

О предельной поврежденности материала в зоне концентратора

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

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Предложены параметры предельной поврежденности материала, определяемые по ниспадающим участкам полных диаграмм деформирования. По результатам испытаний трех корпусных сталей установлены зависимости этих параметров от жесткости напряженного состояния в зоне концентратора. Показана идентичность характера указанных зависимостей и зависимостей, полученных на материалах других классов.

Ключевые слова: полная диаграмма деформирования, удельная работа разрушения, предельная поврежденность.

Уравнения состояния материала, основанные на моделях накопления повреждений, содержат параметры, понимание физического смысла которых, как правило, затруднено [1, 2].

В результате поисков эффективного способа оценки повреждений, накапливающихся в материале в процессе деформирования, возникла идея связать меру поврежденности материала с изменением его плотности вследствие разрыхления [3]. Однако, как оказалось, ни суммарный объем пустот, ни какая-либо другая осредненная геометрическая характеристика системы пор не всегда отражают реальное состояние материала, поскольку можно привести примеры, когда прочность поврежденного (с точки зрения принятой меры) материала выше прочности менее поврежденного материала [4].

Помимо чисто технических сложностей в процессе измерения плотности материалов при деформировании многие авторы справедливо указывают на такие важные обстоятельства, которые необходимо учитывать при оценке поврежденности материалов в ходе нагружения, как локализация процесса, очень высокая чувствительность к любому изменению истории нагружения и, как следствие, большие градиенты и разбросы значений поврежденности в деформируемом объеме и др.

Тем не менее по мере развития экспериментальной техники, в частности после разработки швейцарской фирмой “Меттлер-Толедо” высокоточных весов нового поколения для гидростатического взвешивания с точностью до 0,1 мкг, исследователи стали получать более достоверные данные по остаточному изменению объема при пластическом деформировании, что дало основание снова обратиться к методу взвешивания. Многочисленные исследования проведены проф. Далем с сотрудниками в Рейн-Вестфальской технической высшей школе (Аахен, Германия) [5, 6].

Обработка большого массива экспериментальных данных [5–7] позволила построить модель, описывающую зависимость предельной поврежденности различных материалов от вида напряженного состояния с достаточной для инженерных расчетов достоверностью [7]:

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

где $\bar{\varepsilon}^*$ – поврежденность материала при заданном напряженном состоянии; $\bar{\varepsilon}^P$ – поврежденность материала при одноосном растяжении; K_σ – параметр Бриджмена; B – характеристика чувствительности материала к виду напряженного состояния в отношении накопления повреждений.

Оценка поврежденности материала по формуле (1) во многих случаях является наиболее приемлемой, так как, во-первых, содержит только две константы ($\bar{\varepsilon}^P$, B) и, во-вторых, позволяет эффективно использовать легко определяемые из сравнительно простых опытов другие параметры, связанные с поврежденностью материала.

Так, авторами [8] предложена методика определения предельного значения дефекта модуля упругости материала при равновесном деформировании образца. В основу этой обладающей повышенной точностью методики положен дифференциальный метод измерения деформаций образца в зоне макро-разрушения двумя малобазными тензOMETрами на стадии нагружения, соответствующей ниспадающему участку полной диаграммы деформирования. Здесь принципиальное значение имеет то обстоятельство, что в условиях равновесного деформирования вязкость разрушения G , связанная с необратимой энергией, т.е. с работой, необходимой для развития образовавшейся трещины отрыва, и вязкость разрушения J_1 , связанная с запасом упругой энергии системы в момент старта этой трещины, равны [9]. Поэтому суммарное упругое удлинение Δl_y силовых элементов машины, в том числе захватов и головок образца, рабочей части, включая и зону предельно разупрочненного материала, в которой происходит непосредственно слияние пор и микротрещин в макротрещину, в момент старта последней эквивалентно удлинению образца Δl_p на стадии роста отрывной макротрещины (рис. 1) ($\Delta l_y \rightarrow 0$ при распространении макротрещины на все сечение образца, $\Delta l_p \rightarrow \Delta l_y$).

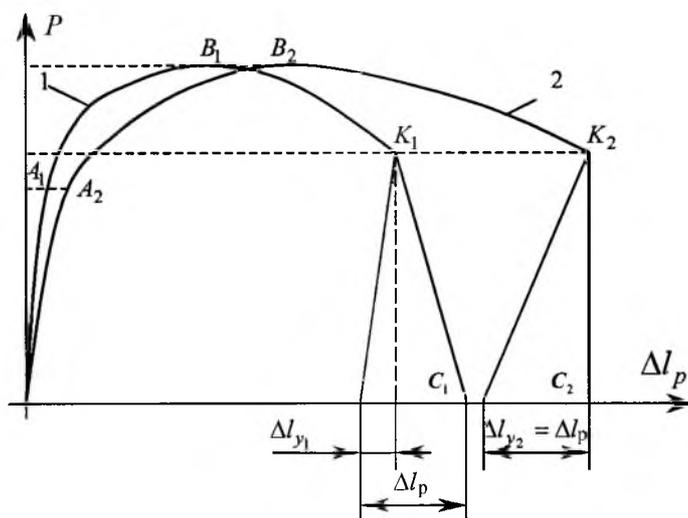


Рис. 1. Диаграммы деформирования пластичного материала: 1 – работа разрушения больше суммарной упругой энергии системы, определяется вязкостью разрушения G , связанная с ростом трещины отрыва; 2 – работа разрушения равна суммарной упругой энергии системы, определяется вязкостью разрушения J_1 , связанная со стартом трещины отрыва.

Таким образом, имея полные диаграммы деформирования, при оценке предельных повреждений в материале можно оперировать параметрами, характеризующими процесс роста устойчивой отрывной макротрещины, а не критическое состояние материала в момент ее старта. Поскольку такое состояние материала чаще всего бывает неустойчивым, запасенной энергии в нагружающей системе или в самом образце может оказаться достаточно для неконтролируемого динамического взаимодействия пор и микротрещин.

Ранее [10] введен параметр ε_F , представляющий собой удлинение за счет приращения макротрещины на единицу площади сечения:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta l_p}{F_k}, \quad (2)$$

где Δl_p – удлинение образца на стадии роста макротрещины; F_k – площадь поверхности разрушения.

Введение такого параметра, естественно, возможно только при условии, что микромеханизмы разрушения материала в зоне вершины трещины в процессе ее развития не изменяются. Предполагается также, что параметр ε_F является характеристикой свойств материала при заданном напряженном состоянии матрицы.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том [10, 11], что параметр ε_F существенно зависит от вида напряженного состояния и наработки, а также что ширина зоны процесса, в которой происходит непосредственное слияние пор и микротрещин в макротрещину, коррелирует с параметром ε_F .

При равновесном деформировании в малой области испытуемых малогабаритных образцов с разными исходными концентраторами напряжений реализуются однородные поля повреждений, соответствующие той или иной внешней схеме нагружения локального объема материала, оцениваемой, например, по параметру Бриджмена $K_\sigma = \sigma_0/\sigma_i$, где σ_0 – среднее напряжение; σ_i – интенсивность напряжений.

Известно, что в предельном состоянии росту макротрещины при равновесном деформировании соответствуют линейные диаграммы [10, 12, 13]

$$\frac{dP}{dl} = \text{const},$$

откуда следует

$$\frac{dP}{dF_e} = \text{const},$$

где F_e – эффективная площадь сечения образца, причем при поврежденности материала, достигнувшей предельных значений, $dF_e/dl = \text{const}$.

Следовательно, однородным полям предельных повреждений, сформированным при разных внешних воздействиях, соответствуют различные истинные напряжения $S_e = S_k$, где S_k – сопротивление материала отрыву.

Для оценки предельной поврежденности материала целесообразно рассмотреть две характеристики:

параметр λ , имеющий смысл модуля упругой податливости предельно поврежденного материала,

$$\lambda = \frac{\varepsilon_F}{S_k} \quad (3)$$

и параметр A_p , имеющий смысл удельной работы разрушения,

$$A_p = \varepsilon_F S_k. \quad (4)$$

Следует отметить, что попытка обосновать корреляцию меры повреждений с макроскопическими характеристиками свойств материала, определяемыми в лабораторных условиях, была предпринята в работе [14], в которой, по мнению автора, в качестве одной из таких характеристик может быть принята удельная работа разрушения, т.е. величина энергии, затрачиваемой на образование единицы новой поверхности трещины. Однако вопрос о нахождении численных значений указанного параметра в работе [14] не обсуждался.

Как было показано выше, удельную работу разрушения пластичных материалов можно вычислить по соотношению (4) с использованием данных, которые легко определяются по ниспадающим участкам полной диаграммы деформирования. Экспериментальное определение параметров (3), (4) и их сравнение для выбора более представительного проведено на корпусных сталях КП60, КП80 и КП100.

Значения параметров ε_F , S_k , λ и A_p , рассчитанные по результатам испытаний гладких образцов с исходным диаметром 8 мм и образцов с концентраторами из сталей КП60, КП80 и КП100 в условиях равновесного деформирования, представлены в таблице.

Результаты испытаний корпусных сталей

Материал	Тип образца	ε_F , мм ⁻¹	S_k , кг/мм ²	K_σ	λ , мм/кг	A_p , кг/мм ³
КП60	Гладкий	0,0370	151,09	0,706	0,00024	5,59
	R20	0,0358	138,83	0,693	0,00026	4,97
	R10	0,0351	125,70	0,722	0,00028	4,41
	R4	0,0196	124,01	0,809	0,00016	2,43
	R2	0,0160	129,09	0,982	0,00012	2,07
	< 120°, R0,3	0,0138	130,00	1,280	0,00011	1,79
	< 90°, R0,3	0,0084	123,26	1,547	0,00007	1,04
КП80	Гладкий	0,0222	167,20	0,542	0,00013	3,71
	R10	0,0201	156,72	0,640	0,00013	3,15
	R4	0,0117	152,41	0,732	0,00008	1,78
	R2	0,0057	206,00	1,010	0,00003	1,17
КП100	Гладкий	0,0150	184,29	0,438	0,00008	2,76
	R10	0,0132	163,94	0,466	0,00008	2,16
	R4	0,0069	157,43	0,552	0,00004	1,09

Испытания образцов проводили на установке с регулируемой жесткостью нагружающей системы [15].

На рис. 2, 3 представлены зависимости соответственно параметров λ и A_p от коэффициента K_σ . Анализ полученных результатов показал, что оба параметра весьма чувствительны к состоянию материала и жесткости напряженного состояния и могут характеризовать предельную поврежденность материала. Однако более предпочтительным, на наш взгляд, является параметр A_p .

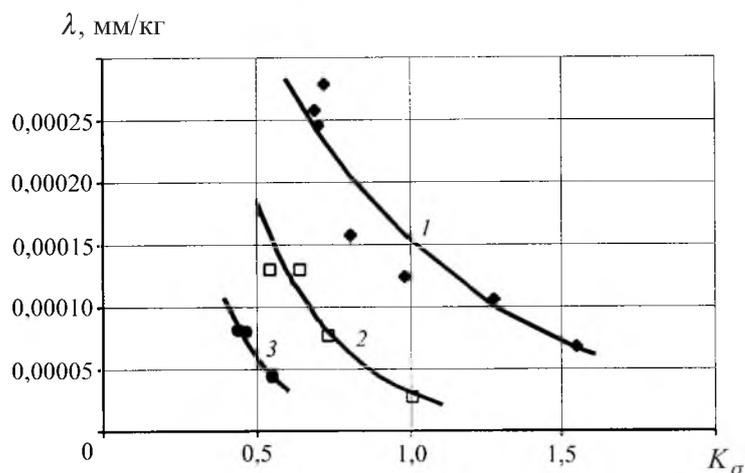


Рис. 2. Зависимость параметра λ корпусных сталей от жесткости напряженного состояния. (Здесь и на рис. 3: 1, 2, 3 – стали КП60, КП80, КП100 соответственно.)

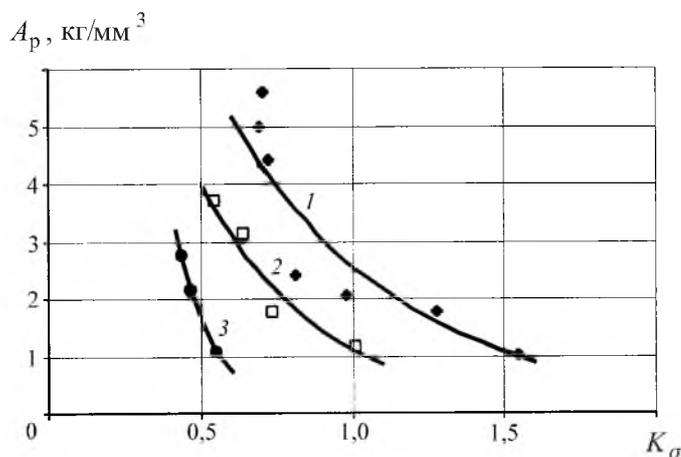


Рис. 3. Зависимость параметра A_p корпусных сталей от жесткости напряженного состояния.

На рис. 4 для сравнения приведены зависимости параметра поврежденности f , определяемого прямым методом взвешивания (здесь в качестве параметра поврежденности принято относительное изменение плотности материала $f = (\rho^I - \rho^{II}) / \rho^I$, ρ^I – исходная плотность материала, ρ^{II} – плотность предельно поврежденного материала), от жесткости напряженного состояния для сталей St33, St690.

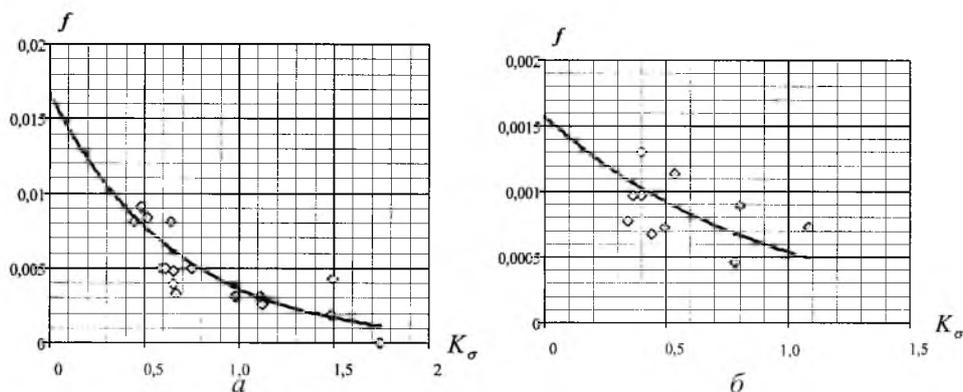


Рис. 4. Зависимость предельной поврежденности сталей от вида напряженного состояния: а – сталь St33; б – сталь St690.

Как видно из рис. 2–4, эти зависимости качественно подобны. Таким образом, по параметру A_p можно достаточно просто проводить экспресс-контроль уровня локальных предельных повреждений в деформируемом материале. В качестве эталонных можно использовать соответствующие данные, полученные, например, методом взвешивания.

Резюме

Запропоновано параметри граничної пошкодженості матеріалу, що визначаються по спадних ділянках повних діаграм деформування. За результатами випробувань трьох корпусних сталей установлено залежності цих параметрів від жорсткості напруженого стану в зоні концентратора. Показано ідентичність характеру указаних залежностей та отриманих на матеріалах інших класів.

1. Ковальчук Б. И., Лебедев А. А., Уманский С. Э. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1987. – 280 с.
2. Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. – 225 с.
3. Новожилов В. В. О пластическом разрыхлении // Прикл. математика и механика. – 1965. – № 4. – С. 681 – 689.
4. Черепанов Г. П. Современные проблемы механики разрушения // Пробл. прочности. – 1987. – № 8. – С. 3 – 13.
5. 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.
6. Schluter N., Holland D., Kong X., and Dahl W. Quantitative Beschreibung des Schädigungszustandes bei duktilen Werkstoffen. – Aachen: Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen, 1993. – 20 p.

7. *Lebedev A. A., Chausov N. G., and Bogdanovich A. Z.* Model for damage accumulation in a material under multiaxial loading // Proc. of the Sixth Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture / Ed. Manuel Morlina de Freitas. – Lisbon (Portugal). – 2001. – 2. – P. 1023 – 1029.
8. *А. с. 1393053 СССР. МКИ⁴ G01N3/08.* Способ определения предельного значения дефекта модуля упругости материала / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, Ю. Л. Евецкий // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 6. – С. 254.
9. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Феноменологические основы оценки трещиностойкости материалов по параметрам спадающих участков диаграмм деформаций // Пробл. прочности. – 1983. – № 2. – С. 6 – 10.
10. *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.
11. *Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Гетманчук А. В.* Влияние вида напряженного состояния на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость корпусной стали 15Х2МФА в разных состояниях // Там же. – 1993. – № 7. – С. 33 – 38.
12. *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. 1. Стадийность процесса разрушения стали КП60 // Там же. – № 3. – С. 3 – 9.
13. *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. 1. Стадийность процесса разрушения сталей КП60 и КП100 // Там же. – № 5. – С. 13 – 20.
14. *Болотин В. В.* Трещиностойкость материалов и континуальная механика повреждений // Докл. АН России. – 2001. – 376, № 6. – С. 760 – 762.
15. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Установка для испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования // Пробл. прочности. – 1981. – № 12. – С. 104 – 106.

Поступила 01. 02. 2002