

УДК 620.178.6

В.С. Ерасов¹, Е.И. Орешко¹**ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ КАК ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА, ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ И ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ В НАГРУЖАЕМЫХ ТЕЛАХ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11

С учетом факта обладания точкой на поверхности твердого тела потенциальной энергией, избыточной по сравнению с точкой внутри объема тела, разработаны модели деформирования и разрушения нагружаемых тел вследствие процессов изменения объема, площади поверхности и линейных размеров тела. Проведена оценка размеров дефекта от поры до критических размеров трещины в зависимости от локальности концентрации энергии в объеме тела, показана возможность подрастания дефектов до критических размеров.

Представлено сравнение условий потери устойчивости в развитии трещины по критерию Гриффитса и критерию, полученному в работе.

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.*

Considering the possession fact a point on a surface of a firm body superfluous in comparison with a point in body volume potential energy, models of deformation and destruction of loaded bodies at the expense of processes of change of volume, the areas of a surface and the linear sizes of a body are developed. The assessment of the extent of defect from a time to the critical sizes of a crack depending on locality of concentration of energy in body volume is carried out, possibility of growth of defects till the critical sizes is shown.

Comparison of conditions of loss of stability in crack development by Griffith criterion and to the criterion received in work is presented.

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 non-metallic 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

Для оптимального проектирования машин и конструкций необходимо знание условий, при которых в материале будут достигнуты предельные состояния при статических и циклических режимах эксплуатационного нагружения. Требуется проведение

большого количества механических испытаний образцов, элементов конструкций, самих машин и конструкций, чтобы определить эти условия и выбрать необходимые запасы по расчетам на прочность, обеспечивающие полный цикл эксплуатации [1–3]. В качестве основных критериев для определения условий достижения предельных состояний используются силовые, деформационные и энергетические критерии. В работе [4] отмечено, что деформационные критерии достижения предельных состояний предпочтительнее для взаимосвязанного анализа прочности и ресурса.

Разрушение и отказ конструкций возникают, как правило, вследствие накопления повреждений при эксплуатации. Расчетные методы по определению работоспособности конструкций разрабатываются с учетом результатов испытаний образцов из материалов конструкций, наиболее распространенными из которых являются испытания на статическое растяжение [5–12]. Результат испытания на статическое растяжение – диаграмма деформирования образца, которая дает наглядное представление о поведении материала и его механических свойствах в упругой и пластической областях. В работах [13–16] рассмотрено взаимодействие основных факторов при испытаниях на растяжение образцов материалов: деформации (ϵ), напряжения (σ) и времени (t). Даны преимущества представления процессов испытаний и их результатов в 3D-системе осей – σ – ϵ – t . Введение координаты времени дает наглядное представление о том, что ни силовой, ни энергетический, ни деформационный критерии не исключают повреждаемости образца, и со временем образец, накапливая повреждения, может разрушиться.

Опыт, накопленный при исследовании механических свойств твердых деформируемых тел, показывает, что с помощью характеристик деформации, определяющих изменение положения отдельных точек тела друг относительно друга (относительных линейных деформаций ϵ и сдвигов τ), часто трудно построить физическую модель деформирования и разрушения твердых деформируемых тел, особенно тех, которые претерпевают значительные неупругие деформации. В то же время достаточно очевидным является тот факт, что деформирование твердого тела и процесс его разрушения проходят с изменением объема тела и площади его свободной поверхности. Точка на поверхности твердого деформируемого тела обладает избыточной, по сравнению с точкой внутри объема тела, потенциальной энергией. Как в жидкости, так и в твердом теле поверхность стремится быть минимальной по площади. Образование новой поверхности требует затрат энергии, доставляемой телу либо извне, либо путем перераспределения энергии внутри тела.

Цель данной работы – разработка моделей деформирования и разрушения твердого деформируемого тела как процессов изменения его объема, площади поверхности и линейных размеров. При этом учитывается, что не вся выделяемая при образовании новой свободной поверхности энергия расходуется на образование поверхности. Часть энергии рассеивается в виде тепла, звуковых и электромагнитных волн.

Материалы и методы

В качестве примера рассмотрим процесс деформирования при растяжении длинного стержня круглого поперечного сечения из изотропного материала (рис. 1).

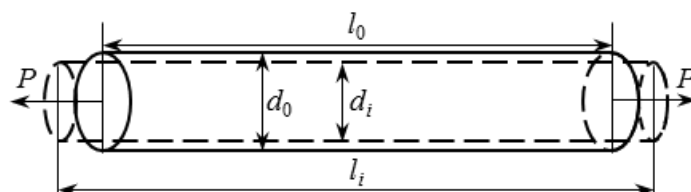


Рис. 1. Исходное (при диаметре d_0) и деформированное (при диаметре d_i) состояние цилиндрического образца на растяжение

Пусть ε – относительная продольная деформация стержня при приложении к нему растягивающей нагрузки, μ – коэффициент Пуассона. В пределах упругости ($0 < \mu < 0,5$) относительное изменение расстояния между точками на образующей стержня или параллельных ей прямых равно ε . Относительное изменение площади боковой поверхности стержня равно $\varepsilon(1-\mu)$, а относительное изменение объема: $\varepsilon(1-2\mu)$. Данные значения получены при условии, что $\varepsilon \leq 1$, которое позволяет пренебречь (за их малостью) дополнительными слагаемыми, представляющими собой величины порядка ε^2 и ε^3 . Таким образом, в пределах упругой деформации по отношению к исходным величинам, менее всего меняется объем, за ним идет изменение поверхности и наибольшее относительное изменение претерпевает линейная деформация. Увеличение площади поверхности образца проходит только за счет упругой деформации. Процессы изменения объема, площади поверхности и линейных размеров являются обратимыми.

Результаты

В ходе нагружения стержня сила P совершает работу над образцом, и эта работа преобразуется в потенциальную энергию или энергию деформации, которая накапливается в образце. Если затем силу P медленно снять, то стержень вернется к своей исходной длине. В течение такого процесса разгрузки энергия деформации, накопленная в стержне, может быть возвращена в виде работы. Таким образом, стержень действует подобно упругой пружине, которая может накапливать и отдавать энергию при приложении или снятии нагрузки.

Полная работа, совершенная силой P , равна энергии деформации, накопленной в стержне:

$$A = \frac{1}{2} P(l_i - l_0) = \frac{1}{2} P \cdot \Delta l, \quad (1)$$

где l_0 и l_i – начальная и конечная, после деформирования, длина образца (рис. 1); Δl – абсолютное удлинение.

Это выражение справедливо только в том случае, когда для материала соблюдается закон Гука, при этом внешняя сила P связана с удлинением соотношением:

$$\Delta l = Pl_0 / (EF) \text{ или } \sigma = E\varepsilon, \quad (2)$$

где $P/F = \sigma$ – растягивающее напряжение; E – модуль упругости; F – площадь поперечного сечения образца; $\varepsilon = \Delta l / l_0$ – соответствующая относительная деформация; $\Delta l = l_i - l_0$.

Иногда полезно рассмотреть удельную энергию деформации Θ (удельную работу единицы объема). Для равномерно растянутого стержня эту энергию можно получить, разделив полную энергию деформации A на объем стержня:

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

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

Поскольку $\varepsilon(1-2\mu) \leq 1$, то данное выражение можно представить как

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

Удельную энергию деформации можно представить в виде следующего выражения:

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

где k – константа; ε_y – предельная упругая деформация.

Увеличение площади поверхности образца происходит вследствие пластического выхода материала из объема на поверхность образца. При этом часть энергии, затрачиваемой на образование новой поверхности, рассеивается за счет нагрева образца, излучения звуковых и электромагнитных волн, что делает процесс необратимым.

Если по какой-либо причине развитие пластической деформации невозможно, увеличение площади поверхности происходит за счет образования пор и трещин. При этом часть энергии, затрачиваемой на образование новой поверхности, также рассеивается за счет излучения звуковых и электромагнитных волн. Хрупкое трещинообразование происходит с высокими скоростями появления дополнительной поверхности, причем сразу двух поверхностей, чего не происходит при пластической деформации. Ясно, что этот процесс необратим.

Таким образом, и пластическая деформация, и разрушение представляют один и тот же процесс образования новой свободной поверхности. Различие заключается в механизмах протекания этого процесса.

Из представленных моделей деформирования ясно, что наибольшие значения при упругой деформации имеет относительная продольная деформация стержня (ϵ).

Пусть в некоторой области твердого тела «1» накопленная потенциальная энергия деформирования превысит значение $V_1 k \epsilon_y^2$ на величину $A_{\text{доп}}$. Условие начала процесса разрушения в области «1»: $A_{\text{доп}} > 0$. Формула (6) представляет равенство энергий в объеме V_1 до начала процесса разрушения и после образования одного очага разрушения со свободной поверхностью площадью S_1 .

$$V_1 k \epsilon_y^2 + A_{\text{доп}} = \gamma S_1 + A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S_1 + V_1 k \epsilon_y^2 - V_2 k \epsilon_y^2, \quad (6)$$

где γ – работа, затраченная на образование единицы новой поверхности (поверхностная энергия); $A_{\text{изл}}^{\text{уд}}$ – диссипативная энергия (константа) тепловых и звуковых волн из зоны разрушения, затраченная на образование единицы новой поверхности; V_2 – объем области вокруг образовавшегося дефекта, разгрузившего данную зону.

Схематично значение $V_1 k \epsilon_y^2$ представлено как потенциальная энергия деформирования образца до разрушения, а $V_2 k \epsilon_y^2$ – как область вокруг образовавшегося дефекта, разгрузившего данную зону (рис. 2).

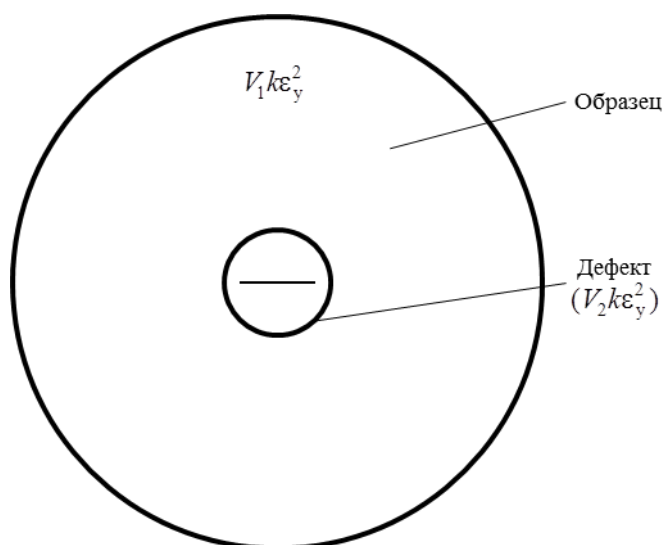


Рис. 2. Потенциальная энергия деформирования образца до разрушения и область вокруг образовавшегося дефекта

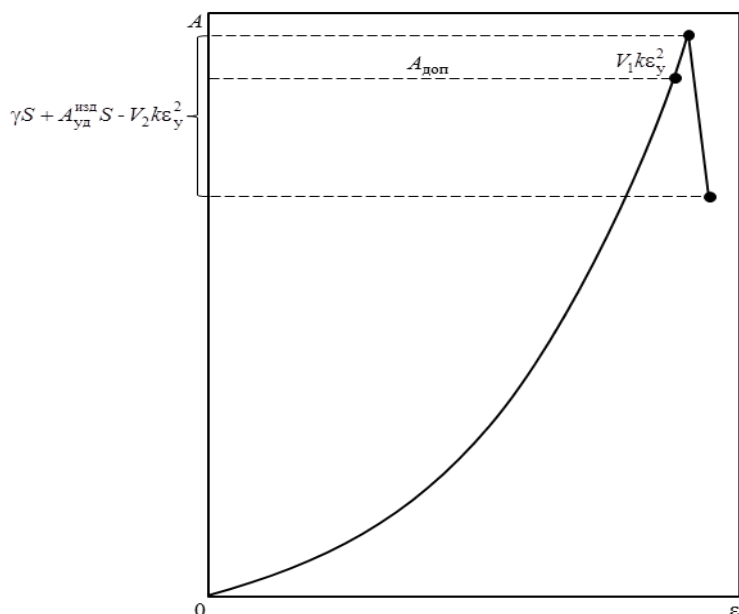


Рис. 3. Полная работа, затраченная на деформирование образца при появлении дефекта

Графически формула (6) представлена на рис. 3 с характерными точками, соответствующими исходному объему V_1 образца до разрушения и объему V_2 , который соответствует области вокруг образовавшегося дефекта, разгрузившего данную зону. Объем V_2 вокруг свободной поверхности дефекта для сохранения размерности можно представить в виде

$$V_2 = aS^{3/2}, \tag{7}$$

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

В результате преобразований получаем

$$A_{\text{доп}} = \gamma S + A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S - aS^{3/2} k \epsilon_y^2. \tag{8}$$

Продифференцируем дополнительную работу по площади образовавшейся поверхности образца

$$\frac{\partial A_{\text{доп}}}{\partial S} = A_1 - BS^{1/2}, \tag{9}$$

где $A_1 = \gamma + A_{\text{изл}}^{\text{уд}}$ – суммарная энергия при образовании единицы новой поверхности; $B = \frac{3}{2} a k \epsilon_y^2$.

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

- $A_1 - BS^{1/2} > 0$, то энергии недостаточно для развития разрушения образца;
- $A_1 - BS^{1/2} = 0$, то данный случай является критическим состоянием, при котором любое приращение работы приведет к развитию разрушения;
- $A_1 - BS^{1/2} < 0$, то происходит развитие разрушения образца.

Запишем полученные условия в другом виде:

- если $S = \left(\frac{A_1}{C \epsilon_y^2} \right)^2$, где $C = 3/2 ak$ – константа, то данный случай является критическим состоянием, при котором любое приращение работы приведет к развитию разрушения;

– если $S > \left(\frac{A_1}{C\varepsilon_y^2}\right)^2$, то при данном размере дефекта будет происходить развитие разрушения образца.

Таким образом, можно выразить зависимость полной энергии деформации образца от площади образовавшейся свободной поверхности, которая представлена графически на рис. 4.

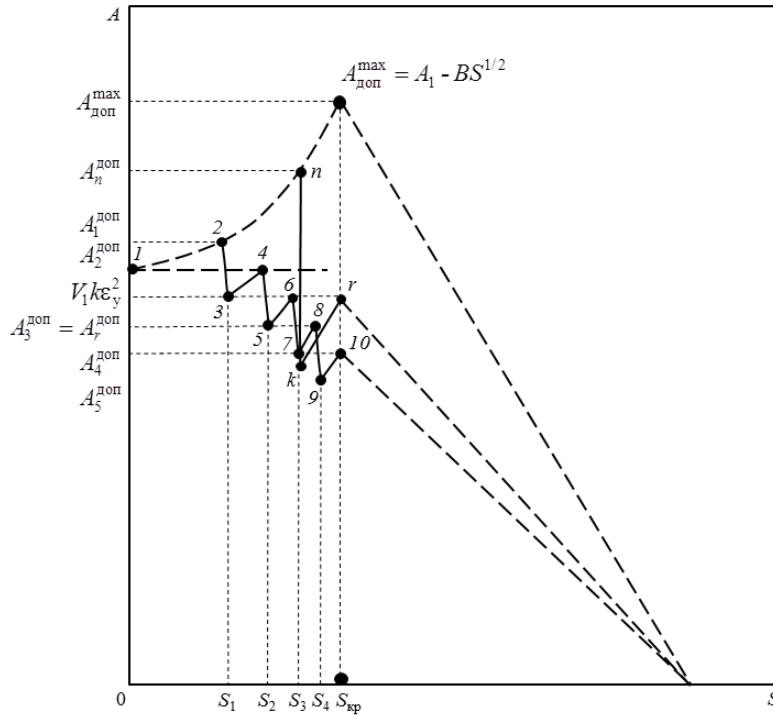


Рис. 4. Зависимость полной работы деформации образца от площади образовавшейся свободной поверхности

Процесс образования и развития дефекта при деформировании образца происходит стадийно и зависит от величины дополнительной работы $A_{доп}$. Так при $A_{доп} = A_{доп}^{max}$ произойдет спонтанное распространение дефекта. При $A_{доп} < A_{доп}^{max}$ развитие дефекта будет происходить в несколько стадий. Рассмотрим в качестве примера кривые зависимости площади образовавшейся поверхности от величины совершенной работы, обозначенные цифрами 1–10 и $n-r$ на рис. 4. В случае кривой 1–10 можно выделить следующие стадии в образовании и развитии дефекта:

– **отрезок 1–2** – в некоторой области образца, обозначенной точкой «1», накопленная потенциальная энергия деформирования превысила значение $V_1 k \varepsilon_y^2$ на величину $A_1^{доп}$, что можно выразить суммой $V_1 k \varepsilon_y^2 + A_1^{доп}$;

– **отрезок 2–3** – при равенстве энергий в объеме V_1 до начала процесса разрушения и после образования одного очага разрушения со свободной поверхностью площадью S_1 получим $\gamma S_1 + A_{изл}^{уд} S_1 + V_1 k \varepsilon_y^2 - V_2 k \varepsilon_y^2$;

– **отрезок 3–4** – накопленная потенциальная энергия деформирования превысила значение $V_2 k \varepsilon_y^2$ на величину $A_2^{доп}$, что можно выразить суммой $V_2 k \varepsilon_y^2 + A_2^{доп}$;

– **отрезок 4–5** – при равенстве энергий в объеме V_2 до начала процесса разрушения и после образования одного очага разрушения со свободной поверхностью площадью S_2 получим $\gamma S_2 + A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S_2 + V_2 k \varepsilon_y^2 - V_3 k \varepsilon_y^2$;

– **отрезок 5–6** – накопленная потенциальная энергия деформирования превысила значение $V_3 k \varepsilon_y^2$ на величину $A_3^{\text{доп}}$, что можно выразить суммой $V_3 k \varepsilon_y^2 + A_3^{\text{доп}}$;

– **отрезок 6–7** – при равенстве энергий в объеме V_3 до начала процесса разрушения и после образования одного очага разрушения со свободной поверхностью площадью S_3 получим $\gamma S_3 + A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S_3 + V_3 k \varepsilon_y^2 - V_4 k \varepsilon_y^2$;

– **отрезок 7–8** – накопленная потенциальная энергия деформирования превысила значение $V_4 k \varepsilon_y^2$ на величину $A_4^{\text{доп}}$, что можно выразить суммой $V_4 k \varepsilon_y^2 + A_4^{\text{доп}}$;

– **отрезок 8–9** – при равенстве энергий в объеме V_4 до начала процесса разрушения и после образования одного очага разрушения со свободной поверхностью площадью S_4 получим $\gamma S_4 + A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S_4 + V_4 k \varepsilon_y^2 - V_5 k \varepsilon_y^2$;

– **отрезок 9–10** – данный участок $V_5 k \varepsilon_y^2 + A_5^{\text{доп}}$ предшествует образованию свободной поверхности площадью $S_{\text{кр}}$, при которой будет происходить моментальное разрушение образца.

При приложении к накопленной потенциальной энергии деформирования значения, значительно большего $V_1 k \varepsilon_y^2$ на величину $A_n^{\text{доп}}$, будет наблюдаться всего три стадии в образовании и развитии дефекта:

– **отрезок 1–n** – при котором приращение энергии составит $V_1 k \varepsilon_y^2 + A_n^{\text{доп}}$;

– **отрезок n–k** – при равенстве энергий в объеме V_1 до начала процесса разрушения и после образования одного очага разрушения со свободной поверхностью площадью S_3 получим $\gamma S_1 + A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S_1 + V_1 k \varepsilon_y^2 - V_n k \varepsilon_y^2$;

– **отрезок k–r** – накопленная потенциальная энергия деформирования превысила значение $V_n k \varepsilon_y^2$ на величину $A_r^{\text{доп}}$, что можно выразить суммой $V_n k \varepsilon_y^2 + A_r^{\text{доп}}$, при этом площадь образовавшейся поверхности будет равна $S_{\text{кр}}$, при которой будет происходить мгновенное разрушение твердого тела.

Описанный постадийный процесс разрушения твердого тела можно представить в координатах «нагрузка–длина образца» (рис. 5).

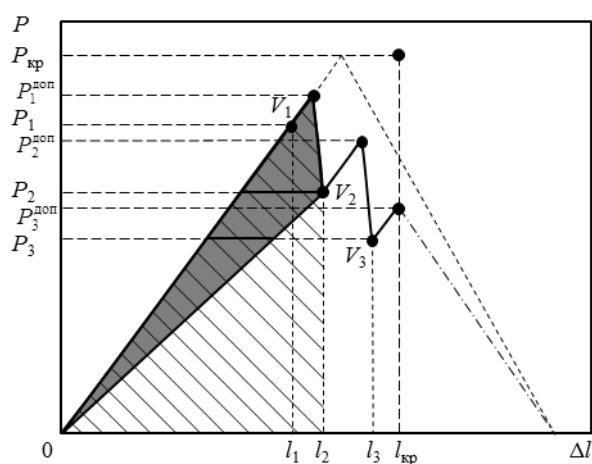


Рис. 5. Зависимость нагрузки от длины образца при хрупком разрушении твердого тела

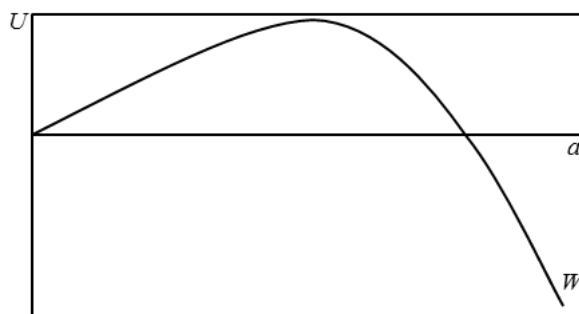


Рис. 6. Зависимость потенциальной энергии от длины трещины (W – общая энергия трещины Гриффитса) [17]

В данном случае полная работа, затраченная на деформирование образца до образования дефекта объемом V_2 , будет являться площадью заштрихованного треугольника, а диссипативная работа, рассеянная в виде тепла и других эффектов, – площадью треугольника, выделенного цветом.

Сравним полученную зависимость полной работы деформации образца от площади образовавшейся свободной поверхности с критерием Гриффитса для хрупкого разрушения материалов.

Критерий Гриффитса для разрушения тела, содержащего трещину с полудлиной a , может быть получен из данных рис. 6, на котором изображена зависимость энергии от длины трещины. Например, при плоском напряженном состоянии общая энергия

$$W = U + S = -\frac{1}{2} \frac{\sigma^2 \pi a^2}{E} + 2\gamma a, \quad (10)$$

где U – потенциальная энергия; S – поверхностная энергия; a – полудлина трещины.

Максимум кривой определяется из условия $\frac{\partial W}{\partial a} = 0$, откуда $\frac{\sigma^2 \pi a}{E} = 2\gamma$.

Полученная в данной работе зависимость полной работы деформации образца от площади образовавшейся свободной поверхности в сравнении с критерием Гриффитса для хрупкого разрушения материалов является более точной, так как в ней характер разрушения зависит от величины затрачиваемой дополнительной работы.

Критическая площадь поверхности дефекта, при увеличении которой произойдет мгновенное разрушение образца, выражается формулой

$$S_{\text{кр}} = \left(\frac{2\gamma + 2A_{\text{изл}}^{\text{уд}}}{3ak\epsilon_y^2} \right)^2. \quad (11)$$

После образования дефекта энергия в объеме снижается, потому что часть ее превращается в поверхностную энергию и энергию диссипации. Из-за появления концентратора напряжений следующее нагружение вызовет развитие появившегося дефекта.

Таким образом, разработанная модель деформирования и разрушения твердого тела (как процессов изменения объема, площади поверхности и линейных размеров) позволяет оценить размер дефекта в зависимости от локальности концентрации энергии в объеме тела и показывает возможность подрастания дефектов до критических размеров.

Обсуждение и заключения

Разработана модель деформирования и разрушения твердого деформируемого тела, а в которой происходят процессы изменения объема, площади поверхности и линейных размеров нагружаемого тела. При этом учитывается, что не вся выделяемая при образовании новой свободной поверхности энергия расходуется на образование поверхности. Часть энергии рассеивается в виде тепла, звуковых и электромагнитных волн.

Проведена оценка размеров дефекта от поры до критических размеров трещины в зависимости от локальности концентрации энергии в объеме тела, показана возможность подрастания дефектов до критических размеров.

Представлено сравнение условий потери устойчивости при развитии трещины по критерию Гриффитса и критерию, полученному в данной работе.

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., Гращенков Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ // *Сб. докл. IX Международ. 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: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ. 2007. С. 370–379.
4. Гаденин М.М. Оценка влияния режимов нагружения на условия достижения предельных состояний и назначения запасов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2013. Т. 79. №10. С. 65–70.
5. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: метод. пособие. М.: ВИАМ, 2011. 16 с.
6. 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.
7. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Особенности расчетов устойчивости стержней и пластин // *Авиационные материалы и технологии*. 2017 (в печати).
8. 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.
9. 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.
10. 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 структуры // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 33–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-33-48.
11. 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 алюминийлитиевого сплава и слоистого алюмокомпозитного пластика // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №1 (40). С. 53–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-53-61.

12. Антипов В.В., Орешко Е.И., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю. Гибридные слоистые материалы для применения в условиях Севера // *Механика композитных материалов* 2016 (в печати).
13. Ерасов В.С., Байрамуков Р.Р. Роль фактора времени при проведении механических испытаний, обработке данных и представлении результатов // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 62–67.
14. Ерасов В.С., Байрамуков Р.Р., Нужный Г.А. Определение скорости пластической деформации при испытании на растяжение // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2014. Т. 80. №5. С. 61–63.
15. 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: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-91-94.
16. 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 (в печати).
17. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения: пер. с англ. М.: *Металлургия*, 1978. С. 97–98.