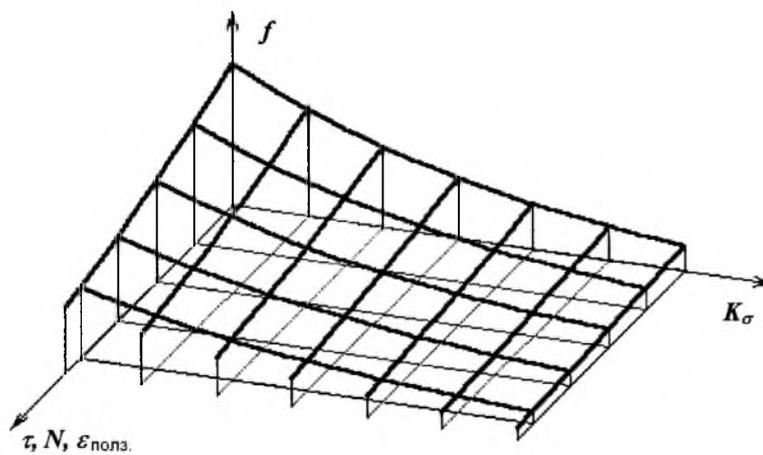


Рис. 3. Поверхность предельной поврежденности материала в зависимости от вида напряженного состояния и времени наработки.

Совокупность кривых  $f(K_{\sigma})$ , соответствующих различной наработке, представляет собой поверхность предельной поврежденности (рис. 3), которая может рассматриваться как своего рода паспорт материала при расчетах конструкций по критериям поврежденности.

Построение этой поверхности легко осуществляется по результатам испытаний малогабаритных образцов с различными кольцевыми концентраторами в условиях одноосного статического растяжения с последующим взвешиванием проб металла в исходном и деформированном состоянии.

## Резюме

На основі розробленої моделі накопичення пошкоджень у матеріалі при багатовісному навантаженні запропоновано схему побудови поверхні граничної пошкоженості матеріалу конструкції з урахуванням напрацювання і виду напруженого стану, яка може розглядатися як свого роду паспорт матеріалу при розрахунках конструкцій за критеріями пошкоженості.

1. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Богинич И. О. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31 – 40.
2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – Киев: Изд-во “Индром”, 1998. – 640 с.
3. РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продления срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – М., 1996.
4. Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Уманский С. Э. и др. Справочное пособие по расчету машиностроительных конструкций на прочность. – Киев: Техніка, 1990. – 240 с.
5. Черемской П. Г. Методы исследования пористых твердых тел. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
6. Черемской П. Г., Слезов В. В., Бетехтин В. И. Поры в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
7. ДНАОП 0.00-8.15-97. Порядок проведения экспертизы газотранспортного обладнання. – Київ, 1997.
8. ВБН В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – Київ, 2000.
9. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В. Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситно-старееющей стали. Сообщ. 1. Исследование стадийности процесса разрушения // Пробл. прочности. – 1991. – № 8. – С. 3 – 13.
10. Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Зайцева Л. В., Гетманчук А. В. Влияние вида напряженного состояния на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость корпусной стали 15X2МФА в разных состояниях. Сообщ. 1. Стадийность процесса разрушения стали КП60 // Там же. – 1993. – № 3. – С. 3 – 9.

11. *Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Зайцева Л. В., Гетманчук А. В.* Влияние вида напряженного состояния на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость корпусной стали 15Х2МФА в разных состояниях. Сообщ. 2. Стадийность процесса разрушения сталей КП80 и КП100 // Там же. – № 5. – С. 13 – 20.
12. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В.* Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситно-старееющей стали. Сообщ. 2. Оценка трещиностойкости стали // Там же. – 1991. – № 8. – С. 14 – 18.
13. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О.* Модель накопления поврежденности в металлических материалах при сложном напряженном состоянии // Там же. – 1997. – № 3. – С. 55 – 63.
14. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О., Недосека С. А.* Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании // Там же. – 1996. – № 5. – С. 23 – 30.
15. *Holland D., Kong X., Schluter N., and Dahl W.* Investigation concerning quantitative determination of local damage in ductile materials // *Steel Research*. – 1992. – **63**, No. 8. – P. 361 – 367.
16. *Schluter N., Holland D., Kong X., and Dahl W.* Quantitative beschreibung des Schädigungszustandes bei duktilen Werkstoffen. Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen. – Aachen, 1993. – 20 p.

Поступила 09. 10. 2001