

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Особенности разрушения пластичных листовых материалов

Н. Г. Чаусов, А. А. Лебедев

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

Показана эффективность использования метода полных диаграмм деформирования для оценки сопротивления листового материала развитию макротрещины в тонкостенных элементах конструкций и прогнозирования напряжений, соответствующих старту макротрещин различной длины в широких пластинах, по результатам испытаний малогабаритных образцов.

Ключевые слова: метод полных диаграмм деформирования, макротрещина, листовый материал, разрушение.

Анализ известных литературных данных, полученных при экспериментальном изучении кинетики разрушения пластичных листовых материалов с исходными дефектами типа трещин различной длины, показывает, что до настоящего времени среди исследователей нет единого мнения о достоверности существующих параметров, характеризующих сопротивление листового материала развитию макротрещины (раскрытие трещины δ_k , угол раскрытия трещины ψ_k , J -интеграл) [1–5]. Это приводит к ошибочности самой постановки задачи о прогнозировании напряжений, соответствующих старту макротрещин различной длины в широких пластинах, по результатам испытаний малогабаритных образцов с трещинами.

Известно, что ни одна из предложенных в рамках классической механики разрушения характеристик сопротивления пластичного листового материала развитию макротрещины не раскрывает физическую природу существенного различия сопротивления на разных стадиях ее роста. Это связано в основном с тем, что для физического обоснования надежных характеристик сопротивления традиционных экспериментальных методов механики разрушения оказалось недостаточно, необходимы дополнительные экспериментальные данные, полученные в контролируемых условиях температурно-силового нагружения с последующим металлографическим анализом.

Физические процессы, протекающие в материале при нагружении, отражены в полных диаграммах деформирования, причем их ниспадающие участки соответствуют отдельным стадиям разрушения материала [6–8], каждая из которых характеризуется автотельным ростом трещины по тому или иному микромеханизму разрушения. На полных диаграммах деформирования этим стадиям соответствуют линейные участки ниспадающих ветвей, наклоны которых адекватно отражают изменения микромеханизма роста вязкой трещины.

© Н. Г. ЧАУСОВ, А. А. ЛЕБЕДЕВ, 2003

ISSN 0556-171X. Проблемы прочности, 2003, № 4

На рис. 1 для примера представлен ниспадающий участок полной диаграммы деформирования листовой малоуглеродистой стали толщиной 1 мм, на рис. 2 – ниспадающий участок полной диаграммы деформирования листовой аустенитной стали.

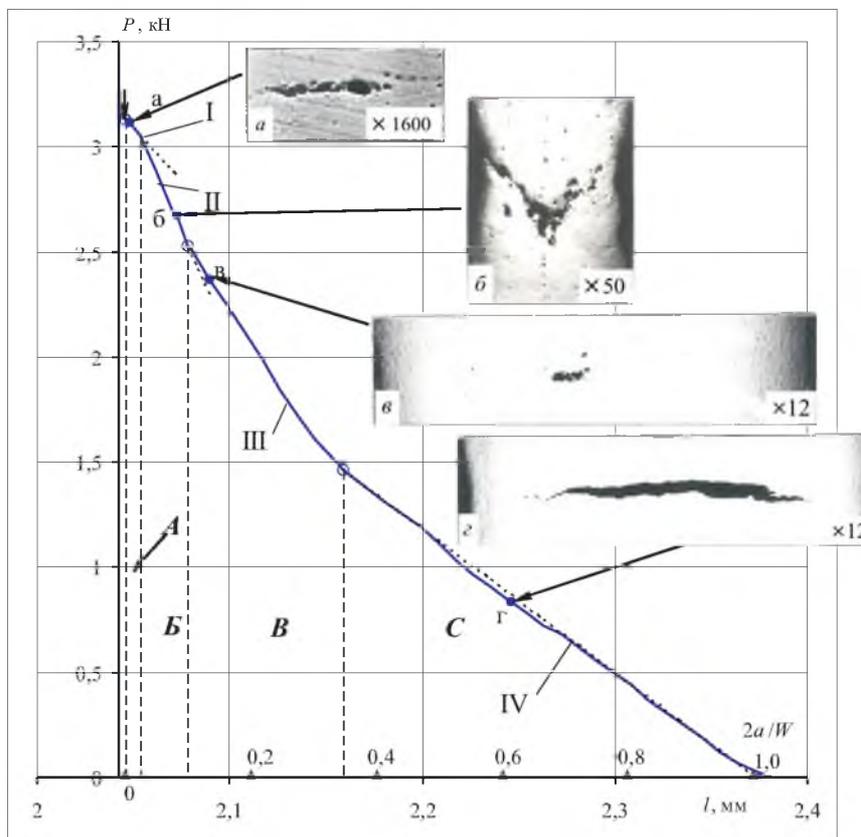


Рис. 1. Ниспадающий участок полной диаграммы деформирования листовой малоуглеродистой стали толщиной 1 мм: точки *a–г* соответствуют стадиям деформирования, на которых производили полные разгрузки образцов для дальнейших физических исследований; *A, B, B, C* – области относительных длин трещин, развивающихся по тем или иным микромеханизмам разрушения.

Поскольку макротрещина в листовом материале распространяется в двух ортогональных направлениях (по толщине и ширине листа), развитие зародившейся макротрещины в центральных по толщине листа зонах до ее предельного размера, соответствующего ширине испытуемого листового материала, протекает с различными энергетическими затратами, что хорошо иллюстрирует геометрия ниспадающих ветвей диаграммы деформирования данного материала (изломы на кривых, разные наклоны участков кривых). Выход фронта разрушения на основные грани по толщине листа (участок *II* на диаграммах) происходит по механизму “быстрого сдвига”, характеризующегося самой низкой сопротивляемостью материала развитию трещины по сравнению как с начальным участком роста отрывной макротрещины (*I*), так и с участками, связанными с переориентацией направления движения трещины (*III*) и ее дальнейшим продвижением по широкой стороне образца (*IV*).

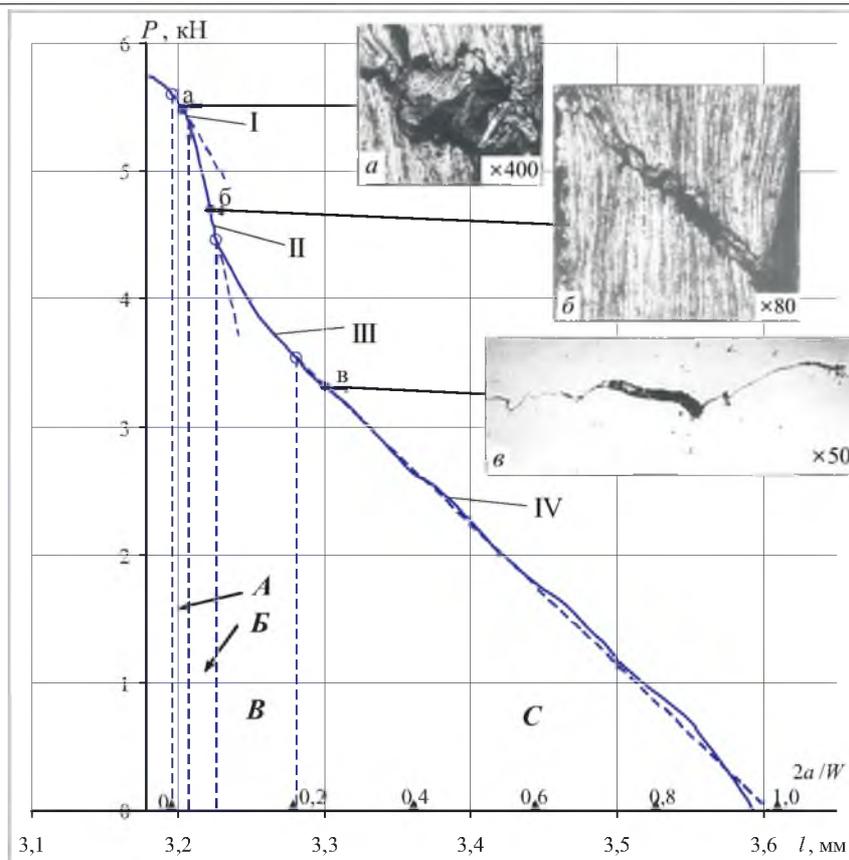


Рис. 2. Ниспадающий участок полной диаграммы деформирования листовой аустенитной стали толщиной 1 мм. (Обозначения те же, что и на рис. 1.)

Следовательно, при разрушении пластичного листового материала разные механизмы разрушения реализуются не только при выходе макротрещины на поверхность листа, но и при ее развитии по ширине последнего. В общем случае можно выделить четыре области относительных длин трещин, развивающихся по тем или иным микромеханизмам разрушения.

Область *A* связана с зарождением внутренней вязкой трещины в центре, область *B* – с выходом этой трещины на основные (широкие) грани, область *B* – с переориентацией направления движения фронта трещины от основных граней по толщине к основным граням по ширине листа, область *C* – с дальнейшим продвижением трещины по ширине листа (рис. 1, 2). Область *C* вряд ли представляет большой практический интерес, так как речь идет об относительно больших длинах трещин. Кроме того, при больших длинах трещин возникают краевые эффекты, которые существенно искажают физическую картину разрушения.

Преимущества рассматриваемого метода полных диаграмм деформирования перед существующими состоят в том, что он позволяет изучить процесс потери работоспособности тонколистовых конструкций из пластичных материалов из-за нарушения сплошности листа вследствие распространения вязких трещин малого размера в направлении его толщины. Разру-

шение в этом случае инициируется малыми, по сравнению с толщиной листа, внутренними дефектами, при этом визуализация формы и размера трещины, а также оценка напряженно-деформированного состояния материала в зоне роста последней затруднены до ее прорастания на поверхность, т.е. вплоть до момента выхода конструкции из строя вследствие нарушения ее сплошности.

Заметим, что в реальной конструкции образование сквозной по толщине листа макротрещины и ее дальнейший рост до критических размеров чаще всего протекают устойчиво [9, 10], т.е. деформирование материала в зоне локального разрушения происходит в условиях жесткого нагружения (равновесное деформирование).

Ранее показано [11], что при нагружении листового материала в условиях равновесного деформирования по изломам на ниспадающем участке полной диаграммы деформирования можно точно установить момент старта макротрещины, зародившейся на внутренних дефектах, и момент образования сквозной макротрещины. При этом обеспечивается возможность производить в любой момент разгрузку образца для определения упругих свойств материала в процессе разрушения. Это позволяет с учетом отнесенной площади поверхностей разрушения корректно определять удельные энергозатраты на создание сквозной по толщине образца макротрещины. Интересно отметить, что данный способ позволяет определять, в отличие от известных [12], реальные энергозатраты на образование сквозной макротрещины при сколь угодно малых толщинах материала. Таким образом, проблема “коротких” трещин значительно упрощается, так как с помощью метода полных диаграмм деформирования можно определять энергозатраты на рост трещины от момента зарождения в центре листа до выхода на основные грани по толщине листа и ее дальнейшее распространение по ширине листового материала.

Новый метод оценки трещиностойкости пластичных листовых материалов, основанный на использовании полных диаграмм деформирования, впервые позволил перейти от качественного анализа разрушения листового материала с энергетических позиций к количественным характеристикам сопротивления материала развитию трещины на разных стадиях ее роста.

Учитывая, что микромеханизмы образования и роста макротрещины в исследуемых материалах полностью коррелируют с наклонами линейных участков ниспадающей ветви диаграммы деформирования, к каждому из этих участков можно применить концепцию K_λ -критерия [13–15]:

$$K_\lambda^i \cong K_c^i = \sqrt{\frac{P_k^i \Delta l_p^i (F_0 / F_k^i) E}{F_k^i}}, \quad (1)$$

где F_0 , F_k^i – соответственно начальная площадь сечения стандартного образца и площадь сечения образца при росте макротрещины по различным микромеханизмам разрушения; P_k^i – нагрузка при развитии макротрещины по соответствующим микромеханизмам разрушения; E – модуль Юнга материала. Геометрический смысл параметра Δl_p^i иллюстрирует рис. 3.

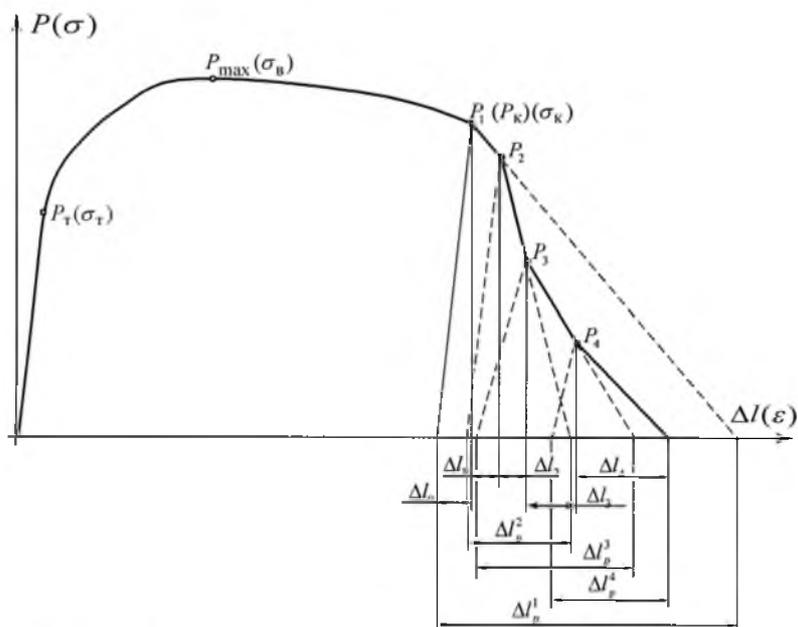


Рис. 3. Полная диаграмма деформирования пластичного листового материала.

Метод полных диаграмм деформирования имеет ряд преимуществ. Так, для корректного описания разрушения в рамках рассматриваемых подходов необходимо различать энергию диссипации, вызванную общей пластической деформацией материала, и энергию диссипации, связанную с заключительным процессом – разрушением. Метод полных диаграмм является, пожалуй, единственным, позволяющим это сделать практически.

Таким образом, в зависимости от стадии развития трещины в пластичном листовом материале можно получить четыре осредненные характеристики трещиностойкости K_{λ}^i , соответствующие тому или иному микромеханизму развития макротрещины. Минимальное значение параметра K_{λ} имеет место на участках II (рис. 1, 2), так как в этом случае разрушение материала происходит по наиболее энергетически выгодному механизму вязкого сдвига.

В качестве примера рассчитаем значения параметра $K_{\lambda} \cong K_c$ для различных микромеханизмов разрушения по результатам испытаний образцов из листовых сталей 08X18H10T и Ст. 3 толщиной 1 мм. Для участков I (рис. 1, 2), где происходит начальный рост макротрещины в условиях вязкого отрыва, параметр $K_{\lambda}^I \cong K_c^I$ для указанных сталей равен соответственно 431,65 и 194,48 МПа $\sqrt{м}$. Для участков II, характеризующихся наиболее низкой сопротивляемостью материала росту макротрещины, параметр $K_{\lambda}^{II} \cong K_c^{II}$ равен соответственно 139,39 и 92,6 МПа $\sqrt{м}$.

При точном воспроизведении условий нагружения увеличение ширины испытываемой пластины не должно влиять на последовательность стадийности разрушения при соблюдении, естественно, энергетического подобия объектов.

Следует обратить внимание на то, что при испытании широких пластин со сквозными инициаторами трещин большего по сравнению с толщиной листа размера развитие макротрещины может происходить только по микромеханизмам разрушения, соответствующим областям *B* и *C* (рис. 1, 2).

Ранее [16] для оценки сопротивления материала распространению макротрещины предложен параметр ε_F , представляющий собой удлинение образца за счет приращения макротрещины на единицу площади сечения:

$$\varepsilon_F = \Delta l_p / F_k, \quad (2)$$

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

Предполагается, что параметр ε_F является характеристикой свойств материала при заданном напряженном состоянии матрицы. Тогда очевидно, что в процессе развития макротрещины в листовом пластичном материале для каждой из четырех областей относительных длин трещин (на рис. 1, 2 области *A*, *B*, *B*, *C*) значения ε_F будут различными. Причем минимальные и максимальные значения ε_F для областей *B* и *C* могут отличаться в несколько раз, и эти соотношения для разных материалов разные.

Следовательно, заключительная стадия полной диаграммы деформирования может быть принята за базовую, по которой определяются напряжения, соответствующие той или иной относительной длине макротрещины, развивающейся по соответствующему микромеханизму разрушения (рис. 1, 2). Эта диаграмма может быть построена и для параметра ε_F .

В зависимости от наличия участка разупрочнения на полной диаграмме базовую диаграмму разрушения можно перестроить в координатах разрушающее напряжение $\sigma_b(\sigma_k)$ – относительная длина трещины $2a/W$. Тогда соответствующая диаграмма на рис. 4 фактически будет истинной диаграммой прочности листового материала с трещинами различной длины независимо от его ширины. В этом состоит преимущество данного метода перед фактически используемыми на практике диаграммами остаточной прочности пластин с трещинами, когда при расчете не учитываются подрастание трещины и пластичность материала [3], вследствие чего результаты испытаний в зависимости от ширины пластин получаются несопоставимыми.

В общем случае напряжения, соответствующие старту макротрещин различной относительной длины в листовых материалах, определяются по базовой диаграмме (рис. 4):

$$\sigma_{ст} = F(\sigma_b(\sigma_k), 2a/W). \quad (3)$$

Таким образом показано, как с использованием полных диаграмм деформирования листовых материалов можно определять характеристики сопротивления листового пластичного материала развитию макротрещины в нагружаемом элементе в любом направлении и прогнозировать напряжения, соответствующие старту макротрещин различной относительной длины в широких пластинах, по результатам испытаний малогабаритных образцов без исходных трещин.

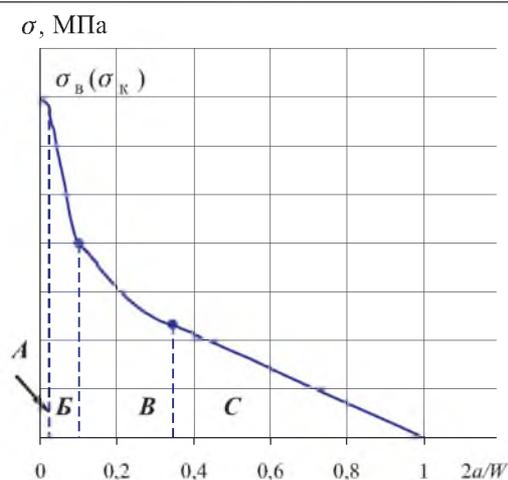


Рис. 4. Базовая диаграмма разрушения пластичного листового материала. (Обозначения те же, что и на рис. 1.)

Проанализируем известные экспериментальные диаграммы остаточной прочности пластин с трещинами. Один из таких экспериментов описан в работе [3]. Испытания проводились на самых больших из известных авторам панелях из алюминиевого сплава 2024-T3 размером $3988 \times 2100 \times 1,016$ мм, для фиксации подрастания трещины использовались видеосъемка, оптическая микроскопия, тензометрирование, компьютерная обработка данных в реальном масштабе времени.

Были испытаны три панели с инициаторами трещин в виде сквозных острых пропилов длиной $2a$, равной 203,2; 355,6 и 508 мм. Для устранения деформации образцов применялись специальные боковые накладки. При построении R -кривых экспериментально зафиксировано, что при начальной длине трещины $2a = 203,2$; 355,6 и 508 мм ее подрастание до момента нестабильного развития составило соответственно 78,8; 138,6 и 198,2 мм, при этом разрушающие напряжения достигли 184, 147 и 124 МПа [3], предел текучести $\sigma_{0,2} = 345$ МПа.

На рис. 5 по данным работы [3] построены диаграммы остаточной прочности испытанных пластин с инициаторами трещин в относительных по оси абсцисс координатах $2a/W$ (W – ширина пластины) как с учетом подрастания трещин, так и без учета. Как видно, при выбранных исходных длинах инициаторов трещин фактически была исследована область B базовой диаграммы разрушения (рис. 4), т.е. область, связанная с переориентацией развития макротрещины от основных граней по толщине листа к основным граням по его ширине.

Обратим внимание на то, что кривая 2 является более консервативной и расположена значительно ниже кривой 1. Кроме того, установлено, что величины относительных длин трещин в листовом алюминиевом сплаве 2024-T3, разделяющие области с различными микромеханизмами развития трещины, несущественно отличаются от соответствующих параметров в испытанных листовых материалах той же толщины из малоуглеродистой и аустенитной сталей.

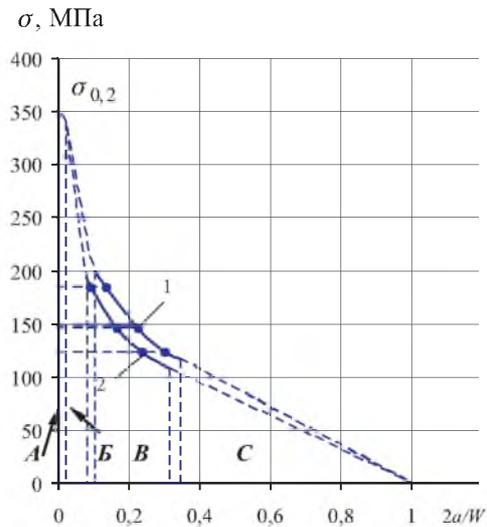


Рис. 5. Диаграммы остаточной прочности листа из алюминиевого сплава 2024-Т3 с учетом (1) и без учета (2) подрастания трещины. (Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.)

Резюме

Показано ефективність використання методу повних діаграм деформування для оцінки опору розвитку макротріщини в тонкостінних елементах конструкцій та прогнозування напружень, що відповідають старту макротріщин різної довжини в широких пластинах, за результатами випробувань малогабаритних зразків.

1. Newman J. C., Jr. and Dawicke D. S. Fracture analysis of stiffened panels under biaxial loading with widespread cracking // Agard Conf. Proc. 568, Widespread Fatigue Damage in Military Aircraft (Rotterdam, 10–11 May 1995). – 1995. – 3. – P. 1 – 16.
2. Donne C. D. and Doker H. Biaxial load effects on plane stress $J - \Delta a$ and $\delta_5 - \Delta a$ curves // 10th European Conf. on Fracture, Structural Integrity: Experiments – Models – Applications (Berlin, 20–23 Sept. 1994). – 1994. – II. – P. 891 – 900.
3. De Wit R., Fields R. J., Low S. R., et al. Fracture testing of large-scale thin-sheet aluminum alloy // Fatigue and Fracture Mechanics: 27th Volume, ASTM STP 1296. – P. 451 – 468.
4. Naumenko V. P. A transferring law for prediction of the steady-state crack growth in thin-wall structures // Life Assessment and Management for Structural Components: Proc. Conf. (Kiev, 6–9 June 2000). – Kiev, 2000. – 1. – P. 287 – 298.
5. Naumenko V. P., Kolednik O., O'Dowd N. P., and Volkov G. S. Effect of constraint on resistance to stable crack growth in thin aluminum plates // Life Assessment and Management for Structural Components: Proc. Conf. (Kiev, 6–9 June 2000). – Kiev, 2000. – 1. – P. 299 – 304.

6. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Марусий О. И. и др. Кинетика разрушения листового пластичного материала на заключительной стадии деформирования // Пробл. прочности. – 1988. – № 12. – С. 18 – 25.
7. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Марусий О. И. и др. Кинетика разрушения листовой аустенитной стали на заключительной стадии деформирования // Там же. – 1989. – № 3. – С. 16 – 21.
8. Чаусов Н. Г. О неустойчивости роста макротрещины в плоских образцах из пластичных материалов // Там же. – 1988. – № 6. – С. 15 – 18.
9. Балина В. С., Тихомиров С. А., Красаускас П. Т., Модекшас Г. Т. Критерии прочности при оценке циклической долговечности роторов // Теплоэнергетика. – 1985. – № 12. – С. 40 – 42.
10. Лебедев А. А. Влияние вида напряженного состояния и температуры на сопротивление разрушению алюминиевых сплавов // Пробл. прочности. – 1985. – № 6. – С. 62 – 66.
11. А. с. 1522893 СССР, МКИ⁴ G01 N 3/00. Способ определения сопротивления листового материала распространению трещины / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, Ю. Л. Евецкий // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 42. – С. 289.
12. Махутов Н. А., Москвичев В. В., Кокишаров И. И. и др. Определение характеристик трещиностойкости при комбинированном нагружении // Завод. лаб. – 1987. – № 11. – С. 62 – 67.
13. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Феноменологические основы оценки трещиностойкости материалов по параметрам спадающих участков диаграмм деформаций // Пробл. прочности. – 1983. – № 2. – С. 6 – 10.
14. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов – Киев, 1988. – 43 с. – (Препр./АН УССР. Ин-т пробл. прочности).
15. 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.
16. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В. Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситно-старяющей стали. Сообщ. 2. Оценка трещиностойкости стали // Там же. – 1991. – № 8. – С. 14 – 18.

Поступила 12. 10. 2002