

Несущая способность пластины с трещиной при двухосном растяжении

А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты экспериментального исследования возможности оценки несущей способности листовых материалов с центральной сквозной трещиной, подверженных действию двухосного растяжения и низких температур, по показателям вязкости разрушения, определенным при одноосном нагружении образцов.

Ключевые слова: несущая способность, вязкость разрушения, двухосное нагружение, коэффициент интенсивности напряжений, раскрытие трещины, листовые материалы.

Обозначения

- σ_{\max} – максимальное главное напряжение
 $\sigma_{0,2}$ – предел текучести
 $2l_0$ – длина трещины
 B – коэффициент двухосности
 σ_1 – главное напряжение, действующее перпендикулярно к линии трещины
 σ_2 – главное напряжение, действующее по направлению линии трещины
 $K_{\text{стр}}$ – коэффициент интенсивности напряжений при срагивании трещины
 $K_{c(y)}$ – коэффициент интенсивности напряжений начала нестабильного роста трещины
 σ_v – предел прочности
 E – модуль Юнга
 δ_c – критическое раскрытие в вершине трещины
 $\delta_{\text{пл}}$ – пластическая составляющая критического раскрытия трещины

Несущую способность листового материала, поврежденного трещиной, оценивают по критериям вязкости разрушения, в частности, коэффициентам интенсивности напряжений. Однако в связи с отсутствием достоверных математических моделей, позволяющих рассчитать эти коэффициенты при произвольной системе напряжений, расчеты выполняют, как правило, на основе соответствующих экспериментальных данных, для получения которых необходимо проводить испытания, требующие, особенно при низких и

высоких температурах, применения специализированного оборудования и дополнительных затрат. Большой практический интерес представляют исследования, которые направлены на разработку достоверных методов оценки несущей способности пластин, подверженных действию двухосного нагружения, по показателям вязкости разрушения, определенным при одноосном нагружении образцов.

В настоящей работе обсуждаются результаты испытаний при двухосном растяжении листовых алюминиевых сплавов АМгб и АМцС двух толщин 1,93 и 2,83 мм (типичные представители материалов, применяемых в криогенной технике), сохраняющих прочность и пластичность при низких температурах, и охрупчивающейся при низких температурах стали 10. Испытания проводились в диапазоне температур 30...293 К на комплексе [1], снабженном оптической системой [2] визуального наблюдения рабочей части крестообразного образца [3], конструктивные параметры которого обеспечивали, во-первых, устойчивый рост трещины до момента разрушения образца в зоне однородного напряженно-деформированного состояния, во-вторых, выполнение соотношения $\sigma_{\max} < 0,8\sigma_{0,2}$, ограничивающего, как известно [4], влияние локальной текучести на показатели вязкости разрушения пластины с центральной сквозной трещиной при ее растяжении. По всему полю рабочей части (диаметр 150 мм) образца наносилась сетка с квадратными ячейками, база которых составляла 1–4 мм, толщина линий – 0,05 мм, в центре рабочей части моделировалась прямолинейная сквозная трещина, ориентированная перпендикулярно к оси действия наибольшего главного напряжения, длиной $2l_0 = 18$ мм и радиусом у вершины 0,03 мм [5].

Крестообразные образцы подвергались ступенчатому статическому двухосному нагружению с коэффициентами двухосности в пределах $0 < B = \sigma_2 / \sigma_1 < 1$. Скорость деформирования составляла 0,2 мм/мин. На каждом этапе нагружения проводилась кинофотосъемка рабочей части образца. Анизотропия механических свойств исследуемых материалов согласно результатам испытаний на одноосное растяжение образцов, вырезанных из листа вдоль, поперек и под углом 45° к оси прокатки, по пределу прочности не превышала 5%.

В качестве критериев несущей способности материала, поврежденного трещиной, использовались показатели вязкости разрушения $K_{\text{стр}}$ и $K_{c(y)}$, характеризующие способность материала противостоять развитию трещины в реализуемых при испытаниях условиях нагружения [4]. Эти показатели рассчитываются по начальной длине трещины $2l_0$ и большему из действующих главных напряжений. Для определения $K_{\text{стр}}$ используется значение напряжения $\sigma_{\text{стр}}$, при котором образуется трещина от начального концентратора или происходит ее страгивание в процессе дальнейшего развития от уже образовавшейся трещины на данном этапе нагружения, а для определения $K_{c(y)}$ – значение напряжения σ_{\max} , соответствующего началу неустойчивого роста трещины.

Влияние двухосности нагружения и температуры на вязкость разрушения материала при ориентации трещины перпендикулярно к главному нормальному напряжению σ_1 иллюстрируется данными, приведенными на рис. 1. Видно, что на вязкость разрушения исследуемых материалов оказывает сильное влияние как вид напряженного состояния, так и температура. Заметим, что понижение температуры приводит к увеличению характеристик механических свойств сплавов АМгб и АМцС. Однако если для сплава АМгб понижение температуры от 293 до 77 К вызывает рост коэффициентов $K_{стр}$ и $K_{c(y)}$, то для сплава АМцС наблюдается их снижение.

При дальнейшем понижении температуры от 77 до 30 К рост $K_{стр}$ и $K_{c(y)}$ для сплава АМгб имеет место только при $B = 1$, тогда как для сплава АМцС указанные коэффициенты практически не изменяются в диапазоне $0 < B < 1$. С понижением температуры испытаний стали 10 изменяются как деформационные характеристики, так и механизм разрушения, причем вязкость разрушения резко падает.

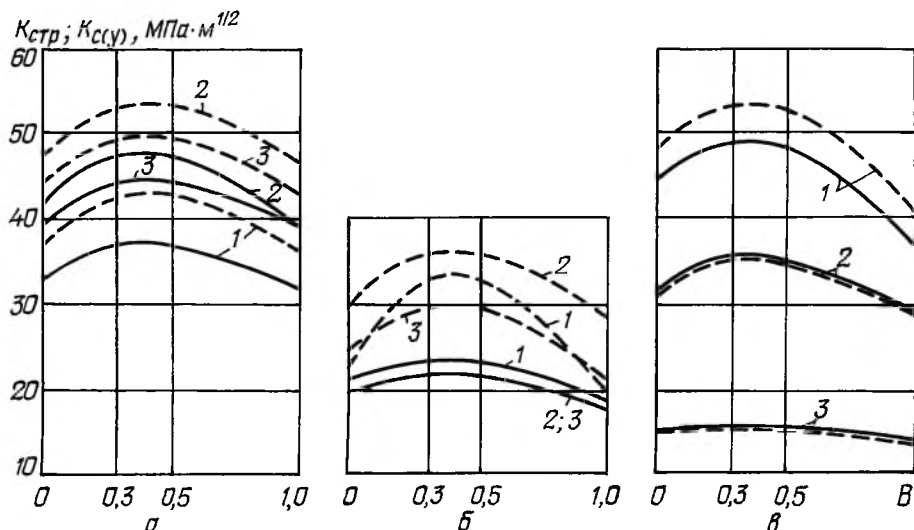


Рис. 1. Влияние вида напряженного состояния и температуры на показатели вязкости разрушения $K_{стр}$ (сплошные линии) и $K_{c(y)}$ (штриховые линии) сплавов АМгб (а), АМцС (б) и стали 10 (в): 1 – $T = 293$ К; 2 – $T = 77$ К; 3 – $T = 30$ К.

Различие между материалами по их свойствам нашло отражение в характере разрушения образцов. Так, рост трещины в сплаве АМцС, более пластичном из исследуемых материалов, как при комнатной, так и при низких температурах происходит по границам зерен путем разрушения металла по вязкому типу – срезом по плоскости сдвига с ориентацией плоскости разрушения по углом к фасадным плоскостям листа и сопровождается заметной остаточной пластической деформацией. Аналогично происходит продвижение трещины в образцах из сплава АМгб и стали 10 при комнатной температуре, однако при низких температурах (77 и 30 К) материалы разрушаются по типу нормального отрыва. Сталь 10 разрушается

хрупко, плоскость разрушения ориентируется перпендикулярно к фасадной плоскости листа и большему из главных напряжений. Разрушение образцов из стали 10 происходило без предварительного подрастания трещины и носило “осколочный” характер. При этом угол раскрытия трещины мал, пластическая деформация у вершины трещины почти отсутствовала, а излом имел характерный металлический блеск.

Таким образом, выбранные для исследований материалы позволили проанализировать несущую способность пластин при хрупком, квазихрупком и вязком разрушении. Если для алюминиевых сплавов АМгб и АМцС с понижением температуры сопротивление продвижению трещины возрастает, то для стали 10 оно снижается. Здесь уместно заметить, что сделанный в работе [6] вывод о том, что с увеличением толщины пластины вязкость разрушения материала снижается, нельзя признать однозначным без уточнения номенклатуры материалов пластин, диапазона их толщин и температуры. Так, приведенные выше экспериментальные данные для сплавов АМгб и АМцС показывают, что для тонких пластин увеличение толщины от 1,93 до 2,83 мм приводит к возрастанию вязкости разрушения в оценке $K_{стр}$ и $K_{c(y)}$ при $T = 293$ К, в то время как при $T = 77$ и 20 К – к ее уменьшению, причем в меньшей степени для более пластичного материала АМцС.

На рис. 2 представлены результаты измерений перемещений δ в устье трещины в пластинах из сплавов АМцС, АМгб и стали 10 в процессе нагружения при различных напряженных состояниях. Как видно, разрушение сплавов АМгб и АМцС происходит при значительном раскрытии трещины, особенно это выражено у более пластичного материала АМцС. У стали 10 раскрытие кромок при комнатной температуре примерно такое же, как и у сплава АМгб при $T = 77$ К, а при низких температурах составляет весьма малую величину (порядка 0,008–0,01 мм).

Показательна качественно одинаковая зависимость $K_{стр}$ и величины критического раскрытия трещины δ_c от вида напряженного состояния, которая следует из сопоставления рис. 1 и 3, а также величины зоны пластических деформаций в вершине трещины в оценке пластической составляющей критического раскрытия трещины $\delta_{пл}$, приведенной в работе [5]. В этой связи представляет интерес характер изменения пластической составляющей раскрытия трещины в зависимости от предела текучести материала. Анализ данных кинофотосъемки области вершины трещины показал, чем больше предел текучести $\sigma_{0,2}$ материала, тем выше нагрузка, при которой возникает макропластическая деформация, и тем с большим трудом развиваются пластические сдвиги, предшествующие страгиванию трещины. Можно предположить, что именно с этим связаны приведенные на рис. 4 данные: для всех исследуемых материалов увеличение $\sigma_{0,2}$ за счет снижения температуры приводит к резкому спаду пластической составляющей раскрытия трещины.

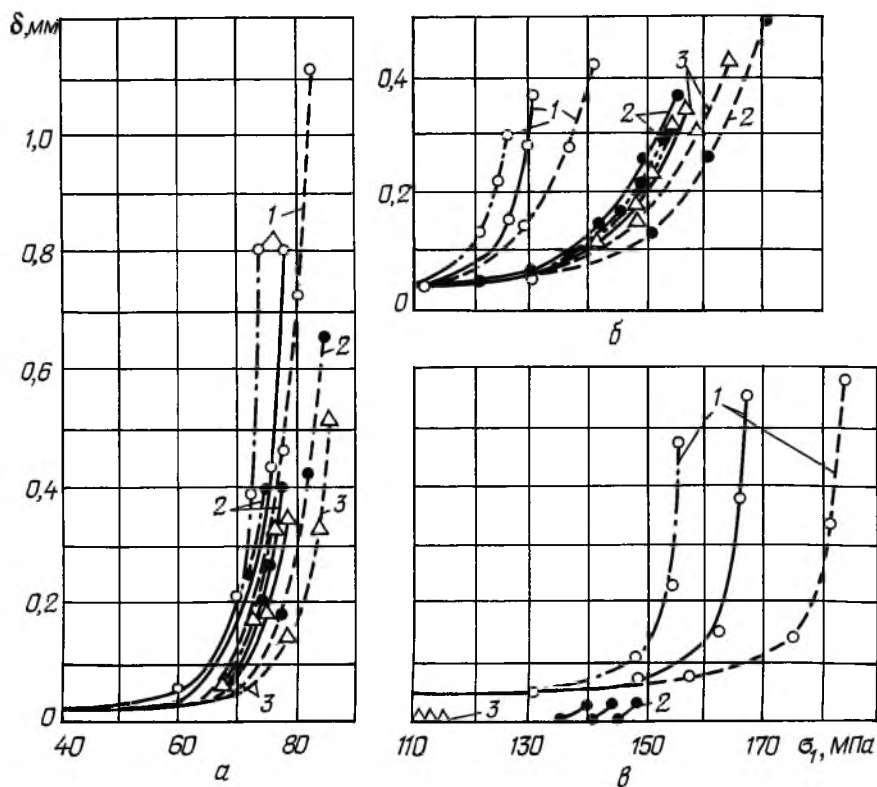


Рис. 2. Зависимость перемещений δ в устье трещины в пластине из сплавов АМцС (а), АМгб (б) и стали 10 (в) от двучности нагружения при различных температурах: сплошные линии – $B = \sigma_2 / \sigma_1 = 0$; штриховые – $B = 0,5$; штрихпунктирные – $B = 1,0$ (1–3 – то же, что на рис. 1).

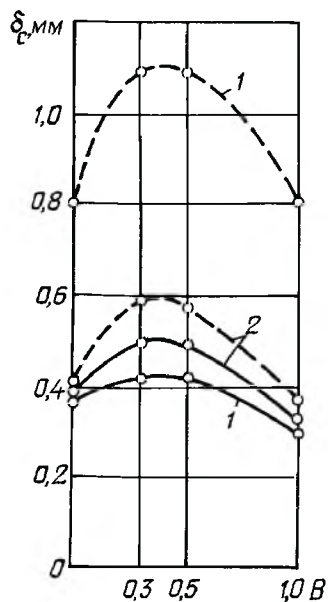


Рис. 3. Зависимость критического раскрытия трещины δ_c от двучности нагружения сплавов АМгб (сплошные линии) и АМцС (штриховые линии): 1, 2 – то же, что на рис. 1.

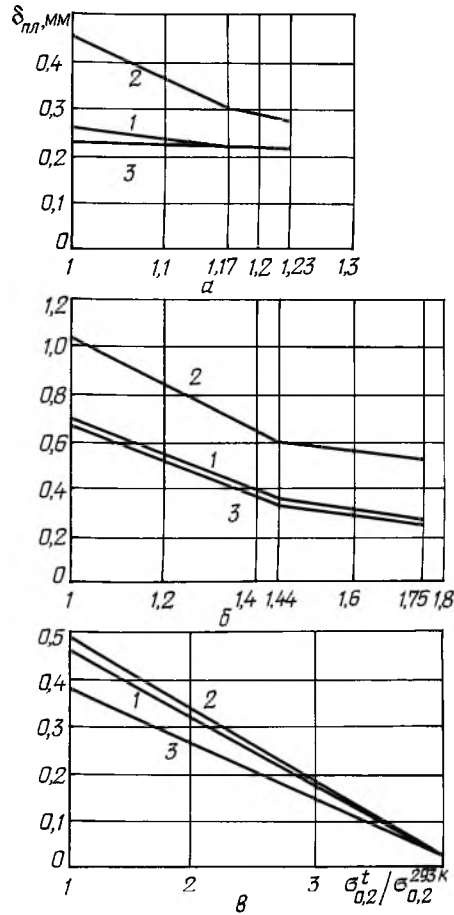


Рис. 4. Влияние предела текучести материала на величину пластической зоны в вершине трещины сплавов АМгб (а), АМцС (б) и стали 10 (в): 1 – $B = 0$; 2 – $B = 0,5$; 3 – $B = 1,0$.

Кинетика формирования и размеры пластических зон в вершине трещины, в свою очередь, существенно зависят от величины второй, действующей по направлению расположения трещины, компоненты σ_2 напряжений и температуры. В частности, примерное равенство $\delta_c^{B=0} = \delta_c^{B=1}$ и $K_{стр}^{B=0} = K_{стр}^{B=1}$ можно объяснить прежде всего незначительным различием пластических составляющих критического раскрытия в вершине трещины ($\delta_{пл}^{B=0} \approx \delta_{пл}^{B=1}$), а также практическим совпадением кривых деформирования сплавов АМгб и АМцС при одноосном и равномерном двухосном растяжении. Отмеченная близость расположения кривых деформирования при $B = 0$ и $B = 1$ свидетельствует также об отсутствии заметной анизотропии исследованных алюминиевых сплавов. Эти результаты позволяют сделать заключение о возможности на основании одноосных испытаний прогнозировать влияние трещиноподобного дефекта на величину предельной нагрузки реальной конструкции в зависимости от температуры и соотношения между главными напряжениями в диапазоне $0 < B < 1$.

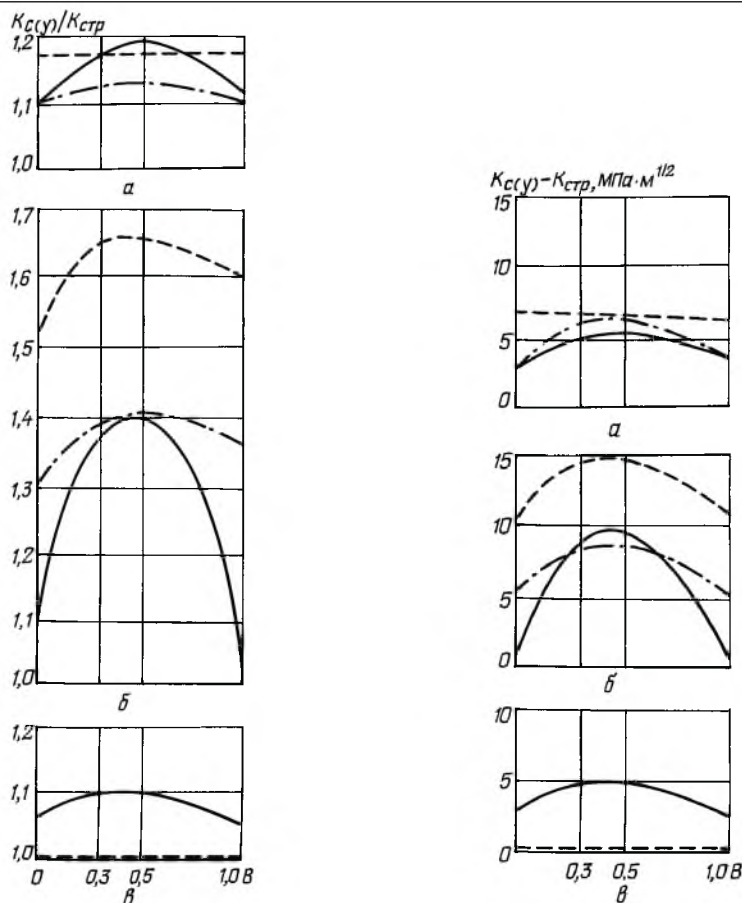


Рис. 5. Изменение показателя вязкости разрушения $K_{c(y)}/K_{стр}$ от вида напряженного состояния и температуры для сплавов АМг6 (а), АМцС (б) и стали 10 (в). (Здесь и на рис. 6: сплошные линии – $T = 293$ К; штриховые – $T = 77$ К; штрихпунктирные – $T = 30$ К.)

Рис. 6. Изменение показателя вязкости разрушения ($K_{c(y)} - K_{стр}$) от вида напряженного состояния и температуры для сплавов АМг6 (а), АМцС (б) и стали 10 (в).

Характеристики вязкости разрушения $K_{стр}$ и $K_{c(y)}$ в прямом виде при расчетах конструкций по критериям трещиностойкости не используются, хотя являются важными косвенными показателями надежности. С помощью характеристик $K_{стр}$ и $K_{c(y)}$ можно провести более полную оценку несущей способности листовых материалов, используя в качестве показателя надежности соотношение $K_{c(y)}/K_{стр}$ или $K_{c(y)} - K_{стр}$. Такие зависимости представлены на рис. 5 и 6. Ориентируясь на эти зависимости и на абсолютные значения $K_{стр}$ и $K_{c(y)}$, можно более правильно сделать выбор материала для заданных условий эксплуатации. Здесь уместно отметить установленную при испытаниях характерную особенность листовых пластичных материалов, проявляющуюся при двухосном растяжении как при комнатной, так и при низких температурах: рост трещины при продвижении

через пластическую зону, формирующуюся в области ее вершины в условиях непрерывного роста σ_1 и σ_2 , сопровождается неоднократными остановками. Подобный эффект выявлен, в частности, при анализе аварий сварных конструкций [7], когда даже хрупкие трещины, возникшие в сварном шве, в большинстве случаев останавливаются, “вязнут”, пройдя несколько десятков миллиметров в зоне пластичного материала.

Представленные выше результаты о росте трещины в условиях двухосного растяжения являются дополнительным доказательством возможности использования критериев $K_{стр}$ и $K_{c(y)}$, определенных по данным сравнительно простых испытаний при одноосном растяжении, для проектирования конструкций, подверженных действию двухосного нагружения.

Резюме

Наведено результати експериментального дослідження можливості оцінки несучої здатності листових матеріалів із центральною наскрізною тріщиною, які піддано дії двовісного розтягу та низьких температур, за показниками в'язкості руйнування, визначеними при одновісних випробуваннях.

1. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Евецкий Ю. Л. Испытательный комплекс для исследования прочности тонколистовых материалов при двухосном растяжении в диапазоне температур 20–300 К // Пробл. прочности. – 1985. – № 1. – С. 109 – 112.
2. Музыка Н. Р., Марасин Б. В., Лебедев А. А. Оптическая система измерения деформаций плоского образца в криокамере // Там же. – 1984. – № 5. – С. 113 – 115.
3. Лебедев А. А., Музыка Н. Р. Конструкции крестообразных образцов для испытаний на трещиностойкость при двухосном растяжении (обзор) // Там же. – 1998. – № 3. – С. 5 – 21.
4. Кишкина С. И. Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 230 с.
5. Музыка Н. Р. Развитие сквозной трещины в листовом материале при двухосном растяжении // Пробл. прочности. – 1998. – № 4. – С. 52 – 59.
6. Кудрявцев В. Г., Смоленцев В. И. Вязкость разрушения алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 293 с.
7. Поповский Б. В., Розенштейн И. М. Аварии резервуаров, вызванные хрупким разрушением, и анализ их причин // Проблемы хладостойкости конструкционных сталей. Материалы конференции. – Иркутск: 1971.

Поступила 27. 03. 2000