

Моделирование кинетики деформирования материала в зоне предразрушения

Н. Г. Чаусов, А. З. Богданович

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

На основании концепции полных диаграмм деформирования предложена модель, описывающая закон распределения напряжений в зоне предразрушения пластичных материалов с учетом вида напряженного состояния.

Ключевые слова: распределение напряжений, зона предразрушения, пластичные материалы, вид напряженного состояния.

В процессе деформирования материалов при различных температурно-силовых воздействиях, как правило, наблюдаются необратимые изменения их свойств и структуры, что приводит к формированию рассеянных повреждений в виде микро- и макропор. При слиянии последних образуется макротрещина, распространяющаяся на все сечение деформируемого тела.

Кинетика такого постадийного процесса сложна и неоднозначна, поэтому до настоящего времени еще не построены модели, адекватно описывающие процессы накопления повреждений, срезания перемычек между статистически распределенными порами и образования макротрещины с учетом, в частности, температуры и вида напряженного состояния [1–8]. Это связано главным образом с тем, что для построения и физического обоснования соответствующих моделей оказалось недостаточно традиционных экспериментальных методов описания разрушения, необходимы дополнительные экспериментальные данные, полученные в достоверно контролируемых условиях температурно-силового нагружения с последующим металлографическим анализом.

В связи с этим неразрешимым остается один из основных вопросов механики разрушения – оценка размеров зон пластичности и предразрушения, а также характера распределения в них напряжений.

Предпринимались многочисленные попытки разработать модели зон предразрушения для хрупких и пластичных материалов. Так, например, модели зоны предразрушения, первоначально предложенные Баренблатом [9] для квазихрупких твердых тел и Панасюком–Дагдейлом для идеально пластичных материалов [10, 11], позднее неоднократно использовались исследователями в области механики разрушения. Однако очевидно, что с использованием известных моделей [9–19] невозможно описать такие явления, как зарождение, рост и слияние пор, которые предшествуют развитию пластического разрушения, а также сложно предсказать эффекты перенапряжения вблизи вершины трещины.

Оригинальные идеи по этому вопросу были высказаны С. Д. Волковым [20–22], который считал, что характер распределения напряжений вблизи вершины трещины в принципе повторяет ниспадающий участок кривой на

полной диаграмме деформирования материала, полученной при испытании гладкого образца в условиях предельно жесткого нагружения. При этом он удачно применил принцип аналогий, состоящий в следующем. Если элемент ΔV пластичного материала поместить в стандартный первоначально неповрежденный образец и провести испытание, например, на одноосное растяжение, то вся кинетика деформирования и разрушения этого элемента будет отражена в полной диаграмме деформирования. Если же элемент ΔV поместить вблизи особой точки тела (вершина трещины), где он испытывает подобное растяжение, то полные диаграммы деформирования материала в обоих случаях будут идентичны.

Проблема сингулярности задачи в модели Волкова решается автоматически за счет убывания до нуля сопротивления материала в особой точке, где деформация максимальна и равна предельной для полностью равновесного состояния.

Концепция полных диаграмм деформирования представляется весьма перспективной и приоритетной. В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины выполнен обширный объем работ, связанный с исследованием кинетики разрушения пластичных материалов в разных состояниях по результатам их испытаний в условиях равновесного деформирования с регистрацией ниспадающего участка кривой деформирования [23–37]. При этом основное внимание уделено исследованию кинетики процесса накопления повреждений в материале, вплоть до их предельных концентраций, и изучению характера изменения ниспадающего участка кривой, соответствующего образованию и росту макротрещины, в зависимости от вида напряженного состояния и температуры.

В результате разработана и экспериментально обоснована модель накопления повреждений в материалах [38–40], в которой для учета особенностей эволюции структуры материала в связи с влиянием вида напряженного состояния введена функция

$$f(\sigma_{ij}) = B^{3K_\sigma - 1}, \quad (1)$$

где K_σ – параметр Бриджмена; B – характеристика чувствительности материала к виду напряженного состояния в отношении накопления повреждений.

Показано [41], что по мере исчерпания ресурса пластичности в процессе наработки происходит рост коэффициента B . Для полностью охрупченного материала $B \rightarrow 1$. Кроме того, установлено [29, 32, 33], что вид напряженного состояния в первую очередь влияет на изменение параметров, характеризующих зону и уровень поврежденности материала в предельном состоянии, в частности уменьшается ширина зоны процесса, в которой происходит непосредственное слияние пор и микротрещин, их трансформация в макротрещину, изменяется тип повреждений и их статистическое распределение. При этом с увеличением жесткости напряженного состояния наклон начального линейного участка ниспадающей ветви KC , соответствующего образованию и росту отрывной трещины в материале (рис. 1), а

следовательно, и энергоемкость разрушения уменьшаются. Уменьшается также параметр Δl_p (рис. 1), которому можно поставить в соответствие максимальное раскрытие трещины в ее центральной части. Это свидетельствует об устойчивой тенденции к снижению пластичности материала с увеличением жесткости напряженного состояния.

Для идеально хрупкого материала полная диаграмма деформирования приобретает вид, показанный на рис. 2.

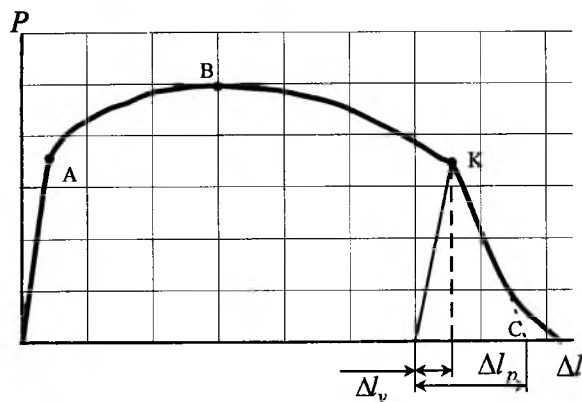


Рис. 1. Полная диаграмма деформирования пластичного материала.

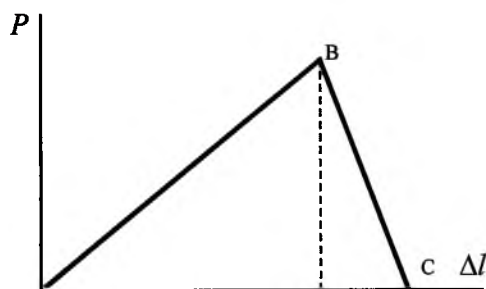


Рис. 2. Полная диаграмма деформирования хрупкого материала.

Обнаруженные закономерности деформирования пластичных материалов на стадии зарождения и роста макротрещины использованы для разработки экспресс-метода оценки трещиностойкости материалов по параметру K_λ [30, 34, 42–44]:

$$K_\lambda = \sqrt{S_k \overline{\Delta l_p} E}, \quad (2)$$

где S_k – сопротивление материала отрыву; $\overline{\Delta l_p}$ – нормированная путем приведения к начальной площади сечения стандартного образца величина Δl_p (рис. 1); E – модуль Юнга материала.

Таким образом, с использованием полных диаграмм деформирования удастся оценить уровень повреждений материала на стадии разупрочнения, включая их предельные значения в момент старта макротрещины (точка K на диаграмме деформирования – рис. 1), и для конкретного материала установить зависимость параметров Δl_p и K_λ от вида напряженного состо-

яния. Анализ известных данных показывает, что параметр Δl_p пропорционален приросту площади образовавшейся трещины (это следует, в частности, из экспериментально наблюдаемой линейной диаграммы на участке автомодельного роста трещины $dP/dl = \text{const}$ – рис. 1) и, следовательно, находится в простой зависимости с параметром Δ , характеризующим участок возле вершины трещины, на котором достигаются наибольшие напряжения и максимальная интенсивность повреждений (рис. 3).

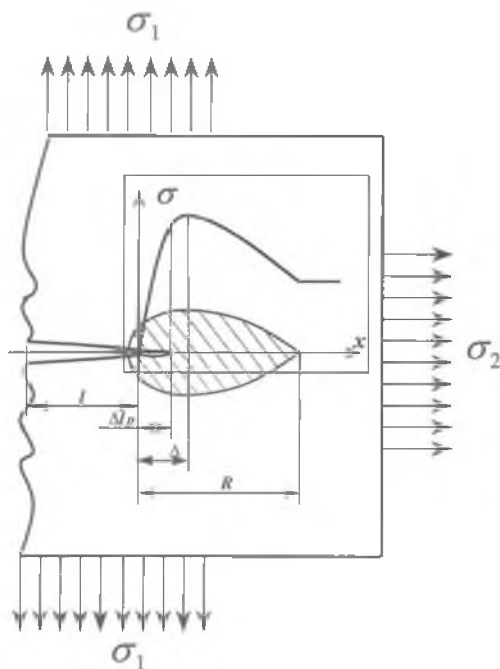


Рис. 3. Схема разрушения пластичного материала.

Естественно, что если параметр Δl_p существенно зависит от вида напряженного состояния, то и параметр Δ аналогичным образом будет зависеть от него. Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что характер распределения напряжений у вершины макротрещины непосредственно связан с процессами упрочнения матрицы материала при различном термодинамическом воздействии и сопутствующими им процессами разрыхления материала в целом.

В течение более десяти лет в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины проводились систематические комплексные исследования механических и структурных аспектов кинетики разрушения металлических конструкционных материалов разных классов на заключительной стадии деформирования в зависимости от температурно-силовых условий нагружения. Это позволило на базе новых экспериментальных данных (испытания малогабаритных образцов) и их обобщений разработать основы и общие принципы прогнозирования сопротивления конструкций из пластичных материалов накоплению повреждений и развитию разрушения по результатам испытаний малогабаритных образцов [41, 44–46].

В Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины предприняты попытки решения ряда упругопластических задач механики разрушения с использованием деформационных трехстадийных моделей, которые кроме зоны пластического течения учитывают также разрыхление материала в зоне предразрушения (ниспадающий участок полной диаграммы деформирования) [47–50]. При этом делаются обоснованные экспериментально допущения [51]: в процессе нагружения тела с трещиной в момент старта последней напряжения в вершине трещины равны нулю; изменяются размеры зоны пластического течения и величина осредненных напряжений σ_0 в зоне предразрушения.

Попытка аналогичного моделирования напряженного состояния материала в зоне предразрушения некой сложной функцией, обращающейся в нуль в вершине трещины, предпринята в работе [52].

Уже есть определенный прогресс в моделировании зоны предразрушения при переходе от известных моделей Баренблатта и Панасюка–Дагдейла к более физически достоверным моделям, объективно отражающим весь процесс деформирования и разрушения материала, в виде перевернутой полной диаграммы деформирования в зоне трещины. Однако до настоящего времени еще не рассматривались модели, которые хотя бы качественно прогнозировали трансформацию этой диаграммы у вершины трещины с учетом реальных свойств материала и вида напряженного состояния.

Представляется, что такая модель должна обладать следующими основными свойствами:

состояние материала у вершины трещины адекватно состоянию ряда параллельно прилегающих друг к другу элементов ΔV материала, каждый из которых в момент роста трещины находится на различной стадии полной диаграммы деформирования;

существенные повреждения, как результат объединения микропор и микропустот, образуются только в зоне материала, непосредственно примыкающей к вершине трещины;

высота зоны интенсивного повреждения материала и ее длина зависят от свойств материала и вида напряженного состояния;

напряжение достигает максимума на определенном расстоянии Δ от вершины трещины;

левее этого максимума вдоль линии трещины напряжение падает и достигает нуля в особой точке (вершина трещины);

вид кривой распределения напряжений у вершины трещины зависит от исходных свойств материала и жесткости напряженного состояния.

Полностью отразить все указанные требования может только очень сложная модель, которая вряд ли будет пригодна для практических расчетов. Тем не менее оказалось, что основные требования в большей или меньшей степени могут быть удовлетворены, если для описания распределения напряжений в зоне предразрушения принять двухпараметрическую сильно нелинейную функцию, состоящую из двух частей: степенной, описывающей упрочнение матрицы материала, и экспоненциальной, описывающей особенности накопления повреждений в материале с учетом вида напряженного состояния и наработки:

$$\sigma = \sigma_{0,2} \left(\frac{x}{R}\right)^n \left(\frac{1}{B}\right)^{(3K_\sigma - 1)(1 - x/R)} \quad (3)$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала; x – текущее расстояние от вершины трещины до рассматриваемой точки в пластической зоне; R – протяженность пластической зоны; n – коэффициент деформационного упрочнения; B – характеристика чувствительности материала к виду напряженного состояния в отношении накопления повреждений; K_σ – параметр Бриджмена.

Характерное распределение напряжений, описываемое этой функцией, показано на рис. 4.

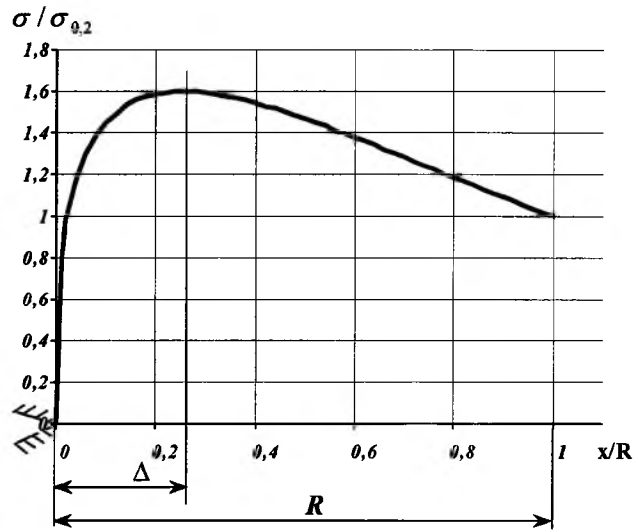


Рис. 4. Моделирование распределения напряжений в зоне предразрушения пластического материала при $n = 0,3$; $B = 0,3$; $K_\sigma = 0,66$.

С использованием функции (3) рассмотрим распределение напряжений у вершины трещины для двух классических случаев.

Для модели Панасюка–Дагдейла [10, 11] при $n = 0$, $K_\sigma = 1/3$, $1 > B \geq 0$ получаем $\sigma = \sigma_{0,2}$.

Для модели Кнаусса [15, 16] при $n = 1$, $B = 1$, $K_\sigma \geq 1/3$ получаем $\sigma = \sigma_{0,2}(x/R)$.

Таким образом, функция (3) адекватно описывает распределение напряжений в области предразрушения для двух предельных случаев (рис. 5).

Далее ограничимся рассмотрением случая двухосного растяжения (плоское напряженное состояние). Здесь σ_1 приложено перпендикулярно плоскости трещины, а σ_2 направлено вдоль линии трещины.

На рис. 6 представлены результаты машинного эксперимента при различных значениях n , B и K_σ . Их анализ позволяет сделать ряд интересных выводов, не противоречащих основным положениям механики деформированного твердого тела и механики разрушения. Так, диапазон значений параметра B и коэффициента n , при которых функция (3) описывает с достаточной достоверностью участки упрочнения и разупрочнения мате-

риалов разных классов, т.е. сохраняет свой физический смысл, находится в пределах $0 \dots 1$. Из рис. 6 четко прослеживается тенденция к охрупчиванию материала при повышении значений параметра B и коэффициента n (кривая распределения напряжений у вершины трещины стремится к прямой Кнаусса).

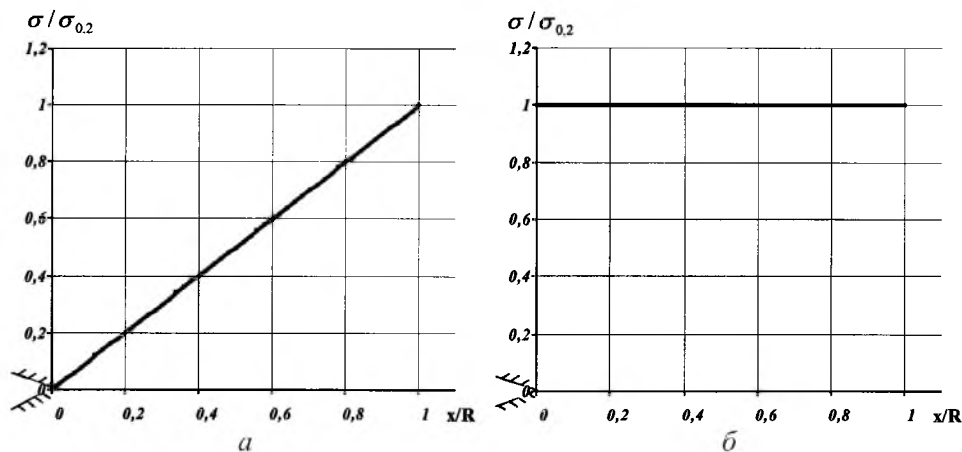


Рис. 5. Моделирование распределения напряжений в зоне предразрушения с использованием функции (3) для двух предельных случаев: a – модель Кнаусса ($n = 1$; $B = 1$; $K_\sigma = \text{var}$); b – модель Панасюка–Дагдейла ($n = 0$; $B = \text{var}$; $K_\sigma = 1/3$).

Особый интерес вызывает анализ распределения напряжений у вершины трещины в момент перехода от идеально пластического материала (модель Панасюка–Дагдейла) к материалу с упрочнением. Очевидно, что в рамках принятой модели упрочнение материала в узкой зоне вдоль линии трещины приводит к изменению вида напряженного состояния, происходит переход от одноосного растяжения к двухосному. В этом случае значение $K_\sigma > 1/3$, и можно сделать логическое предположение, что модель Панасюка–Дагдейла описывает только начальное (первое приближение) пластическое поведение реального материала у вершины трещины. С каждым последующим шагом деформирования реального материала с трещиной жесткость напряженного состояния в узкой зоне у вершины трещины автоматически повышается.

Естественно, что в зависимости от типа материала, который характеризуется пределом текучести и соответствующими значениями параметров B и n , и исходного соотношения растягивающих напряжений σ_1 и σ_2 предельное значение параметра K_σ в полосе интенсивного разрыхления материала у вершины трещины в момент ее роста будет разным.

Показательно, что функция (3) качественно описывает также явление, связанное с уменьшением расстояния Δ (рис. 3), на котором достигается пик максимума напряжений, по мере роста жесткости напряженного состояния. Это согласуется с экспериментальными данными о трансформации полных диаграмм деформирования при росте параметра K_σ [29, 30, 32–34].

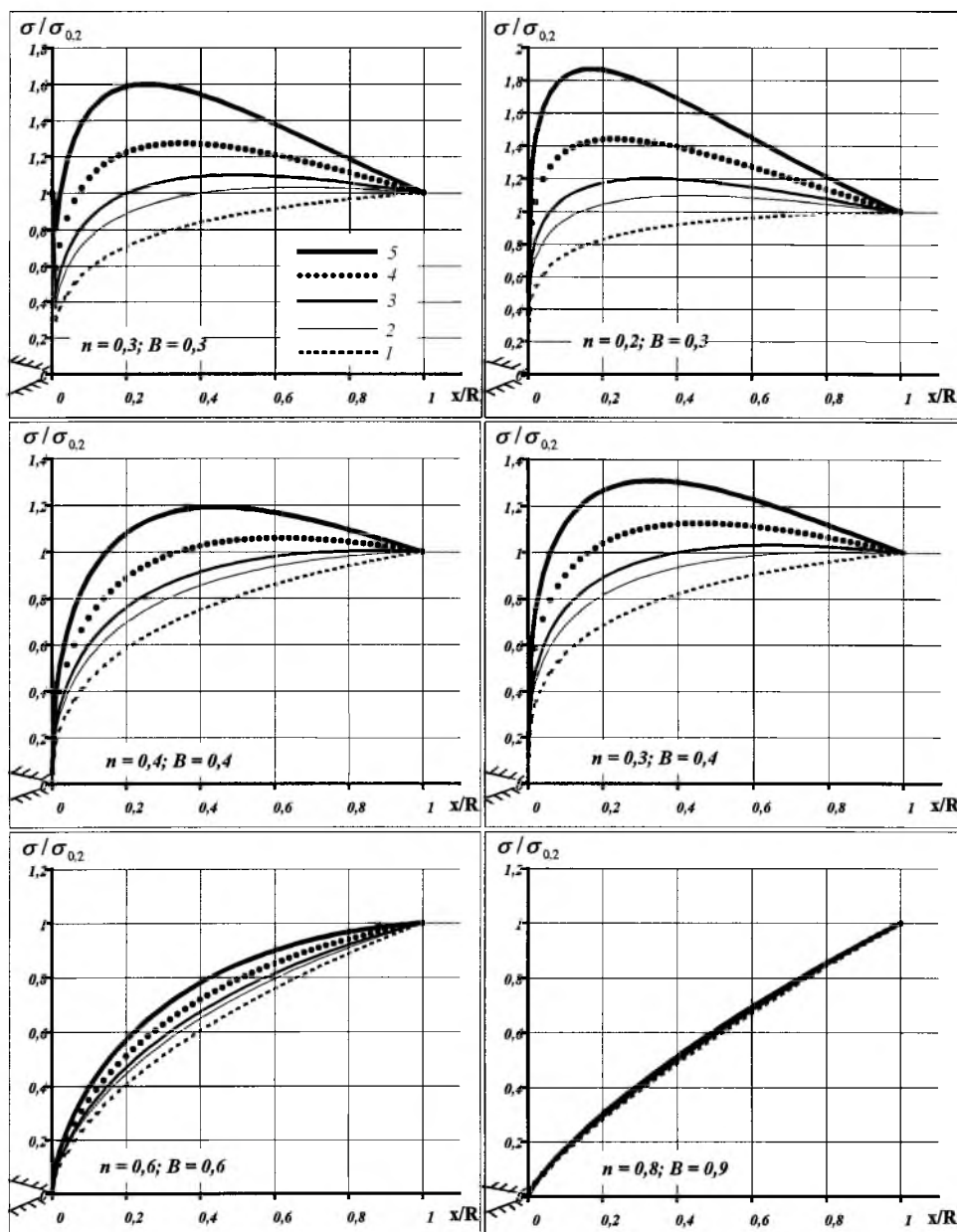


Рис. 6. Моделирование распределения напряжений в зоне предразрушения пластичного материала с использованием функции (3) для различных n , B и K_σ : 1 – $K_\sigma = 0,38$; 2 – $K_\sigma = 0,46$; 3 – $K_\sigma = 0,5$; 4 – $K_\sigma = 0,57$; 5 – $K_\sigma = 0,66$.

Отметим, что расположение пика напряжений относительно зоны пластичности R при различных значениях K_σ (рис. 6) не противоречит принятому физическому допущению о том, что распределение напряжений у вершины трещины в зависимости от параметра K_σ в принципе повторяет ниспадающие участки кривых на полных диаграммах деформирования, полученных на образцах с разными концентраторами [29, 30, 32–34].

Более детальный анализ уравнения (3) показал, что входящие в него постоянные можно сократить до одной, приняв $n = B$. В этом случае, несмотря на снижение объема информации о материале вдвое, основные свойства уравнения (3) сохраняются. Действительно, при $n = B = 0$ оно трансформируется в модель Панасюка–Дагдейла, при $n = B = 1$ – в модель Кнаусса. При промежуточных значениях $0 < n = B < 1$ характер распределения напряжений, как видно из рис. 6, качественно не изменяется.

Резюме

На основі концепції повних діаграм деформування запропоновано модель, яка дозволяє описувати закон розподілу напружень у зоні передруйнування пластичних матеріалів з урахуванням виду напруженого стану.

1. Rice J. R. and Tracey D. M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields // J. Mech. Phys. Solids. – 1969. – **17**, No. 3. – P. 201 – 207.
2. Гэрсон. Континуальная теория вязкого разрушения, обусловленного образованием и ростом пор. Ч. 1. Критерий текучести и законы течения для пористой пластической среды // Теорет. основы инж. расчетов. – 1977. – № 1. – С. 1 – 17.
3. Worswick M. J. and Pick R. J. Void growth and constitutive softening in a periodically voided solid // J. Mech. Phys. Solids. – 1990. – **38**, No. 5. – P. 601 – 625.
4. Besson J., Steglich D., and Brooks W. Modeling of crack growth in round bars and plane strain specimens // Int. J. Solids Struct. – 2001. – **38**, Nos. 46–47. – P. 8259 – 8284.
5. Rousselier G. Ductile fracture models and their potential in local approach of fracture // Nucl. Eng. Des. – 1987. – **105**. – P. 97 – 111.
6. Tvergaard V. Material failure by void growth to coalescence // Adv. Appl. Mech. – 1990. – **27**. – P. 83 – 151.
7. Болотин В. В. Трещиностойкость материалов и континуальная механика повреждений // Докл. АН России. – 2001. – **376**, № 6. – С. 760 – 762.
8. Perzyna P. and Drabik A. Analysis of the evolution describing the post-critical behaviour of dissipative solids // Arch. Mech. – 1984. – **36**, Nos. 5–6. – P. 733 – 748.
9. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // Журн. прикл. механики и техн. физики. – 1961. – № 4. – С. 3 – 57.
10. Леонов М. Я., Панасюк В. В. Развитие найдрібніших тріщин у твердому тілі // Прикл. механіка. – 1959. – **5**, вып. 4. – С. 391 – 401.
11. Dugdale D. S. Yielding of steel sheets containing slits // J. Mech. Phys. Solids. – 1960. – **8**, No. 2. – P. 100 – 108.
12. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 416 с.

13. *Slegmund T. and Brocks W.* The role of cohesive strength and separation energy for modeling of ductile fracture // ASTM STP 1360. – 2000. – P. 139 – 151.
14. *Broberg K. B.* On the treatment of the fracture problem at large scale yielding // Proc. Int. Conf. “Fracture Mechanics and Technology” / Eds. G. C. Sih and C. L. Chow. – 1977. – 2. – P. 837 – 859.
15. *Ungsuwarungsri T. and Knauss W. G.* The role of delayed-softened material behavior in the fracture of composites and adhesives // Int. J. Fract. – 1987. – 35. – P. 221 – 241.
16. *Ungsuwarungsri T. and Knauss W. G.* A nonlinear analysis of equilibrium craze. Pt 1. Problem formulation and solution // J. Appl. Mech. – 1987. – 110. – P. 44 – 51.
17. *Науменко В. П.* Задачи Гриффитса и разрушение отрывом при растяжении и сжатии // Физ.-хим. механика материалов. – 1993. – № 4. – С. 75 – 86.
18. *Naumenko V. P.* A transferring law for prediction of the steady-state crack growth in thin-wall structures // Proc. Int. Conf. “Life Assessment and Management for Structural Components” (6–9 June 2000) / Ed. V. T. Troshchenko. – Kiev, 2000. – 1. – P. 287 – 298.
19. *Naumenko V. P., Volkov G. S., and Atkins A. G.* Initiation and propagation of ductile tearing: A search for biaxial fracture criterion // Proc. 6th. Int. Conf. on Biaxial /Multiaxial Fatigue and Fracture / Ed. Manuel Morlina de Freitas. – Lisbon (Portugal), 2001. – 2. – P. 975 – 982.
20. *Волков С. Д., Дубровина Г. И., Соковнин Ю. П.* О краевой задаче механики разрушения // Пробл. прочности. – 1978. – № 1. – С. 3 – 7.
21. *Волков С. Д.* Проблема прочности и механика разрушения // Там же. – № 7. – С. 3 – 10.
22. *Волков С. Д.* Функция сопротивления материалов и постановка краевых задач механики разрушения / АН СССР. УНЦ. – Препр. – Свердловск, 1986. – 66 с.
23. *Лебедев А. А., Марусий О. И., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В.* Исследование кинетики разрушения пластичных материалов на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочности. – 1981. – № 1. – С. 12 – 18.
24. *Марусий О. И., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В.* Влияние кристаллографической ориентации на разрушение монокристаллов сплава ЖС6Ф // Там же. – 1984. – № 5. – С. 86 – 90.
25. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Марусий О. И. и др.* Кинетика разрушения листового пластичного материала на заключительной стадии деформирования // Там же. – 1988. – № 12. – С. 18 – 25.
26. *Чаусов Н. Г., Евецкий Ю. Л., Лебедев А. А.* Кинетика разрушения пластичных материалов при неизотермическом нагружении // Там же. – 1989. – № 2. – С. 12 – 16.
27. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Марусий О. И. и др.* Кинетика разрушения листовой аустенитной стали на заключительной стадии деформирования // Там же. – № 3. – С. 16 – 21.

28. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Евецкий Ю. Л. Определение параметров поврежденности пластичных материалов на стадии разупрочнения // Там же. – № 9. – С. 14 – 18.
29. 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 // Там же. – 1991. – № 8. – С. 3 – 13.
30. 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. – С. 14 – 18.
31. Lebedev A. A. and Chausov N. G. Solution of fracture mechanics problems using complete stress–strain diagrams // Proc. 7th Eur. Conf. on Fracture. – Budapest (Hungary). – 1988. – 1. – P. 118 – 120.
32. 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 // Пробл. прочности. – 1993. – № 3. – С 3 – 9.
33. 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 КП60 и КП100 // Там же. – № 5. – С. 13 – 20.
34. Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Гетманчук А. В. Влияние напряженного состояния на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость корпусной стали 15Х2МФА в разных состояниях // Там же. – № 7. – С. 33 – 38.
35. 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.
36. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О. Влияние размера зерна на рост поврежденности металла при пластическом деформировании // Там же. – 1997. – № 3. – С. 23 – 30.
37. Lebedev A. A. and Chausov N. G. The influence of the deformation-induced damages in a material on its dissipative and acoustic properties // Proc. 6th Int. Symp. on Creep and Coupled Processes. – Bialystok (Poland) / Eds. A. Jakowluk and Z. Mroz. – 1998. – P. 307 – 312.
38. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богинич И. О., Недосека С. А. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31 – 40.
39. 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.

40. *Lebedev A. A., Chausov N. G., and Boginich I. O.* Kinetics of damage accumulation in a material at high strains // Proc. 12th Conf. on Fracture (ECF 12) "Fracture from Defects" / Eds. M. W. Brown, E. R. de los Rios, and K. J. Miller. – Sheffield (UK), 1998. – 2. – P. 913 – 918.
41. *Lebedev A. A., Chausov N. G., and Bogdanovich A. Z.* Model for Damage accumulation in a material under multiaxial loading // Proc. 6th Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture / Ed. Manuel Morlina de Freitas. – Lisbon (Portugal), 2001. – 2. – P. 1023 – 1029.
42. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Феноменологические основы оценки трещиностойкости материалов по параметрам спадающих участков диаграмм деформаций // Пробл. прочности. – 1983. – № 2. – С. 6 – 10.
43. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов. – Киев, 1988. – 43 с. – (Препр. / АН УССР. – Ин-т пробл. прочности).
44. *Lebedev A. A., Chausov N. G., Dragunov Yu. G., and Getmanchuk A. V.* The influence of type of stress on the fracture toughness vessel steels in different states // Advances in Fracture Resistance in Materials / Ed. V. V. Panasyuk. – New-Delhi, 1996. – 1. – P. 137 – 144.
45. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Прогнозирование трещиностойкости сталей в зависимости от условий эксплуатации конструкций на малогабаритных образцах // Пробл. прочности. – 1992. – № 11. – С. 29 – 33.
46. *Чаусов Н. Г.* Кинетика разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1992. – 32 с.
47. *Панасюк В. В., Ярема С. Я.* До джерел δ_k -моделі та моделі смуг пластичності // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – № 2. – С. 181 – 188.
48. *Панько І. М., Лебідь Н. М.* Деформаційна модель пружно-пластичного тіла з тріщиною // Машинознавство. – 1997. – № 2. – С. 17 – 21.
49. *Андрейків О. Є., Панько І. М.* Узагальнена модель пружно-пластичного тіла з тріщиною // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1995. – № 6. – С. 73 – 80.
50. *Панько І. М.* Тристадійна модель пружно-пластичного тіла з тріщиною // Там же. – 1998. – № 1. – С. 59 – 64.
51. *Албаут А. А.* Нелинейная фотоупругость в механике разрушения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1999. – 32 с.
52. *Внук М. П.* Модель когезионной зоны с учетом параметра трехосности // Физ. мезомеханика. – 2001. – 4, № 4. – С. 9 – 19.

Поступила 01. 02. 2002