



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ТОНКОЛИСТОВЫХ (ОБШИВОЧНЫХ) МАТЕРИАЛАХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦОВ

В.П. НАУМЕНКО, Н.К. КУЧЕР, Р.В. КРАВЧУК, Е.Л. ДАНИЛЬЧУК, Р.П. ПРИХОДЬКО

Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ. 01014, Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: info@ipp.kiev.ua

Исследовано влияние размеров пластины с центральным отверстием на развитие трещин в тонколистовых материалах. Обоснован выбор оптимальной конфигурации и размеров образца, а также приемлемого диапазона скоростей нагружения для получения упорядоченных и достаточно протяженных участков скачкообразных продвижений трещины. Определены характерные состояния трещины, которая зарождается и развивается при неизменном микромеханизме образования свободных поверхностей в условиях общей текучести. Разработана методика определения угла раскрытия вершины трещины на стадии равновесного разрушения листовых металлов, а также взаимосогласованного определения деформационной и энергетической характеристик трещиностойкости в условиях общей текучести. Конкретизирована объединенная диаграмма разрушения, устанавливающая связи между параметрами непрерывного и прерывистого роста трещины. Библиогр. 17, табл. 1, рис. 14.

Ключевые слова: листовые металлы, стесненность деформаций, прерывистое разрушение, равновесный рост трещины, профиль трещины, характерные состояния трещины

Оценка трещиностойкости листовых материалов, например алюминиевого сплава Д16АТ, с помощью традиционных теоретических моделей и критериев классической механики разрушения невозможна из-за неприемлемых требований к размерам стандартных образцов. Кроме того, упомянутые методы неприменимы к определению характеристик сопротивления листовых металлов распространению сквозных трещин, имеющих относительно большую протяженность, в условиях так называемой низкой стесненности деформаций, и с учетом особенности разрушения листовых металлических материалов по моде I+III. По мере развития традиционных подходов механики разрушения предпринимались попытки создания новых критериев разрушения твердых тел, такие как скорость диссипации энергии R , неотъемлемая работа разрушения w_e , угол раскрытия вершины трещины.

Ключевым элементом любого метода инженерной оценки разрушения является наличие достаточно полного набора данных о стандартных характеристиках прочности, пластичности и трещиностойкости материала рассматриваемой конструкции. В этот набор данных должны быть включены только те характеристики материала, которые были определены с помощью наиболее совершенных методов испытаний. Применительно к оценке трещиностойкости листовых металлов таковыми являются методы ASTM E2472–06 [1] и ISO 22889:2007 [2], базирующиеся на ис-

пользовании критического угла ψ_c раскрытия вершины трещины СТОА– ψ . Однако при изучении и использовании упомянутых стандартов было установлено, что их отдельные положения являются неоднозначными, спорными и в некоторых случаях даже ошибочными. Изложенное позволяет утверждать, что разработка нового подхода к определению характеристик трещиностойкости листовых металлов является актуальной задачей механики упругопластического разрушения.

При экспериментальных исследованиях разрушения листовых металлов уже многие десятилетия широко используется образец М(Т) с проблемной областью ABCD (рис. 1, а), удовлетворяющей размерному требованию ($2H_0 \geq 3W_0$). Стереотип приоритетности испытаний образца М(Т) свойственен практически всем национальным и международным стандартам, предназначенным для определения характеристики K_c листовых металлов. Более того, разработчики новейших нормативных документов [1, 2] считают конфигурацию образца М(Т) предпочтительной, т.е. одной из наиболее подходящих для определения критической величины ψ_c угла СТОА– ψ раскрытия вершины растущей трещины. На наш взгляд, более подходящим образцом является прямоугольная пластина, в центре которой содержится малое несовершенство. Представление о малых структурных, физических и геометрических несовершенствах обычно используют в исследованиях, посвященных построению так называемых



мых предельных диаграмм формоизменения листовых металлов. Как показано в работах [3–11], для таких целей наиболее подходящим является геометрическое несовершенство в виде сквозного кругового отверстия (рис. 1, б, в). Конфигурация образца MR(T) позволяет: 1) реализовать процесс упорядоченной прерывистости роста трещины; 2) свести к пренебрежимо низкому уровню эффекты потери устойчивости и скорости роста трещины в исследованиях разрушения листовых металлов; 3) изменять уровень стесненности деформаций путем изменения соотношения размеров $2H_0$ и $2W_0$; 4) обеспечить неизменность микромеханизмов разрушения с момента зарождения естественной трещины и до разделения образца на части; 5) однозначно идентифицировать момент зарождения трещины простым и универсальным способом.

В рамках программы экспериментальных исследований были испытаны серии образцов в широком диапазоне размеров, указанных в таблице.

Методика цифровой фото- и видеосъемки профиля трещины. Для регистрации длины трещины $2c$ в процессе нагружения были разработаны и использованы следующие методы и средства:

– цифровая фотосъемка поверхности образца цифровой фотокамерой Canon Power Shot G7 с разрешением 3648×2736 pix;

– цифровая видеосъемка поверхности образца цифровой фотокамерой Canon Power Shot G7 с разрешением 1024×768 pix, частота съемки ≈ 15 кадров/с;

– цифровая микровидеосъемка окрестности вершины трещины с использованием микроскопа KONUS Crystal Pro 5424, оснащенного цифровой CMOS-видеокамерой Levenhuk C800 NG, обеспечивающей фото- и видеосъемку с разрешением 3264×2448 pix, частота съемки $\approx 1,9$ кадров/с.

При использовании фото- и видеотехники возникали определенные трудности при подключении их к испытательным установкам [12, 13]. В частности, при фотографировании окрестности вершины движущейся трещины необходимо обеспечить взаимную привязку (синхронизацию) между номерами фотоснимков и записями параметров нагружения образца в файле эксперимента. Для этого необходимо на основе какого-либо внешнего физического процесса создать цифровой или аналоговый сигнал, связанный с процедурой фотографирования и доступный для реги-

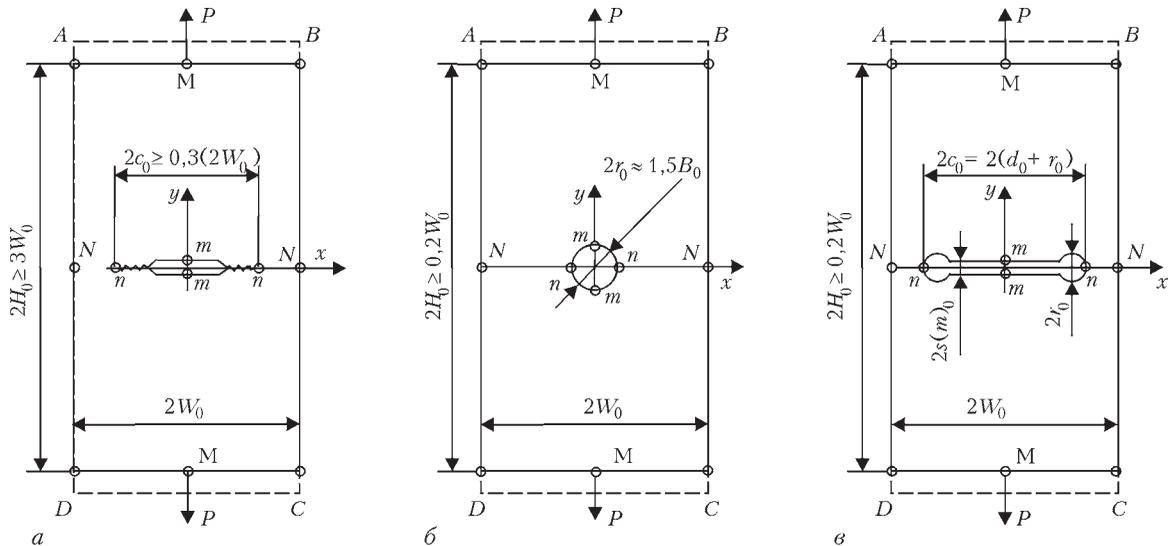


Рис. 1. Образцы из тонколистовых металлических материалов: а–в – соответственно образцы M(T), MR(T), MDR(T)

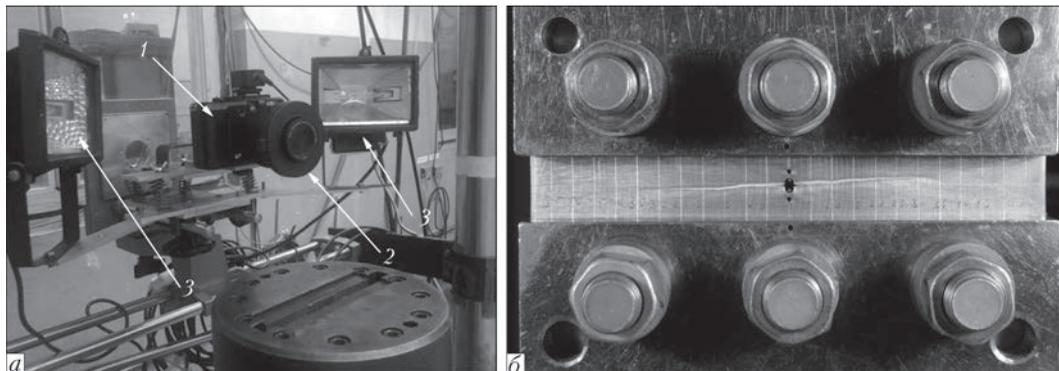


Рис. 2. Оборудование для цифровой фото- или видеосъемки (а) (1 – цифровая фотокамера Canon Power Shot G7; 2 – макрообъектив Raynox CM-3500 с адаптером Canon LA-DC58H; 3 – трехгалогеновые светильники) и фотоснимок образца шириной $2W_0 = 120$ мм и высотой $2H_0 = 12$ мм с трещиной $2c_i = 68$ мм, полученный с помощью фотокамеры Canon Power Shot G7 (б)



Размеры проблемной области образцов из сплава Д16АТ

Обозначения образцов*	$2W_0$, мм	$2H_0$, мм	$2r_0$, мм	$2d_0$, мм	$2s(m)_0$, мм	$2c_0$, мм
Крупногабаритные образцы						
MR(T)–0.5–10.0	1200	600	2	0	2	2
MDR(T)–0.5–10.0	1200	600	2	10	0.12	12
MDR(T)–0.5–10.0	1200	600	2	20	0.12	22
MDR(T)–0.5–10.0	1200	600	2	38	0.12	40
MDR(T)–0.5–10.0	1200	600	2	58	0.12	60
Образцы стандартной ширины ($2W^* = 120$ мм)						
MR(T)–5.0–1.0	120	600	2	0	2	2
MR(T)–1.5–1.0	120	180	2	0	2	2
MR(T)–1.0–1.0	120	120	2	0	2	2
MDR(T)–1.0–1.0	120	120	2	3	0,12	5
MDR(T)–1.0–1.0	120	120	2	8	0,12	10
MDR(T)–1.0–1.0	120	120	2	18	0,12	20
MDR(T)–1.0–1.0	120	120	2	38	0,12	40
MR(T)–0.5–1.0	120	60	2	0	2	2
MR(T)–0.1–1.0	120	12	2	0	2	2
Малогобаритные образцы						
MR(T)–7.3–0.1	12	87	2	0	2	2
MR(T)–1.0–0.1	12	12	2	0	2	2
MR(T)–0.5–0.1	12	6	2	0	2	2
MR(T)–0.17–0.1	12	2	2	0	2	2

В обозначении образцов первая цифра определяет форму его проблемной области (H_0/W_0), вторая – показатель размера образца (W_0/W^), где W^* – ширина стандартного образца. Для листового проката сплава Д16АТ толщиной $B_0 = 1,4 \dots 1,5$ мм принято $2W^* = 120$ мм

страции и последующей оцифровки средствами контроллера испытательной машины. В качестве такого физического процесса можно использовать командный сигнал включения фотовспышки, подаваемый с фотокамеры на адаптер центрального синхроконтakta при нажатии кнопки управления затвором (кнопка «пуск»). Также при отсутствии аппаратной связи видеокамеры с испытательной машиной возникают трудности установления значений параметров нагружения образца в моменты фиксации видеокладов профиля трещины. Для решения задачи взаимного согласования процессов нагружения и видеосъемки использовался в качестве связующего элемента момент исчезновения светового пятна от лазерной указки, управляемой цифровым выходом Digital Output контроллера.

Материалы экспериментальных исследований. Прерывистое разрушение. В испытаниях образцов из листовых материалов часто наблюдается скачкообразный рост сквозных трещин. Исходя из численности конкурирующих моделей прерывистого разрушения, на данный момент отсутствует приемлемая теория для описания упомянутого физического явления. Поэтому в рамках работы были проведены систематические экспериментальные исследования скачкообразного развития сквозных трещин в одном из типовых модельных материалов механики упругопластического разрушения.

Скачкообразный рост и характерные состояния трещины. Упругопластическое разрушение тела с трещиной в общем случае можно предста-

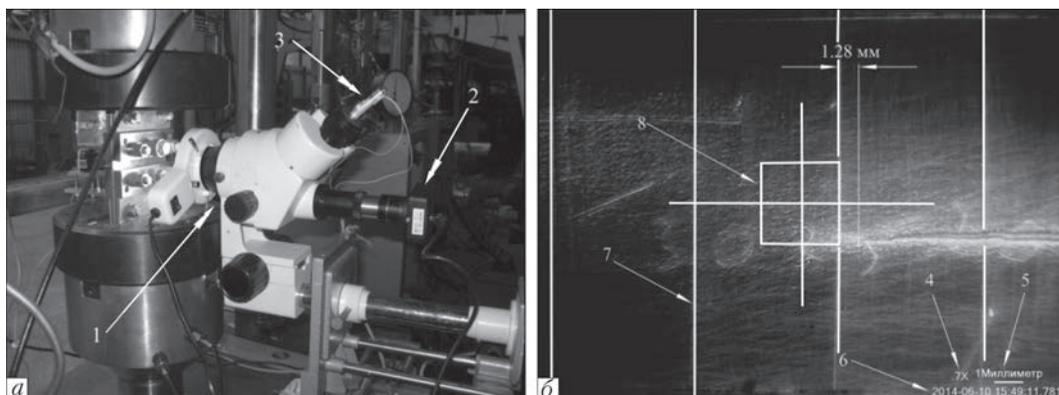


Рис. 3. Оборудование для цифровой микровидеосъемки (а) (1 – микроскоп KONUS Crystal Pro 5424; 2 – камера Levenhuk C800 NG (2); 3 – устройство LaserMarker); видеоклад (б) и фрагмент видеоклада (внизу справа) окрестности вершины трещины; (4 – увеличение микроскопа; 5 – калибровочная линейка, б – показания текущего времени; 7 – маркерная линия на поверхности образца; 8 – центральный маркер)

вить как явление чередования двух взаимосвязанных процессов, а именно, прерывистого удлинения трещины и прерывистого расширения ее полости. Отказ от повсеместного использования гипотезы о непрерывности процесса разрушения обусловлен стремлением разработать инженерную методику согласованного определения локальных параметров концевой области трещины, относящихся к процессу разрушения, и глобальных параметров, характеризующих процесс пластического деформирования материала испытываемого образца. Прежде всего необходимо было выбрать такую конфигурацию и размеры образца с начальным концентратором напряжений, которые бы позволили получить экспериментальные диаграммы с достаточно протяженным участком скачкообразного роста трещины.

Для решения этой задачи были проведены сравнительные исследования разрушения образцов (см. рис. 1), имеющих одинаковую ширину $2W_0$ и разные геометрические параметры начального выреза. Оказалось, что перспективной аль-

тернативной образцу М(Т) является образец MR(Т) с эталонным уровнем стесненности деформаций. Конфигурация этого образца позволяет: 1) реализовать процесс упорядоченной прерывистости роста трещины; 2) свести к пренебрежимо низкому уровню эффекты потери устойчивости и скорости роста трещины в исследованиях разрушения листовых металлов; 3) изменять уровень стесненности деформаций путем изменения соотношения размеров $2H_0$ и $2W_0$; 4) обеспечить неизменность микромеханизмов разрушения с момента зарождения естественной трещины и до разделения образца на части; 5) однозначно идентифицировать момент зарождения трещины простым и универсальным способом.

На диаграмме испытаний стандартного образца MR(Т) точка s_0 соответствует моменту образования полностью развитых наклонных полос пластичности, который совпадает с моментом старта трещины (рис. 4, а). Представляет интерес факт наличия и подобия скачков на восходящих и нисходящих ветвях диаграмм деформирования рас-

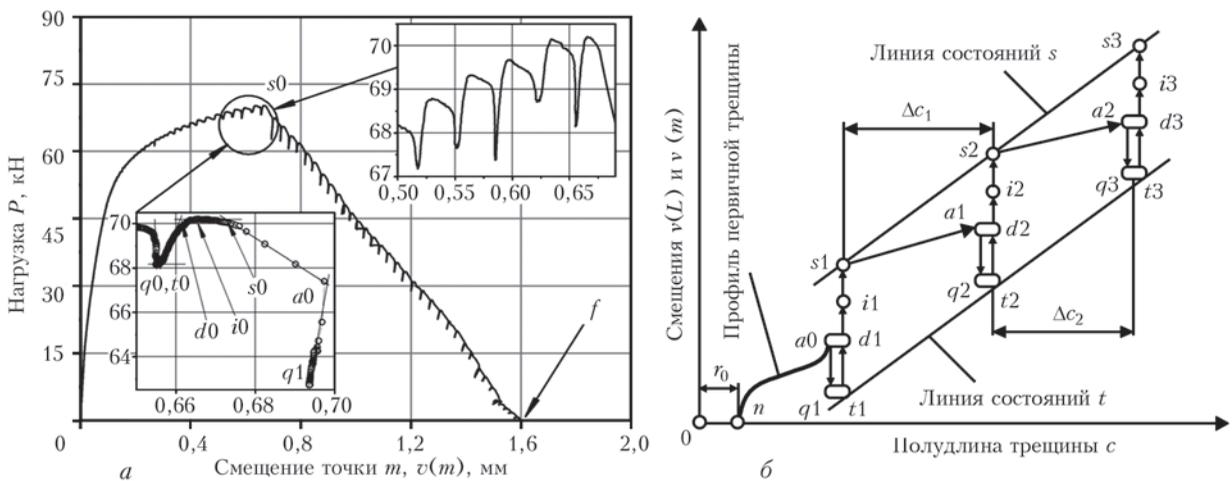


Рис. 4. Диаграмма испытаний стандартного образца MR(Т) с размерами $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и идеализированная траектория скачкообразных изменений координат вершины начальной трещины при фиксированном положении крайней точки n на ее профилях: схематически показаны первые три цикла самопроизвольной остановки трещины (точки a), закрытия ее берегов (a - q), постоянства геометрии трещины (q - t), раскрытия (t - s) и роста (s - a) трещины (б)

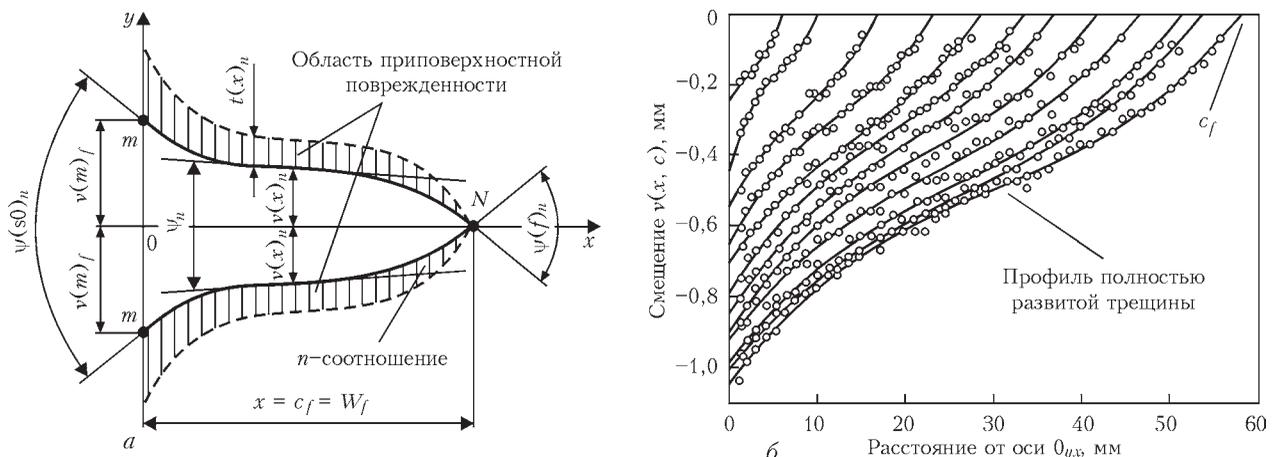


Рис. 5. Правая половина профиля полностью развитой трещины (а) и экспериментально установленные очертания трещины, растущей в образце MR(Т) шириной $2W_0 = 120$ мм, высотой $2H_0 = 120$ мм и $2r_0 = 2$ мм (б)



смагриваемого образца. По мере увеличения смещений $\Delta v(m)$, $\Delta v(M)$, $\Delta v(L)$ самопроизвольные падения нагрузки ΔP становятся сопоставимыми с таковыми на стадии прерывистого разрушения. Можно сделать вывод, что в условиях общей текучести макроскопические поля напряжений и деформаций определяют процесс накопления повреждений как на стадии зарождения трещины, так и в процессе ее роста.

Упорядоченные участки нарастания и падения нагрузки на нисходящей ветви диаграммы отражают циклические изменения геометрии полости отверстия и двух трещин, выходящих на его контур. Каждый цикл состоит из шести стадий (рис. 4): ($q-t$) – временной интервал неизменности очертаний указанной полости; ($t-d$) – увеличение поперечных размеров полости вследствие накопления локализованных пластических деформаций; ($d-i$) – скачкообразное продвижение полос пластичности внутри зон локализованных деформаций; ($i-s$) – формирование предельно ослабленных поверхностей, т.е. полностью развитых зон процесса разрушения; ($s-a$) – снятие сил когезионного сцепления между поверхностями зон процесса разрушения, отождествляемое с образова-

нием трещин; ($a-q$) – закрытие полости отверстия и трещин вследствие самопроизвольной разгрузки образца.

Ссылочный профиль центральной трещины. Таковым предложено считать правую (нижнюю) ветвь профиля полностью развитой трещины (рис. 5, а). В ее очертаниях как бы запечатлены все сведения о процессах, происходящих внутри концевой области растущей трещины. Мы полагаем, что между остаточными деформациями в приповерхностных слоях материала (рис. 5, а), охватывающих тот или иной участок траектории роста сквозной трещины в листовом металле, и параметрами ее профиля на этом участке должны существовать устойчивые корреляционные связи.

Протяженность приростов трещины контролируется остаточными пластическими деформациями в областях приповерхностной поврежденности (рис. 5, а). Точки f (рис. 4) обозначают момент пересечения кончиками растущей трещины вертикальных границ образца в точках N (см. рис. 1). Кривую $v(n)$ будем называть ссылкой профилем трещины или n -соотношением (рис. 5, б). Если депланационные смещения $w(x, y)$, направленные перпендикулярно к срединной плоско-

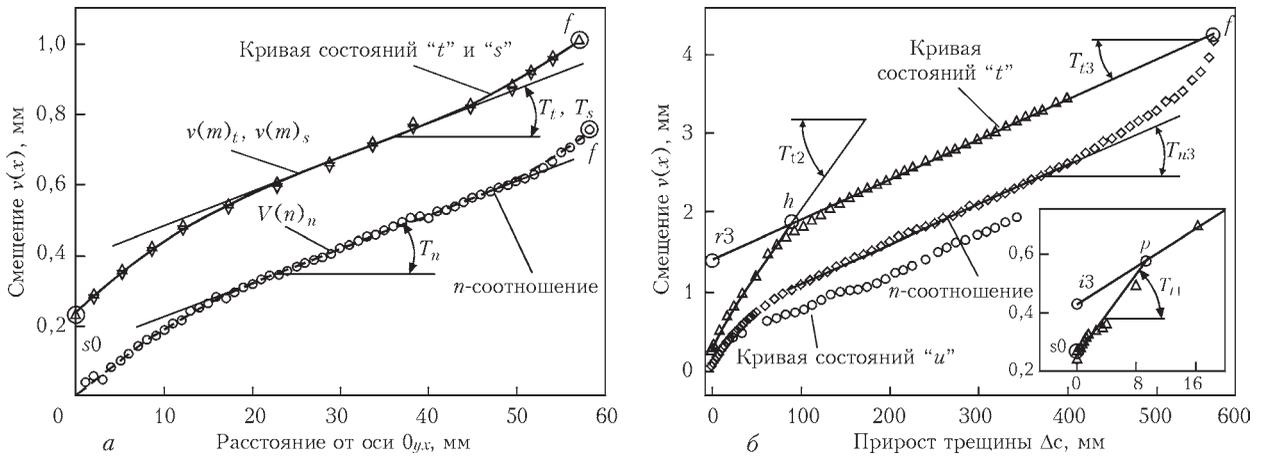


Рис. 6. Кривые непрерывного (виртуального) роста трещины в образце MR(T) размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и в образце MDR(T) размером $2W_0 = 1200$ мм, $2H_0 = 600$ мм, $2d_0 = 58$ мм и $2r_0 = 2$ мм (б)

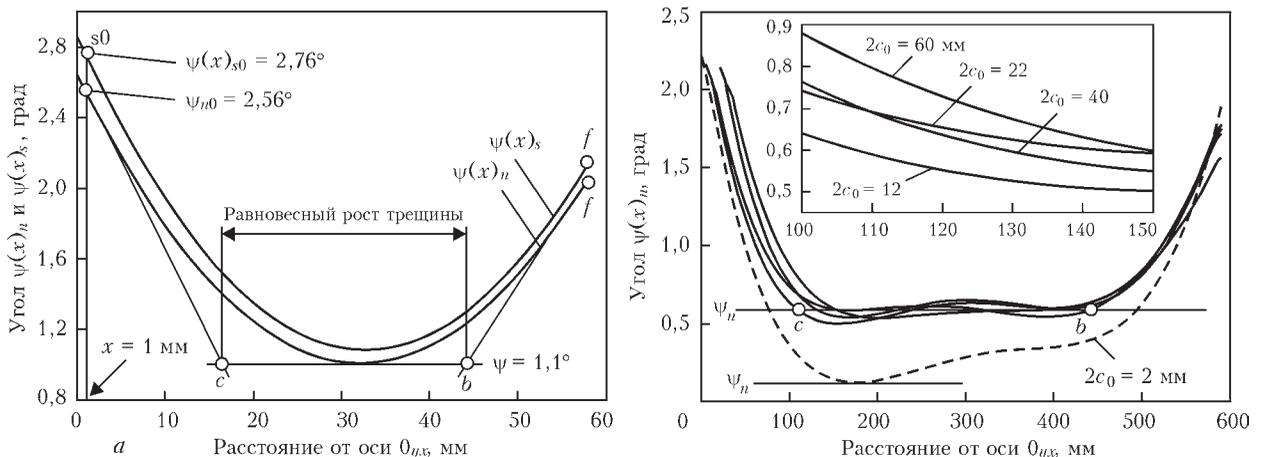


Рис. 7. Полиномиальная аппроксимация n -соотношений для образца MR(T) с проблемной областью размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и для образца MDR(T) с размерами $2W_0 = 1200$ мм, $2H_0 = 600$ мм, $2r_0 = 2$ мм (б)



сти тонкой пластины (x_0y на рис. 1), пренебрежимо малы, то геометрию полости трещины можно определить достаточно просто и точно по ее профилю на лицевых поверхностях образца. Для построения профиля трещины мы используем расстояния $2v(x)$ между ответными точками на берегах реальной трещины. Расстояния $2v(x)$ для левой и правой ветвей трещины измеряли отдельно микроскопом на одной или на обеих поверхностях пластины. Усредняя результаты измерений, мы преобразуем профиль реальной трещины в эквивалентный профиль идеализированной трещины.

Идеализированный профиль полностью развитой трещины (рис. 5, а) состоит из четырех геометрически подобных кривых $v(x)$, расположенных симметрично относительно осей $0x$ и $0y$. Он эквивалентен реальному профилю в смысле равенства максимальных размеров $2c_f$ и $2v(m)_f$ полости трещины. Каждому из шести периодически повторяющихся событий скачкообразного роста трещины (рис. 4) соответствуют свои очертания $v(x)$ ее профиля. Линии, соединяющие точки одинаковых событий (линии s и t на рис. 4, б), обозначают виртуальный (непрерывный) рост трещины.

Равновесный рост трещины. Предполагаемая трактовка понятия равновесный рост трещины на основе анализа очертаний ссылочного профиля трещины, качественно отличается от наиболее распространенной точки зрения [14]. Типичные профили полностью развитых трещин, сформировавшихся при разных уровнях глобальной стесненности деформаций, показаны на рис. 6. Под термином равновесное разрушение будем понимать непрерывный (виртуальный) процесс образования свободных поверхностей, в ходе которого угол раскрытия берегов полностью развитой трещины не изменяется (углы $\psi_n = 2T_n$ и $2T_{n3}$ на рис. 6).

Полиномы, аппроксимирующие n -соотношения, т.е. зависимость смещений $v(x)_n$ от прироста трещины $\Delta c = (x - c_0)$, про дифференцированы по переменной x . В результате определены значения

угла $\psi(x)_n$ раскрытия вершин трещины в каждой точке ее траектории на изломе образцов (рис. 7). Полученную таким образом кривую $\psi(x)_n$ можно упрощенно представить тремя прямыми отрезками. Точки ($s0$, c , b и f) пересечения этих касательных к кривой $\psi(x)_n$ друг с другом и с координатными осями определяют характерные величины углов $\psi(s0)_n$, ψ_n и $\psi(f)_n$ (см. рис. 4).

Критическим событием считается момент условного начала стадии равновесного разрушения (точки c на рис. 7). На участке $c_c \leq c \leq c_b$ выполняется приближенное равенство $\psi(x)_n \approx \psi_n$. Величина ψ_n , будучи базисной характеристикой сопротивления разрушению материала данного образца, обозначена как СТОА- ψ_n по аналогии с обозначением характеристики СТОА- ψ_c [1, 2]. Важной, с практической точки зрения, является также величина угла $\psi(s0)_n$, характеризующая сопротивление материала инициированию разрушения. Сведения о различиях между углами ψ_n и $\psi(f)_n$, т.е. о влиянии близости концевой области трещины к границам образца $MR(T)$, могут быть полезными при оценке эффектов взаимодействия растущей трещины с поверхностями иных концентраторов напряжений.

Деформационная и энергетическая характеристики трещиностойкости. После самопроизвольной остановки трещины и закрытия ее берегов (стадия $a-q$ на рис. 4) в рабочем сечении образца возникает специфическое поле напряжений. Последнему, как видно из данных на рис. 8, а, в диапазоне относительно коротких трещин ($c \leq W_0$), соответствует условию неизменности профиля трещины (стадия $q-t$), а следовательно, и неизменности уровня поврежденности материала внутри концевой области трещины. Это условие можно записать в виде равенства $\sigma_N = \sigma_{Np}^*$, где σ_N – усредненное напряжение в рабочем сечении образца; σ_{Np}^* – максимальное напряжение σ_{Np} , при котором рост изолированной (не взаимодействующей со свободными граница-

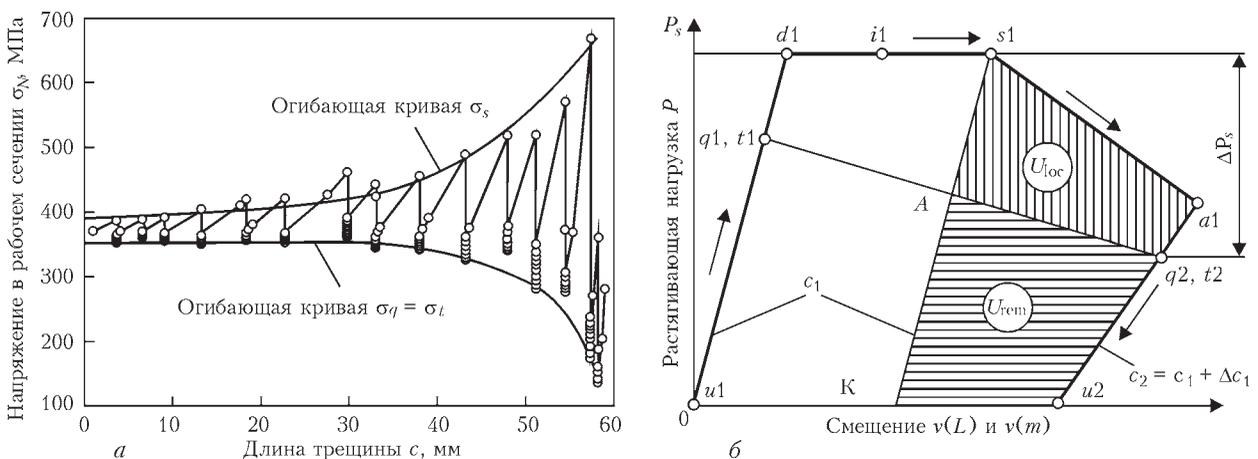


Рис. 8. Зависимость напряжений σ_N от длины трещины c в стандартном образце $MR(T)$ (а) и схема одного цикла скачкообразного изменения нагрузки P , смещений $v(L)$, $v(m)$ и длины трещины c после условной разгрузки образца (состояния t и u) (б)



ми образца) трещины в испытуемом образце невозможен. Для образца MR(T) из сплава Д16АТ, разрушающегося при эталонном уровне стесненности деформаций, характеристика $\sigma_{Nt}^* = 350$ МПа (рис 8, а).

Для определения деформационной и энергетической характеристик трещиностойкости материала по данным испытаний образца MR(T) необходимо рассмотреть каждый цикл скачкообразных изменений нагрузки и смещений отдельно (рис. 8, б и 9). Деформационная характеристика, т.е. угол раскрытия вершины трещины $\text{СТОА} - \psi(x)_{tot} = \psi(x)_n + \psi(x)_s$, определяется по диаграмме $P-v(m)$, а энергетическая характеристика $D_{tot} = D_{rem} + D_{loc}$ – по диаграмме $P-v(L)$. Первые составляющие угла $\psi(x)_{tot}$ и скорости диссипации энергии D_{tot} ($\psi(x)_n$ и D_{rem}) характеризует непрерывное (виртуальное) разрушение, а вторые составляющие ($\psi(x)_s$ и D_{loc}) – прерывистое (реальное) разрушение.

Зависимость угла раскрытия трещины от координаты x $\psi(x)_s$ рассчитывается по формуле:

$$\psi(x)_{sj} = 2 \arctg \left(\frac{\delta(x)_{sj}}{2\Delta c_{j+1}} \right). \quad (1)$$

Здесь

$$\delta(x)_{sj} = 2 \left[v(m)_{sj} - v(m)_{u0} \right] \left(\frac{\Delta c_{j+1}}{c_{sj} + \Delta c_{j+1}} \right),$$

где $v(m)_s$ – смещение точки m в момент s ; $v(m)_{u0}$ – смещение точки m , определяемое по точке пересечения линии полной (условной) разгрузки образца в точке (q_0, t_0) на диаграмме $P - 2v(m)$, которая параллельна линии упругого деформирования образца на этой диаграмме (см. рис. 4, а); c_s – полудлина трещины перед ее продвижением; Δc – протяженность прироста трещины, $j = 1, 2, 3, \dots$. Предполагается, что протяженность полностью развитой зоны процесса разрушения всегда равна протяженности соответствующего прироста трещины Δc . При выводе формулы (1) не использовалось распространенное предположение о том, что в условиях общей текучести прироста смещений точек приложения нагрузки равны приростам раскрытия вершины трещины [15].

Глобальную D_{rem} и локальную D_{loc} составляющие энергетической характеристики D_{tot} рассчитывали соответственно по формулам

$$D_{rem} = \frac{U_{rem}}{2B_0\Delta c}, \quad D_{loc} = \frac{U_{loc}}{2B_0\Delta c}, \quad (2)$$

где U_{rem} и U_{loc} – площади на диаграмме $P - v(L)$, расположенные соответственно под и над линией $t1-t2$ (рис. 8, б). В отличие от общепринятой трактовки понятия скорость диссипации энергии D , в данном случае речь идет об усредненной величине D_{tot} , относящейся к конечному приросту трещины Δc .

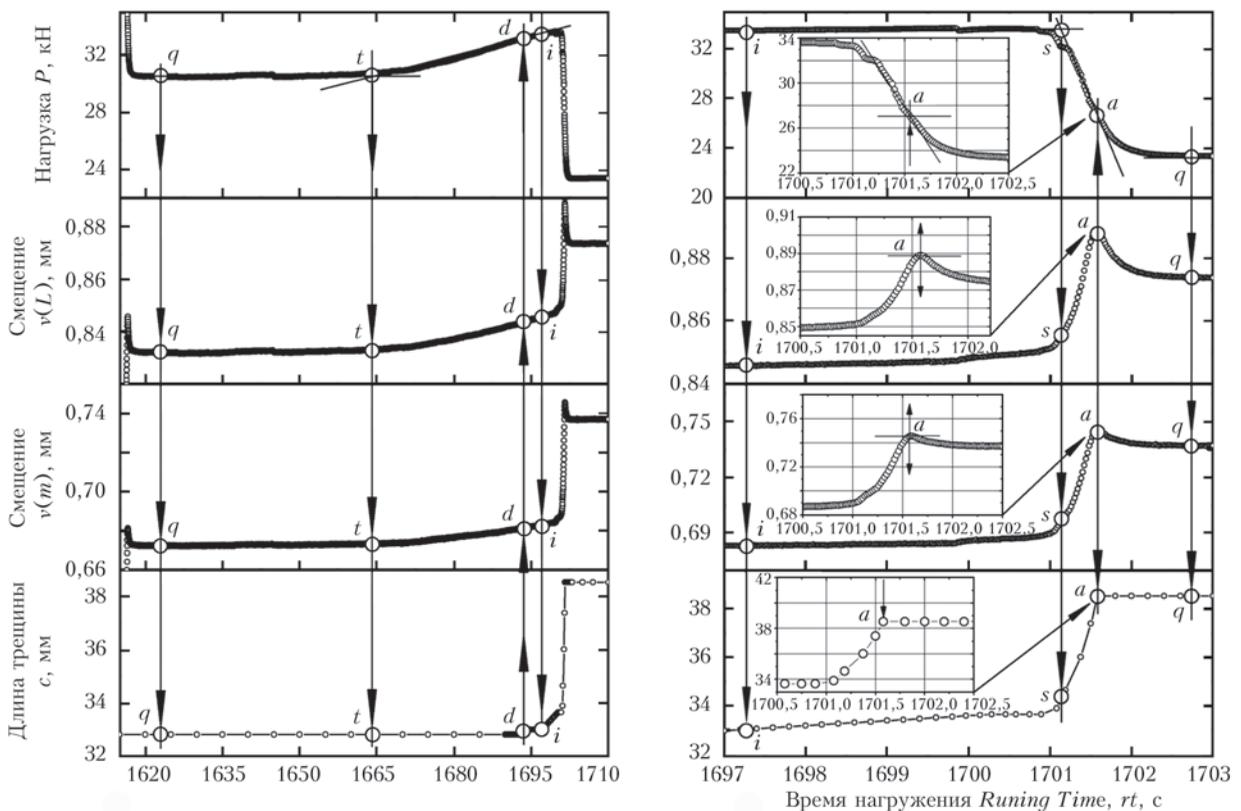


Рис. 9. Временная развертка одного из циклов скачкообразного роста трещины в образце MR(T) с размерами проблемной области $2W_0 = 120$ мм и $2H_0 = 12$ мм с отверстием диаметром $2r_0 = 2$ мм в центре

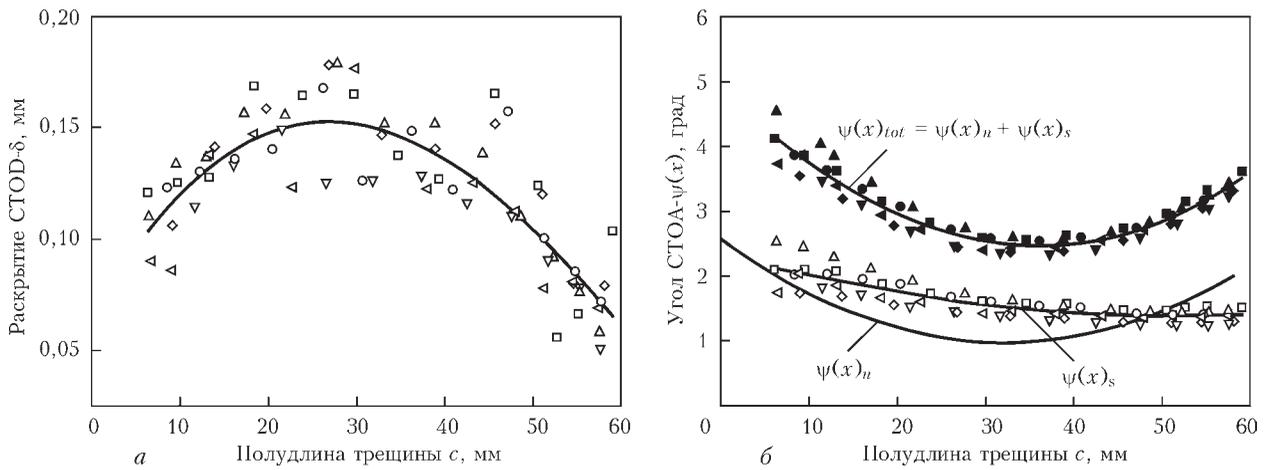


Рис. 10. Изменения величины раскрытия (а) и угла раскрытия (б) вершины трещины, продвигающейся скачкообразно в шести идентичных образцах MR(T) с проблемной областью, имеющей размеры $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм

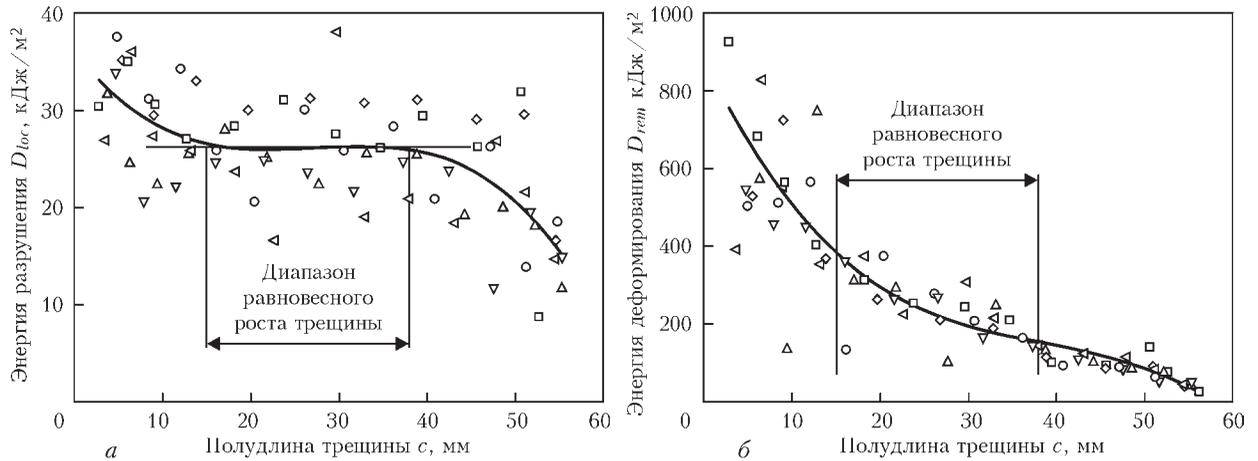


Рис. 11. Изменение усредненных (по площади прироста трещины) значений скорости диссипации энергии на стадии скачкообразного роста трещины в шести идентичных образцах MR(T) с проблемной областью размером $2W_0=120$ мм, $2H_0=12$ мм и $2r_0=2$ мм (а) и на стадии пластического деформирования материала вне концевой области трещины (б)

Результаты определения деформационных, раскрытия вершины трещины STOD-δ (рис. 10, а) и угла раскрытия вершины трещины STOA-ψ (рис. 10, б), а также энергетической (рис. 11) характеристик трещиностойкости сплава Д16АТ удовлетворительно согласуются с данными, полученными с использованием стандарта [1], а также с приведенными в литературных источ-

никах для аналогичных алюминиевых сплавов. В частности, суммарный угол $\psi(x)_{tot}$ раскрытия вершины трещины (рис. 10, б) в диапазоне $10\text{ мм} \leq c_s < 60$ мм располагается в поле разброса критической величины угла $\psi_c = (3,0 \pm 0,9)$ град, которая была установлена нами в работе [9] по данным испытаний сплава Д16АТ.

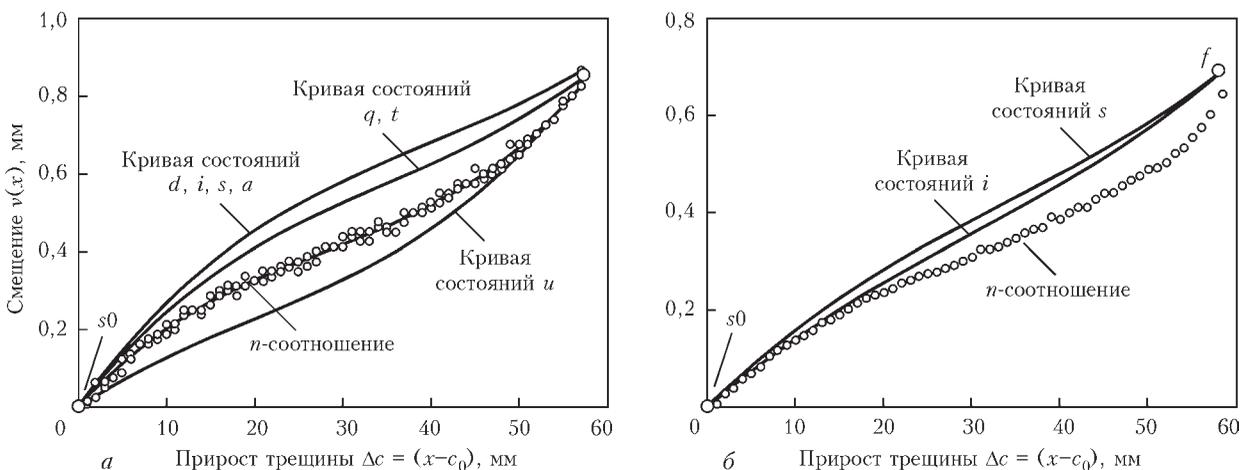


Рис. 12. Объединенная диаграмма разрушения трех образцов MR(T) с проблемной областью размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 120$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и одного образца MR(T) размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (б)

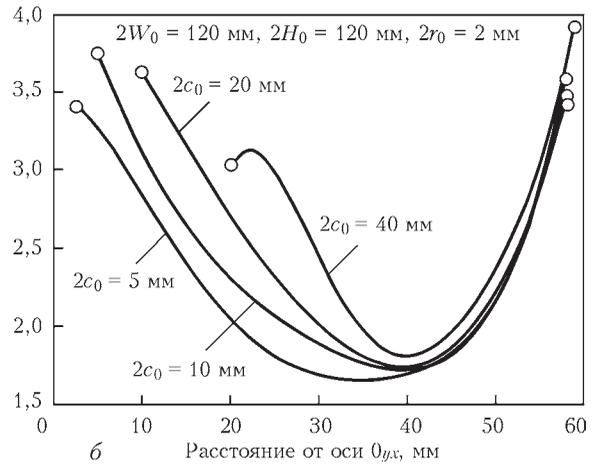
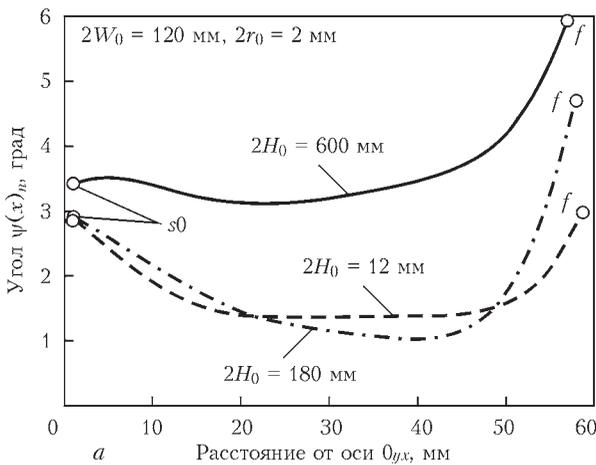


Рис. 13. Значение угла $\psi(x)_n$ для образцов MR(T) шириной $2W_0 = 120$ мм разной высоты (а) и для образцов MDR(T) шириной $2W_0 = 120$ мм, высотой $2H_0 = 120$ мм, имеющих разную начальную длину концентратора $2c_0$ (б)

Из трех энергетических характеристик трещиностойкости сплава Д16АТ D_{loc} , D_{rem} и D_{tot} только первая частично удовлетворяет требованию независимости от прироста трещины в диапазоне равновесного разрушения (рис. 11, а). Среднее значение $D_{loc} = 26,2$ кДж/м² хорошо согласуется с величиной $R_0 = 25$ кДж/м², характеризующей рост трещины в алюминиевом сплаве 2024–Т351 при постоянном уровне так называемой локальной вязкости разрушения (crack tip toughness) [16].

Объединенная диаграмма разрушения. В общем случае диаграмма представлена восемью зависимостями смещения $v(x)$ от виртуального прироста трещины Δc . Для ее построения необходимо иметь два набора данных о разрушении образца MR(T). Первый набор – это данные, полученные при испытаниях, в которых трещина распространялась скачкообразно вследствие самопроизвольных разгрузок образца (см. рис. 4, а), второй – при испытаниях аналогичного образца с периодически повторяющимися принудительными разгрузками. При этом главной является задача определения параметров профиля трещины $v(x, c)_u$ в полностью разгруженном образце (рис. 4 [17]).

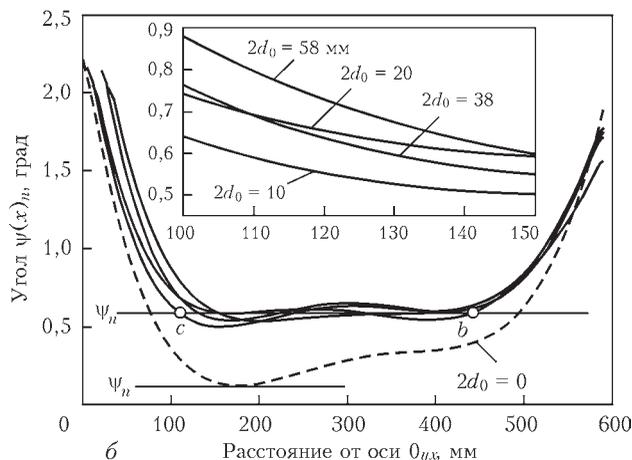


Рис. 14. Значение угла $\psi(x)_n$ для образцов MR(T) и MDR(T) с разной начальной длиной концентратора $2c_0$, имеющих одинаковые размеры $2H_0 = 1200$ мм, $2W_0 = 600$ мм, $2r_0 = 2$ мм

На рис. 12, а показана объединенная диаграмма разрушения для трех одинаковых пластин, в испытаниях которых рост трещины преднамеренно прерывался полными разгрузками. Поэтому она представлена только четырьмя кривыми $v(x)$. Здесь характерные состояния трещины d , i , s и a , относящиеся к стадии прерывистого разрушения, обозначены одной предельной кривой. Для сравнения на рис. 12, б представлена диаграмма, полученная для случая скачкообразного роста трещины. С помощью этих диаграмм могут быть определены линейные $v(x)$ и угловые $\psi(x)$ смещения берегов трещины с момента ее возникновения и до разделения пластины на части.

Влияние геометрии образца на угол $\psi(x)_n$. Для изучения влияния размеров образца на значение угла $\psi(x)_n$ проводились испытания образцов шириной $2W_0 = 120$ мм, $2W_0 = 1200$ мм разной конфигурации. На рис. 13 представлены результаты испытаний образцов шириной $2W_0 = 120$ мм разной высоты $2H_0$ и образцов с размерами $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 120$ мм с разной начальной длиной концентратора $2c_0$. На рис. 14 представлено значение угла раскрытия для образцов MR(T) и MDR(T) шириной $2W_0 = 1200$ мм с разной начальной длиной концентратора $2c_0$.

Выводы

Разработана методика получения, обработки и интерпретации первичных данных прерывистого разрушения прямоугольной пластины с центральным отверстием при одноосном растяжении. Исследовано влияние размеров образца на развитие трещин в тонколистовых (обшивочных) материалах авиационных конструкций. Обоснован выбор оптимальной конфигурации и размеров образца, а также приемлемого диапазона скоростей нагружения, что обеспечивает получение упорядоченных и, вместе с тем, достаточно протяженных участков скачкообразных продвижений трещины в испытываемом образце, позволяющие осуществлять



многоуровневую оценку разрушения образцов из листовых металлов. Определены характерные состояния трещины, которая зарождается и продвигается при неизменном микромеханизме образования свободных поверхностей в условиях общей текучести.

Разработана методика определения угла раскрытия вершины трещины на стадии равновесного разрушения листовых металлов, а также взаимосогласованного определения деформационной и энергетической характеристик трещиностойкости в условиях общей текучести. Определена объединенная диаграмма разрушения, устанавливающая связи между параметрами непрерывного и прерывистого роста трещины.

1. E2472-06. Standard Test Method for Determination of Resistance to Stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions. – ASTM Standard, 2007.
2. ISO 2288. Metallic Materials – Method of Test for the Determination of Resistance to Stable Crack Extension Using Specimens of Low Constraint. – Int. Standard, 2007.
3. Naumenko V.P. Incorporation of length scales in plane stress fracture analysis // Proc. of the ECF16 Fract. of Nano and Eng. Materials and Structures. – E.E. Gdoutos (Ed.), Alexandropoulos, Greece. – 2006.
4. Naumenko V.P., Skrypnuk Yu.D. Sensitivity of crack nucleation parameters to the geometric imperfection // Proc. ECF16 Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures, (Ed.) E. E. Gdoutos, Alexandropoulos, Greece. – 2006.
5. Naumenko V.P., Lenzion S.V. Comprehensive Assessment of a Naturally Forming Tear Crack in Thin-Sheet Aluminium

- Alloy // Proc. ESIA8 Conf. on Through-life Management of Structures, Manchester. – 2006.
6. Naumenko V.P., Lenzion S.V., Skrypnuk Yu.D. Ductile tearing in narrow and wide strips of thin-sheet aluminium alloy // Proc. ESIA8 Through-life Management of Structures Comp. – Manchester, 2006. – 10 p.
 7. Naumenko V.P., Atkins A.G. Engineering assessment of ductile tearing in uniaxial and biaxial tension // International Journal of Fatigue. – 2006. – 28. – P. 494–503.
 8. Naumenko V.P. An engineering concept of fracture instability // Proc. ICMFF8. – Sheffield, 2007. – 8 p.
 9. Naumenko V.P., Lenzion S.V., Limansky I.V. Displacement-based assessment of ductile tearing under low-constraint conditions // The Open Mech. Eng. J. – 2008. – 2. – P. 40–59.
 10. Naumenko V.P., Limansky I.V. Energy-based assessment of ductile tearing in a thin sheet aluminium alloy // Proc. Eng. – 2009. – 1, Issue 1. – P. 63–66.
 11. Naumenko V.P. Through-life assessment of ductile tearing under low-constraint conditions // Proc. of 12th Int. conf. on Fracture. – Ottawa, 2009. – 10 p.
 12. Науменко В., Лиманський І., Кравчук Р. Переривчасте руйнування та характерні стани тріщини // Вісн. Тернопіл. нац. техн. ун-ту. – 2014. – №4 (76). – С. 21–33.
 13. Лиманський І., Кравчук Р. Методика визначення параметрів навантаження зразка у моменти фіксації відеокадрів профілю тріщини // Так саме. – 2015. – №1 (77). – С. 58–63.
 14. Tvergaard V., Hutchinson J.W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids // J. Mech. Phys. Solids. – 1992. – 40. – P. 1377–1397.
 15. Sumpter J.D.G. The energy dissipation rate approach to tearing instability // Ibid. – 2004. – 71. – P. 17–37.
 16. Atkins A.G., Chen Z., Cotterrel B. Prediction of the energy dissipation rate in ductile crack propagation // Fatigue and Fract. of Eng. Mat. and Struct. – 2003. – 26. – P. 67–77.
 17. Науменко В.П., Лиманський І.В. Сопроотивление разрушению листовых металлов и тонкостенных конструкций. Сообщ. 1. Критический обзор // Пробл. прочности. – 2014. – № 1. – С. 25–49.

The influence of dimensions of a plate with central hole on crack propagation in sheet materials was studied. Selection of optimum configuration and dimensions of the sample, as well as of acceptable range of loading rates was substantiated, in order to produce ordered and sufficiently extended sections of abrupt advancement of the crack. Characteristic states of the crack which initiates and propagates at unchanged micromechanism of free surface formation under the conditions of total yield were determined. A procedure was developed for determination of the angle of crack tip opening at the stage of equilibrium failure of sheet metals, as well as of crack resistance under the conditions of total yield. Combined fracture diagram, correlating the parameters of continuous and intermittent crack growth, was specified. 17 References, 1 Table, 14 Figures.

Keywords : sheet metals, deformation constraint, intermittent failure, equilibrium crack growth, crack profile, characteristic crack state

Поступила в редакцию
04.10.2015

Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин:

Збірник наукових статей. – Київ: Інститут електродварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. – 816 с.

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2013–2015 рр., до реалізації якої були залучені інститути НАН України. Мета програми – розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

Електронне видання: www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations#winresurs2015

