

УДК 66.017

В.С. Ерасов¹, Е.И. Орешко¹**СИЛОВОЙ, ДЕФОРМАЦИОННЫЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-11-11

Рассмотрены силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения. Показано, что в упругой области связь между характеристиками разрушения носит линейный характер. Определяющей критерии величиной является величина удельной объемной энергии, необходимой для образования или развития имеющейся поверхности разрушения. При этом учитывается, что не вся затраченная при образовании новой свободной поверхности энергия идет на образование поверхности. Часть энергии рассеивается в виде тепла, звуковых и электромагнитных волн. За счет этого тело уменьшает свою потенциальную энергию и таким образом сопротивляется дальнейшему разрушению. Предложена модель разрушения, в которой формула Гриффитса является частным случаем.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 3.3. «Технология прогнозирования свойств, моделирования и реализации современных процессов конструирования и производства изделий из неметаллических и композиционных материалов с использованием цифровых методов, совместимых с CAD/CAM/CAE и PLM системами («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: потенциальная энергия, объем тела, свободная поверхность тела, удельная работа, разрушение, деформация.

Force, deformation and energy criteria of destruction are considered. It is shown that in elastic area communication between characteristics of destruction has linear character. Size defining criterion is the size of the specific volume energy necessary for education or development of the available surface of destruction. It is thus considered, what not all spent at formation of a new free surface energy goes on formation of a surface. The part of energy dissipates in the form of heat, sound and electromagnetic waves. At the expense of it the body reduces the potential energy and thus resists to further destruction. The destruction model in which a formula Griffiths is a special case is offered.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 3.3. «Technology of forecasting of properties, modeling and implementation of modern processes of designing and production of products from nonmetallic and composite materials with use of the digital methods compatible to CAD/CAM/CAE and PLM by systems» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: potential energy, body volume, free surface of a body, specific work, destruction, deformation.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Проектирование современных воздушных судов по принципу «безопасного повреждения» допускает появление повреждения конструкции и его развитие в процессе эксплуатации до не критических размеров. Во время эксплуатации это повреждение должно быть обнаружено и конструкция отремонтирована. Такой подход требует многопутной (статически неопределимой) конструкции, где силовые элементы подстраховывают друг друга, и подразумевает использование материалов с высокими характеристиками сопротивления развитию повреждаемости и разрушению, гарантирующими межремонтный срок эксплуатации. С целью определения оптимального, контролируемого при эксплуатации критерия разрушения рассмотрены модели энергетического, силового и деформационного критериев разрушения нагружаемых тел. Показано, что в пределах упругой деформации (только для хрупких тел) критерии взаимосвязаны и определяются величиной удельной объемной энергии, необходимой для образования или развития имеющейся поверхности разрушения (длины трещины). При этом учитывается, что не вся затраченная при образовании новой свободной поверхности энергия идет на образование поверхности. Часть энергии (диссипативная энергия) рассеивается в виде тепла, звуковых и электромагнитных волн. Предложена модель разрушения, в которой формула Гриффитса является частным случаем.

Для тел, в которых проходит пластическая деформация, часто сопровождающаяся, как и разрушение, изменением величины свободной поверхности, вопрос определения величины удельной объемной энергии, необходимой для образования новой поверхности, более сложен, чем в случае хрупкого тела. Пластическая деформация одновременно включает в себя процесс сопротивления тела нагружению и процесс сопротивления тела разрушению. Основным отличием от хрупкого разрушения является явная зависимость процесса пластического деформирования от фактора времени. В случае хрупкого разрушения изменение свободной поверхности происходит быстро и фактором времени можно пренебречь. При пластической деформации величина деформации и скорость ее протекания могут служить критериями повреждаемости и разрушения.

Расчетные методы определения работоспособности и повреждаемости конструкций в процессе эксплуатации разрабатываются с учетом результатов большого количества испытаний образцов из материалов конструкций [2–15], поскольку предполагается, что механизмы накопления повреждений и развития разрушения за счет роста трещин (появления новых свободных поверхностей) для конструкций и образцов одинаковы. В работах [16, 17] показано, что на стадиях развития пластических деформаций оценка повреждаемости и долговечности по деформационному критерию лучше обеспечивает безопасность конструкций по сравнению с возможностями силового и энергетического критериев.

Задача данной работы – сравнение энергетического, силового и деформационного критериев на стадии роста трещины усталости с целью определения оптимального для контроля при эксплуатации критерия разрушения.

Модели критериев разрушения

Широко известен критерий разрушения твердого тела с дефектом в виде трещины, разработанный Гриффитсом [18]. При получении критерия рассматривалась растягиваемая изотропная бесконечная пластина конечной толщины, в которой имеется трещина (рис. 1). Длина трещины $2l$ значительно меньше ширины пластины b (теоретически эта величина бесконечна).

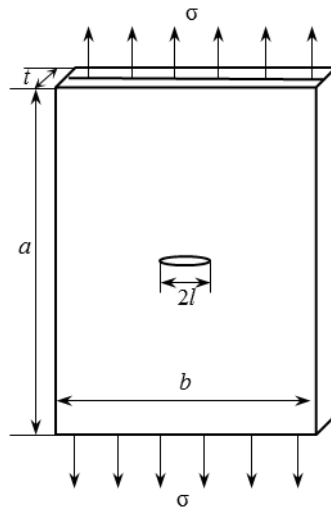


Рис. 1. Пластина со сквозной трещиной

При продвижении трещины в пластине, нагруженной на бесконечности напряжением σ , на величину δl упругая энергия в пластине преобразуется в поверхностную энергию трещины. На основе закона сохранения энергии представлено следующее уравнение:

$$\delta\Gamma + \delta W = 0 \text{ при } \delta l > 0, \quad (1)$$

где $\delta\Gamma$ – приращение поверхностной энергии; δW – уменьшение потенциальной энергии за счет разгрузки области около трещины при ее продвижении на δl .

В результате принятых Гриффитсом допущений [18, 19] о величине удельной объемной энергии упругой деформации, разгрузке и освобождении упругой энергии в области в виде эллипса с осями $2l$ и l и толщиной t , величине свободной поверхности трещины из уравнения (1) получен критерий в виде

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}}, \quad (2)$$

где σ – напряжение разрушения; E – модуль упругости; γ – работа, затраченная на образование единицы новой поверхности (поверхностная энергия); l – полудлина трещины.

Гриффитс на полученных результатах разрушения тонкостенных стеклянных образцов показал, что величина $\sigma\sqrt{l}$ является константой материала. Модель Гриффитса изначально предполагает наличие трещин в материале и рассматривает разрушение как развитие трещины. Основной характеристикой трещины является ее длина (линейный размер). Разрушение начинается при достижении в вершине трещины заданной длины критического напряжения.

Ограничения модели связаны, прежде всего, с представлением трещины только одним ее размером – длиной. Фактически трещина представляет собой поверхность и должна характеризоваться величиной площади поверхности. Модель Гриффитса, несмотря на то, что получена из закона сохранения энергии, – представляет собой силовой критерий. Она не учитывает рассеяние энергии при развитии трещины, вследствие чего дает завышенное значение прочности или критической длины трещины, а также исключает начальную стадию появления дефекта, не рассматривает разрушение как появление и развитие одной или нескольких свободных поверхностей.

Авторы разработали модель хрупкого разрушения, в которой исключены ограничения модели Гриффитса [20, 21]. Рассмотрим пластину (рис. 2), в части объема V_1

которой образуются одна или несколько трещин. Размеры объема V_1 отвечают следующим условиям: упругая энергия в нем распределена равномерно по всему объему, а величина дополнительной энергии концентрируется либо в произвольной точке данного объема, когда в нем нет концентраторов энергии, либо на концентраторах энергии (дефектах или границах трещин).

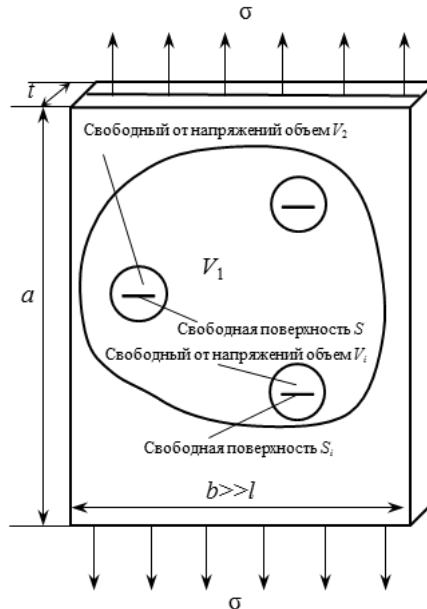


Рис. 2. Пластина, в части объема V_1 которой образуются одна или несколько трещин

Удельная объемная энергия упругой деформации U для равномерно растянутой пластины, в том числе и ее объема V_1 , равна полной энергии A (работе, затраченной на упругое деформирование объема V_1), деленной на объем:

$$U = \frac{A}{V_1 + \Delta V} = \frac{A}{V_1 [1 + \varepsilon(1 - 2\mu)]}, \quad (3)$$

где A – полная работа, затраченная на деформирование объема V_1 ; V_1 – начальный объем тела до деформации; ΔV – приращение объема при деформации; ε – деформация; μ – коэффициент Пуассона.

Поскольку $\varepsilon(1 - 2\mu) \ll 1$, то U можно представить как

$$U = \frac{E\varepsilon^2}{2[1 + \varepsilon(1 - 2\mu)]} \approx \frac{1}{2} E\varepsilon^2. \quad (4)$$

Удельную объемную энергию упругой деформации можно представить в виде следующего выражения

$$U = \frac{1}{2} E\varepsilon_y^2 = k\varepsilon_y^2 = d\sigma_y^2, \quad (5)$$

где k – константа; d – константа; ε_y – предельная упругая деформация; σ_y – предельное упругое напряжение.

Теоретически удельная объемная энергия упругой деформации представляет собой энергию, сосредоточенную в точке тела. Пусть в некоторой области объема V_1 (рис. 2) накопленная потенциальная энергия деформирования превысит значение $V_1 k\varepsilon_y^2$ на величину $A_{\text{доп}}$. Условие начала процесса хрупкого разрушения в области: $A_{\text{доп}} > 0$.

Формула (6) представляет собой равенство энергий в объеме V_1 до начала процесса разрушения и после образования одного очага разрушения со свободной поверхностью площадью S :

$$V_1 k \varepsilon_y^2 + A_{\text{доп}} = \gamma S - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S + V_1 k \varepsilon_y^2 - V_2 k \varepsilon_y^2, \quad (6)$$

где γ – работа, затраченная на образование единицы новой поверхности (поверхностная энергия); $A_{\text{изл}}^{\text{уд}}$ – диссипативная энергия тепловых и звуковых волн из зоны разрушения (константа) при образовании единицы новой поверхности; V_2 – объем разгруженной области вокруг образовавшейся свободной поверхности S .

Для многоочагового разрушения формула (6) примет вид

$$V_1 k \varepsilon_y^2 + A_{\text{доп}} = \gamma \sum_{i=2}^n S_i - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} \sum_{i=2}^n S_i + V_1 k \varepsilon_y^2 - k \varepsilon_y^2 \sum_{i=2}^n V_i, \quad (7)$$

где n – число новых свободных поверхностей; V_i – объем разгруженной области вокруг образовавшейся свободной поверхности S_i из области объемом V_1 ; S_i – площадь одной из n образовавшихся свободных поверхностей.

Объем V_2 вокруг образовавшейся свободной поверхности S с учетом размерности можно представить в виде

$$V_2 = a S^{3/2}, \quad (8)$$

где a – безразмерная константа, определяемая ориентацией свободной поверхности в поле энергии упругой деформации.

Из уравнения (6) следует, что

$$A_{\text{доп}} = \gamma S - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S - B S^{3/2}, \quad (9)$$

где B – константа, равная $a k \varepsilon_y^2$.

Представим формулу (9) графически (рис. 3).

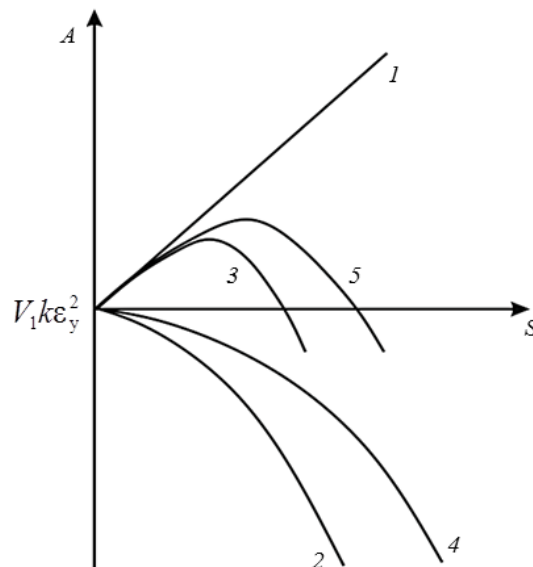


Рис. 3. Изменение потенциальной энергии в объеме V_1 :

1 – рост энергии по линейному закону за счет образования свободной поверхности ($\gamma S - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S$); 2 – уменьшение энергии за счет разгрузки объема V_2 вокруг свободной поверхности ($B S^{3/2}$); 3 – изменение потенциальной энергии объема V_1 в зависимости от площади свободной поверхности; 4, 5 – случай многоочагового разрушения

Продифференцируем дополнительную энергию по площади образовавшейся поверхности S :

$$\frac{\partial A_{\text{доп}}}{\partial S} = A_1 - B_1 S^{1/2}, \quad (10)$$

где $A_1 = \gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}}$ – увеличение потенциальной энергии при образовании единицы новой поверхности (константа); $B_1 = \frac{3}{2} a k \varepsilon_y^2 = \frac{3}{2} B$ – константа.

Если полученное выражение (производная $\frac{\partial A_{\text{доп}}}{\partial S}$):

– $A_1 - B_1 S^{1/2} > 0$, то дополнительной энергии достаточно для образования дефекта со свободной поверхностью S , но недостаточно для развития разрушения в объеме V_1 ; за счет образования новой поверхности тело поглощает энергию и таким образом сопротивляется дальнейшему разрушению (разрушаясь, сопротивляется дальнейшему разрушению);

– $A_1 - B_1 S^{1/2} = 0$, то данный случай является критическим состоянием, при котором любое приращение энергии приведет к разрушению за счет накопленной в объеме V_1 потенциальной энергии;

– $A_1 - B_1 S^{1/2} < 0$, то происходит разрушение образца.

Предложенный механизм хрупкого разрушения включает все стадии:

– образование дефекта при подаче в нагруженную область $A_{\text{доп}_1} < A_{\text{доп}}^{\text{max}}$ ($S_1 < S_{\text{кр}}$);

– рост дефекта при добавлении к энергии $A_{\text{доп}_1}$ энергии $A_{\text{доп}_2}$ таким образом, что $A_{\text{доп}_1} + A_{\text{доп}_2} < A_{\text{доп}}^{\text{max}}$ ($S_1 + S_2 < S_{\text{кр}}$).

Поскольку $B S^{3/2} > B \sum_{i=2}^n (S_i)^{3/2}$, то появление и развитие только одной свободной поверхности S (меньше $S_{\text{кр}}$) быстрее приведет к разрушению, чем появление нескольких свободных поверхностей $\sum_{i=2}^n S_i$, при $S = \sum_{i=2}^n S_i$, что подтверждается экспериментальными результатами.

Материалы с высокими значениями модуля упругости имеют меньший критический размер дефекта, так как $k = \frac{1}{2} E$.

При образовании свободной поверхности энергетически выгодно образование поры в виде сферы. Сфера, при минимальной поверхности, позволяет разгрузить максимальный объем. Безразмерная константа a для сферы принимает значение $1/(6\pi^{1/2})$, и максимальный радиус поры можно получить из уравнения

$$R_{\text{max}} = \frac{2(\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}})}{\frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y} = \frac{2(\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}})}{U}. \quad (11)$$

Уравнение (11) показывает, что критический размер поры прямо пропорционален величине поверхностной энергии и обратно пропорционален удельной объемной энергии упругой деформации. Приняв $\gamma \approx 1$ Дж/м² [22] и пренебрегая энергией диссипации, для алюминиевого сплава с модулем упругости $E \approx 70$ ГПа при упругой деформации $\varepsilon = 0,005$ получим значение $R_{\text{max}} \approx 2$ мкм.

Выведем из полученной модели (6) и уравнения (10) формулу Гриффитса. Из уравнения (6) следует уравнение (9), в котором при допущениях Гриффитса $S=4tl$, $V_2=2\pi l^2 t$, $k\varepsilon_y^2 = \frac{\sigma_y^2}{2E}$, получаем

$$A_{\text{доп}} = (\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}}) 4lt - 2\pi l^2 t \frac{\sigma_y^2}{2E}. \quad (12)$$

Если $S=4tl$ (где $t=\text{const}$), $\partial S=4t\partial l$, тогда $\frac{\partial A_{\text{доп}}}{\partial S} = \frac{\partial A_{\text{доп}}}{4t\partial l} = 0$, что можно представить как

$$(\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}}) - \pi l \frac{\sigma_y^2}{2E} = 0; \quad (13)$$

$$l_{\text{кр}} = \frac{(\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}}) 2E}{\pi \sigma_y^2} = \frac{\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}}}{\pi \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y} = \frac{\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}}}{\pi U}.$$

В теле без трещины при ее образовании и росте до критического размера решающее значение имеют параметры γ , $A_{\text{изл}}^{\text{уд}}$ и U . При этом чем больше значение U , тем меньше величина $l_{\text{кр}}$.

Точно так же, как и Гриффитс, получаем, что $\sigma\sqrt{l}$ является константой материала. При наличии трещины с полудлиной l

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}}) 2E}{\pi l}}, \quad (14)$$

что соответствует формуле Гриффитса $\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}}$, если пренебречь константой $A_{\text{изл}}^{\text{уд}}$, которую Гриффитс не рассматривал.

Таким образом, если не учитывать диссипативную энергию разрушения, то из полученных формул (6)–(10) можно найти напряжение разрушения Гриффитса. Но из теории Гриффитса нельзя прийти к данной модели, так как Гриффитс рассматривал только один параметр трещины – длину, но не оценивал такую величину, как площадь поверхности трещины. Вопрос о влиянии площади поверхности оставался открытым.

Полученная Гриффитсом константа $\sigma\sqrt{l}$ в данном случае имеет вид $S^{1/4}\sigma$, что позволяет определить влияние характерных размеров свободной поверхности на прочность образца с трещиной. Например, для трещины Гриффитса получаем

$$(4tl)^{1/4} = \sqrt{l}, \quad (15)$$

т. е. площадь поверхности трещины может быть заменена полудлиной трещины в частном случае, когда $l=4t$.

В случаях трещин с поверхностью в виде круга радиусом l ($S=2\pi l^2$) и квадрата со стороной, равной диаметру круга $2l$ ($S=8l^2$), получаем, что при равных полудлинах трещина с квадратной поверхностью немного опаснее трещины с поверхностью в виде круга. Увеличение толщины образца – со сквозной трещиной с поверхностью в виде прямоугольника – должно приводить к уменьшению критического напряжения по формуле

$$\sigma = C/t^{1/4}, \quad (16)$$

где C – константа; t – толщина образца.

В таблице представлено сравнение разработанной модели разрушения хрупкого тела с моделью Гриффитса.

Сравнение модели Гриффитса с разработанной моделью разрушения хрупкого тела

| Модель Гриффитса | Разработанная модель |
|---|---|
| Предполагает наличие трещины в материале | Предполагает начальную стадию, когда твердое тело еще не имеет дефектов |
| Рассматривает разрушение как развитие одномерной величины – длины трещины | Рассматривает разрушение как появление и развитие одной или множества свободных поверхностей. При появлении и развитии множества свободных поверхностей поглощаемая энергия больше. Концентрация процесса разрушения начинается при объединении поверхностей (образовании магистральной трещины), потому что $S^{1/4}\sigma = \text{const}$ |
| Не учитывает диссипативную энергию при росте трещины | Учитывает диссипативную энергию тепловых и звуковых волн из зоны разрушения, затраченную на образование единицы новой поверхности |
| Рассматривает разрушение как быстрый рост трещины заданной длины, при достижении в ее вершине критического напряжения | Рассматривает разрушение как многостадийный процесс: рост упругой энергии в твердом теле; образование свободной поверхности (одной или нескольких), последующий рост свободной поверхности (или свободных поверхностей) до критической площади, при увеличении которой происходит мгновенное разрушение |
| Учитывает только длину трещины и не учитывает величину площади поверхности трещины | Учитывает величину площади поверхности трещины |
| Критерием разрушения является напряжение при фиксированной длине трещины | Критерием разрушения является напряжение при фиксированном размере поверхности трещины |

Полученные Гриффитсом ($\sigma\sqrt{l}$) и авторами статьи ($S^{1/4}\sigma$) константы имеют одинаковую размерность и предполагают, что предельное напряжение в вершине трещины является силовой характеристикой материала.

Ирвин и Кис [22] предложили оценивать сопротивление материала распространению трещины с помощью энергии, которая освобождается при ее продвижении. В модели Гриффитса эта величина, обозначенная в его честь G и названная интенсивностью освобождающейся энергии, равна [23]

$$G = \pi l \frac{\sigma^2}{E} \quad (17)$$

и

$$G_{lc} = 2\gamma - \text{см. формулу (2)}. \quad (18)$$

В модели, разработанной авторами статьи, освобождающаяся в объеме V_1 энергия равна

$$A_{\text{осв}} = -A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S - BS^{3/2}, \quad (19)$$

соответственно интенсивность освобождающейся энергии равна

$$G(S) = -\frac{\partial A_{\text{осв}}}{\partial S} = A_{\text{изл}}^{\text{уд}} + \frac{3}{2}BS^{1/2}. \quad (20)$$

На рис. 4 представлены зависимости интенсивности освобождающейся энергии от размеров трещины по модели Гриффитса и модели, представленной авторами данной статьи.

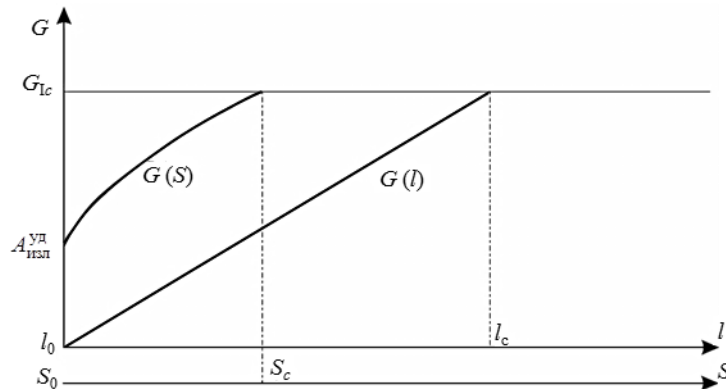


Рис. 4. Зависимости интенсивности освобождающейся энергии от размеров трещины:

$G(l)$ – модель Гриффитса; $G(S)$ – модель авторов данной статьи; G_{Ic} – критическая интенсивность освобождающейся энергии; l_0 – исходная длина трещины; S_0 – исходная площадь поверхности трещины; l_c – критическая длина подросшей трещины; S_c – критическая площадь поверхности трещины

Используя параметр G , можно представить энергетический критерий разрушения в форме

$$G(\sigma, l) = R(l) \quad (21)$$

или

$$G(\sigma, S) = R(S). \quad (22)$$

Функции $R(l)$ и $R(S)$ представляют зависимости удельного сопротивления (R -кривые) от роста размеров трещины. Трещина длиной l_0 или с площадью поверхности S_0 начнет распространяться либо при условии $G(\sigma_0, l_0) = G_{Ic}$, $G(\sigma_0, S_0) = G_{Ic}$, либо при напряжении $\sigma_c < \sigma_0$, когда трещина подросла за счет изменения внешней нагрузки таким образом, что в локальной зоне вершины трещины выполнялись условия уравнений (21) и (22). При этом в модели авторов данной статьи существует напряжение, меньше которого трещина не растет, что наблюдается на практике. Получается – трещина способна медленно расти и останавливаться сообразно с изменением внешней нагрузки.

В случае упругой деформации силовой и энергетический критерии разрушения являются критериями, оценивающими напряженное и энергетическое состояние материала локально, теоретически – в точке тела. Высокая концентрация напряжения и энергии вызовет, согласно представленным моделям, высокоскоростное полное разрушение. Медленное подрастание трещины возможно только в условиях высокоскоростного изменения внешней нагрузки и достижения неравенства $G(\sigma, l) < R(l)$.

При наличии у тела способности к пластической деформации острая локализация концентрации напряжения и энергии становится невозможной. Начало пластического деформирования вызывает рост нагружаемого объема тела при незначительном изменении напряжения. Резко возрастает потребляемая на деформирование энергия, а освобождающаяся энергия упругой деформации увеличивается мало. Увеличение пластичности ведет к унификации критериев разрушения к величине прочности при растяжении или сдвиге. Для тела, обладающего большой пластической деформацией, трещина представляет опасность только из-за уменьшения площади несущего нагрузку сечения.

Как правило, применяемые в авиационной промышленности конструкционные материалы обладают высокими значениями характеристик прочности и средними значениями характеристик пластичности. Повышение сопротивления развитию трещин может быть реализовано путем создания материалов с высокими показателями пластичности, а также материалов со структурой, способной тормозить образование и развитие магистральной трещины – например, за счет ее ветвления или остановки перед армирующими элементами структуры материала. Трещиностойкость таких материалов следует изучать, опираясь на исследования энергетических и деформационных критериев разрушения в силу того, что эти критерии по сравнению с силовым критерием лучше представляют процесс развития трещины при реализации в ее вершине значительных пластических деформаций. Энергетический критерий объединяет действие силы и деформации, деформационный критерий легко связать с процессом повреждаемости материала [16, 17] и отслеживать экспериментально.

Влияние пластической деформации сильнее проявляется и проще исследуется при плоском напряженном состоянии. При испытаниях в условиях плоского напряженного состояния используют образцы в виде пластин с центральным надрезом и определяют:

- критическое значение условного коэффициента интенсивности напряжения K_c^y ;
- критическое значение коэффициента интенсивности напряжения K_c ;
- остаточную прочность образца в нетто-сечении $\sigma_c^{\text{нетто}}$;
- кривую сопротивления распространению трещины при статическом нагружении (R -кривая или $(K-R)$ -кривая), которая представляет собой зависимость между текущим значением коэффициента интенсивности напряжения K_R и приростом эффективной длины трещины;
- критическое раскрытие вершины трещины δ_c ;
- J_c – интеграл [22–28].

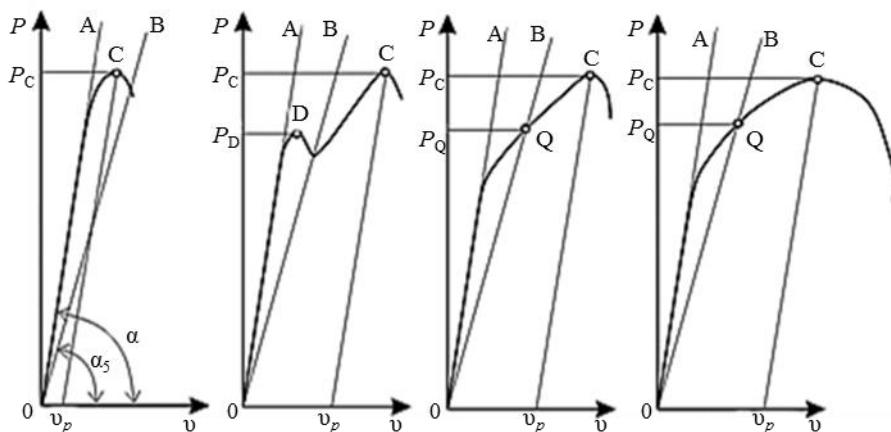


Рис. 5. Характерные диаграммы « $P-v$ » типов I (а), II (б), III (в) и IV (г):

α – угол наклона линейного участка диаграммы к оси v ; α_5 – угол наклона прямой OB к оси v под углом, тангенс которого на 5% меньше тангенса угла α

При появлении в вершине трещины значительной пластической деформации при нагружении и медленном подрастании длины трещины, условный коэффициент интенсивности напряжения K_c^y – ниже реального, так как при определении K_c^y не учитывается увеличение длины трещины. Определение критического значения коэффициента интенсивности напряжения K_c требует записи диаграммы «нагрузка P –смещение v » (изменение расстояния между двумя точками на противоположных берегах в середине трещины в процессе нагружения). Диаграмму « $P-v$ » регистрируют при испытании на

растяжение образца с предварительно выращенной трещиной. Скорость нагружения образца устанавливают по скорости перемещения подвижного захвата испытательной машины в пределах от 0,02 до 0,2 мм/с [29–32]. Четыре характерных типа диаграмм « P – v » (рис. 5) специально представлены с одинаковой величиной максимальной нагрузки в точке C , чтобы наглядно представить рост критического раскрытия вершины трещины δ_c при возникновении в ее вершине пластической деформации.

Критическое раскрытие трещины δ_c [26] определяют по формуле

$$\delta_c = \frac{K_c'^2 (1 - \mu^2)}{2\sigma_{0,2} E} + v_p, \quad (23)$$

где K_c' – критический условный коэффициент интенсивности напряжений (обозначается K_c' вместо K_c^y в случае, когда $\sigma_c^{\text{нetto}} > 0,8\sigma_{0,2}$); μ – коэффициент Пуассона; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести при растяжении; E – модуль нормальной упругости; v_p – условное пластическое смещение v , соответствующее точке C диаграммы « P – v ».

Полное смещение при нагружении представляет собой сумму упругого смещения, смещений за счет развития пластической деформации и подрастания трещины. Раскрытие трещины складывается из упругой и пластической частей – см. формулу (23). Для образца из листа алюминий-литиевого сплава В-1441-Т1 толщиной 2 мм и шириной 200 мм с характеристиками $K_c^y = 76 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $E = 78 \text{ ГПа}$, $\mu = 0,33$, $\sigma_{0,2} = 315 \text{ МПа}$ получаем упругую часть раскрытия трещины, равную 0,1 мм. Условное пластическое смещение v_p диаграммы « P – v », как правило, больше упругого раскрытия.

Вид диаграмм в координатах « P – v » сходен с видом диаграмм растяжения в координатах «нагрузка P –абсолютная деформация образца Δl ». Величина условного пластического смещения v_p – аналогично величинам абсолютного и относительного пластического удлинения при растяжении после разрушения – должна служить характеристикой, демонстрирующей сопротивление материала разрушению. Российский стандарт [29] предусматривает определение этой характеристики, но на практике для оценки качества материала ее определяют и используют редко. В работах [33, 34] и зарубежных стандартах [35–38] характеристикам деформации уделяют внимание наравне с силовыми характеристиками. Развитие механики разрушения, совершенствование испытательной техники, позволяющей в настоящее время с помощью современных оптических систем проводить точную оценку деформированного состояния в области вершины трещины, требуют актуализации отечественных стандартов и внедрения в практику оценки качества материалов деформационных характеристик механики разрушения.

Широко предлагаемой к использованию энергетической характеристикой разрушения является J -интеграл, который характеризует работу пластической деформации и разрушения. В стандарте [35] J -интеграл определен как математическое выражение, интеграл по линии или поверхности, которые окружают границу трещины от одной ее поверхности до другой; он используется для оценки локального напряженно-деформированного поля вокруг границы трещины. Строгого теоретического обоснования J -интеграл не имеет. В условиях упругого деформирования J -интеграл определяет интенсивность освобождающейся упругой энергии и равен величине G [35].

На рис. 6 представлена фотография распределения деформаций в конце усталостной трещины в направлении растяжения (перпендикулярно длине трещины). Фотография получена методом 3D-измерений с помощью двух видеокамер. На статическую трещиностойкость испытывали образец, изготовленный из листа титанового сплава ВТ6, шириной 200 мм и толщиной 5,0 мм с центральной трещиной.

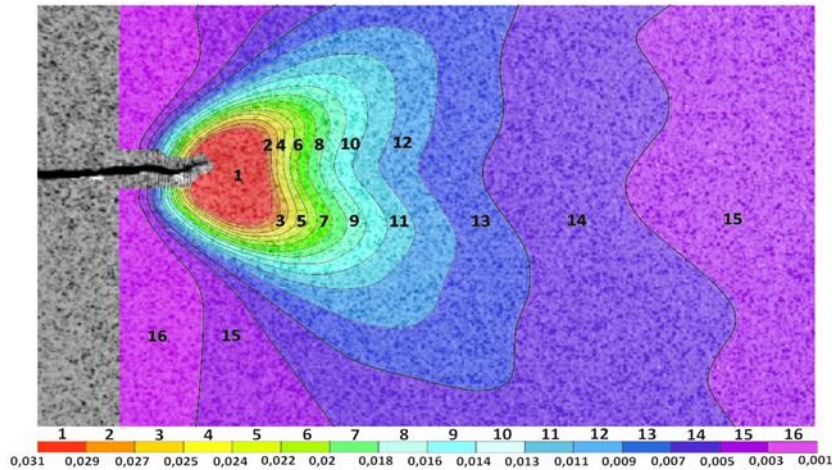


Рис. 6. Распределение деформаций в направлении растяжения в конце центральной трещины

Анализ вида распределения деформаций показал, что при медленном подрастании трещины вид деформационного состояния в области ее вершины изменяется незначительно при условии сохранения вида разрушения (отрыв). При переходе при больших брутто-напряжениях к разрушению срезом деформационное состояние в вершине изменяется. Момент перехода отражает появление из вершины трещины хорошо заметных полос скольжения (усов) под углом ~ 50 град к существовавшему направлению развития трещины.

J -интеграл можно представить в виде суммы

$$J = J_{\text{упр}} + J_{\text{пл}}, \quad (24)$$

где $J_{\text{упр}}$ – упругая часть интеграла, равная величине упругой энергии, затраченной на образование единицы новой поверхности трещины; $J_{\text{пл}}$ – часть интеграла, характеризующая затраты на пластическое деформирование области около вершины трещины.

Существует взаимосвязь между силовым, деформационным и энергетическим критериями разрушения. В упругой области связь между характеристиками разрушения носит линейный характер:

$$J_{\text{Ic}} = G_{\text{Ic}} = \frac{K_{\text{Ic}}^2 (1 - \mu^2)}{E} = 2\delta_{\text{Ic}} \sigma_{\text{в}}. \quad (25)$$

С появлением в вершине трещины значительных пластических деформаций и подрастании трещины при нагружении диаграмму в координатах « P – v » используют для построения диаграмм « K – Δa », « δ – Δa », « J – Δa », в которых Δa – величина подрастания трещины в процессе нагружения. Современные автоматизированные визуальные методы измерения позволяют точно определять параметры трещины. Представленные зависимости носят, как правило, степенной характер, аналогичный зависимости $G(S)$, представленной на рис. 4. Используя единый аргумент Δa в представленных диаграммах, можно установить взаимосвязь между значениями K , δ и J .

Малоизученным до настоящего времени является соотношение долей в характеристиках разрушения, вносимых собственно упругой деформацией, пластической деформацией, в том числе с учетом процесса релаксации напряжений в вершине трещины, развитием поверхности разрушения. Особый интерес представляет исследование скорости нагружения на процесс развития разрушения.

Обсуждение и заключения

Рассмотрены силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения. Показано, что в упругой области связь между характеристиками разрушения носит линейный характер. Определяющей критерии величиной является величина удельной объемной энергии, необходимой для образования или развития имеющейся поверхности разрушения (длины трещины). При этом учитывается, что не вся затраченная при образовании новой свободной поверхности энергия идет на образование поверхности. Часть энергии (диссипативная энергия) рассеивается в виде тепла, звуковых и электромагнитных волн. За счет этого тело уменьшает свою потенциальную энергию и таким образом сопротивляется дальнейшему разрушению (разрушаясь, сопротивляется дальнейшему разрушению). Предложена модель разрушения, в которой формула Гриффитса является частным случаем. На начальном этапе разрушения энергетически выгодно образование пор в виде сфер. Сфера, при минимальной поверхности, позволяет разгрузить максимальный объем. Критический размер поры прямо пропорционален величине поверхностной энергии и обратно пропорционален удельной объемной энергии упругой деформации.

Способность тела к пластической деформации снимает опасность острой концентрации напряжения и энергии. Начало пластического деформирования вызывает рост нагружаемого объема тела при незначительном изменении напряжения, возрастает потребляемая на деформирование энергия, а энергия упругой деформации увеличивается мало. Полную информацию о протекании процесса разрушения, как и в упругом случае, получают из диаграммы смещения в координатах « $P-u$ », добавляя к ней данные о подрастании трещины. Построив диаграммы в координатах « $K-\Delta a$ », « $\delta-\Delta a$ », « $J-\Delta a$ », получают из них необходимые характеристики разрушения материала.

Следует отметить отсутствие современных отечественных стандартов по экспериментальному определению характеристик разрушения материалов. Развитие материаловедения, механики разрушения, совершенствование испытательной техники, позволяющей проводить точную оценку деформированного состояния в области вершины трещины, опыт последних международных разработок требуют активного внедрения в практику оценки качества материалов деформационных и J -интегральных характеристик разрушения материалов, актуализации имеющихся и разработки новых отечественных стандартов по их экспериментальному определению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э. и др. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ // *Сб. докл. IX Междунар. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2012»*. 2012. С. 122–123.
3. Каблов Е.Н., Гриневиц А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // *75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
4. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // *Научно-технические проблемы освоения Арктики*. М.: Наука, 2015. С. 490.
5. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю. Выбор схемы расположения высокомодульных слоев в многослойной гибридной пластине для ее наибольшего сопротивления потере устойчивости // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S4. С. 109–117. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-109-117.

6. Димитриенко Ю.И., Луценко А.Н., Губарева Е.А., Орешко Е.И., Базылева О.А., Сборщиков С.В. Расчет механических характеристик жаропрочных интерметаллидных сплавов на основе никеля методом многомасштабного моделирования // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 33–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-33-48.
7. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. Расчет на прочность гибридной панели крыла на базе листов и профилей из высокопрочного алюминий-литиевого сплава и слоистого алюмокомпозита // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 53–61. DOI: 10.185.77/2071-9140-2016-0-1-53-61.
8. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Базылева О.А., Луценко А.Н., Орешко Е.И. Моделирование упругопластических характеристик монокристаллических интерметаллидных сплавов на основе микроструктурного численного анализа // *Математическое моделирование и численные методы*. 2015. №2. С. 3–22.
9. Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Орешко Е.И. Экспериментально-теоретическое обоснование выбора метода и имплантатов для устранения воронкообразной деформации грудной клетки // *Научные труды (Вестник МАТИ)*. 2012. №19 (91). С. 331–336.
10. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Особенности расчетов устойчивости стержней и пластин // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-74-79.
11. Димитриенко Ю.И., Луценко А.Н., Губарева Е.А., Орешко Е.И., Сборщиков С.В., Базылева О.А., Туренко Е.Ю. Интегрированная информационная система для хранения данных по свойствам жаропрочных никелевых сплавов и расчета их механических характеристик // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №1 (46). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-86-94.
12. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Математическое моделирование деформирования конструкционного углепластика при изгибе // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №2 (41). С. 50–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-50-59.
13. Коллеров М.Ю., Усиков В.Д., Куфтов В.С., Гусев Д.Е., Орешко Е.И. Медико-техническое обоснование использования титановых сплавов в имплантируемых конструкциях для стабилизации позвоночника // *Титан*. 2013. №1 (40). С. 39–45.
14. Гусев Д.Е., Коллеров М.Ю., Рудаков С.С., Королев П.А., Орешко Е.И. Оценка биомеханической совместимости имплантируемых опорных пластин из сплавов на основе титана и никелида титана методом компьютерного моделирования // *Титан*. 2011. №3 (33). С. 39–44.
15. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н., Терентьев В.Ф., Слизов А.К. Построение диаграмм деформирования в трехмерном пространстве σ - ϵ - t // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №1 (46). С. 61–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-61-68.
16. Коллеров М.Ю., Егорова М.В., Ртищев С.Н., Орешко Е.И. и др. Экспериментально-теоретическое обоснование алгоритма раннего ортодонтического лечения детей с односторонней расщелиной губы и неба несъемными аппаратами // *Стоматология детского возраста и профилактика*. 2011. Т. 10. №1. С. 23–27.
17. Antipov V.V., Oreshko E.I., Erasov V.S., Serebrennikova N.Y. Hybrid laminates for application in north conditions // *Mechanics of Composite Materials*. 2016. Vol. 52. No. 5. P. 973–990.
18. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Критические напряжения потери устойчивости в гибридных слоистых пластинах // *Материаловедение*. 2016. №11. С. 17–21.
19. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В. Об оценке повреждаемости металлических материалов методами механических испытаний // *Деформация и разрушение материалов*. 2015. С. 42–47.
20. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Повреждаемость материалов при статическом растяжении // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 91–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-91-94.
21. Griffith A.A. The Phenomenon of Rupture and flow in solids // *London Royal Society*. 1921. Vol. 221. Ser. A. P. 163–198.
22. Морозов Е.М. Введение в механику развития трещин: учеб. пособие. М.: МИФИ, 1977. С. 36–39.
23. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Деформация и разрушение как процессы изменения объема, площади поверхности и линейных размеров в нагружаемых телах // *Труды ВИАМ: электрон.*

- науч.-технич. журн. 2016. №8. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.09.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.
24. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Площадь свободной поверхности как критерий хрупкого разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 69–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-69-79.
 25. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Т. 2: Механические испытания. Конструкционная прочность. С. 232–233.
 26. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М. Наука, 2015. С. 68–71.
 27. Керштейн И.М., Клюшников В.Д., Ломакин Е.В., Шестериков С.А. Основы экспериментальной механики разрушения. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1989. С. 42–46.
 28. Швечков Е.И. Анализ российских и зарубежных методов испытаний на статическую трещиностойкость авиационных материалов // *Технология легких сплавов*. 2016. №1. С. 99–106.
 29. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Изд-во стандартов, 1985. 61 с.
 30. ОСТ1 90356–84. Металлы. Метод определения статической трещиностойкости (вязкости разрушения) обшивочных материалов при плоском напряженном состоянии. М., 1984. 31 с.
 31. ОСТ1 92122–88. Металлы. Метод определения кривой сопротивления распространению трещины при статическом нагружении (*R*-кривой) обшивочных материалов при плоском напряженном состоянии. М., 1988. 32 с.
 32. ASTM E 561-10. Standard Test Method for K-R Curve Determination. American Society for Testing and Materials, 2010.
 33. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. С. 134–135.
 34. Zhu X.-K., Joyce J.A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization // *U.S. Navy Research*. 2012. Paper 49.
 35. ASTM E 1290-08. Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement. American Society for Testing and Materials, 2008.
 36. ASTM E 2472-06. Standard Test Method for Determination of Resistance to Stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions. American Society for Testing and Materials, 2006.
 37. ASTM E 1820-11. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. American Society for Testing and Materials, 2011.
 38. ASTM E 1922-04. Standard Test Method for Translaminar Fracture Toughness of Laminated and Pultruded Polymer Matrix Composite Materials. American Society for Testing and Materials, 2010.