

УДК 620.171

В.С. Ерасов¹, Е.И. Орешко¹, А.Н. Луценко¹**ОБРАЗОВАНИЕ НОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ НА СТАДИЯХ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЙ, НАЧАЛА И РАЗВИТИЯ РАЗРУШЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-12-12

Представлены модели образования новых поверхностей в твердом теле на стадиях упругой и пластической деформаций, начала и развития хрупкого разрушения, разрушения с наличием пластической деформации. Проведена оценка энергетических затрат, необходимых для образования единицы новой поверхности, а также влияния на эти затраты пластического деформирования. Представлен метод определения поверхностной энергии материала для хрупких тел.

Ключевые слова: потенциальная энергия, поверхность твердого тела, упругая деформация, пластическая деформация, модель деформирования, модель разрушения, цилиндрический изотропный образец.

V.S. Erasov¹, E.I. Oreshko¹, A.N. Lutsenko¹**FORMATION OF NEW SURFACES IN A FIRM BODY AT STAGES OF ELASTIC AND PLASTIC DEFORMATIONS, THE BEGINNING AND DESTRUCTION DEVELOPMENT**

Models of formation of new surfaces in a firm body at stages of elastic and plastic deformations, the beginning and development of fragile destruction, destruction with existence of plastic deformation are presented. The assessment of the power expenses necessary for formation of unit of a new surface, and as influences on these expenses of plastic deformation is carried out. The method of determination of superficial energy of a material for fragile bodies is presented.

Keywords: potential energy, surface of a firm body, elastic deformation, plastic deformation, deformation model, destruction model, cylindrical isotropic sample.

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

Вследствие отсутствия симметрии пространственных связей, окружающих частицу твердого тела (атом или молекулу) на поверхности, поверхность твердого тела обладает избыточной, по сравнению с остальной массой тела, потенциальной энергией. Образование новой поверхности требует энергии, доставляемой телу либо извне, например путем механического нагружения или нагрева, либо за счет перераспределения энергии внутри тела. Явление образования новой свободной поверхности в процессе деформирования тела объединяет процессы деформирования и разрушения. Из закона сохранения энергии при явлении образования новой поверхности тела получена простая модель этого процесса. Представлены энергетические характеристики тела, связанные с процессом образования свободной поверхности: удельная объемная энергия упругой деформации; удельная поверхностная энергия; удельная рассеиваемая энергия (энергия диссипации), затраченная на нагрев и излучение; удельная энергия

пластического деформирования; критическая интенсивность освобождающейся энергии; джей-интеграл.

Пластическая деформация твердых тел, например металлических материалов, с одной стороны, является показателем технологичности при изготовлении детали или конструкции из полуфабриката материала. В этом случае стремятся к тому, чтобы деформация не привнесла в деталь и конструкцию дополнительные дефекты, снижающие их несущую способность или ресурс эксплуатации. С другой стороны, появление и рост пластической деформации при эксплуатации конструкций крайне нежелателен, поскольку приводит к появлению концентраторов деформаций, появлению трещин и как результат – сначала к понижению несущей способности конструкции, а затем и к ее разрушению. В этом случае пластическую деформацию можно назвать деформационным шагом к разрушению. Явление образования новой свободной поверхности, представленное с энергетических позиций, объединяет упругую деформацию, пластическую деформацию и разрушение. Различие заключается в механизмах и скоростях протекания процессов образования новой свободной поверхности в условиях упругой деформации, пластической деформации и собственно разрушения. Упругая деформация, энергия упругой деформации и увеличение площади поверхности обратимы: со снятием деформации исчезает потенциальная энергия упругой деформации, а поверхность возвращается к исходным размерам. При хрупком разрушении образование поверхности разрушения происходит гораздо быстрее, чем при пластическом деформировании. При пластическом деформировании доставляемая телу извне энергия тратится на энергозатратное изменение структуры, например размножение дислокаций, их продвижение к поверхности тела и дополнение ее новой площадью (атомами или молекулами), либо на слияние дислокаций с образованием свободной поверхности внутри тела. Вследствие значительных энергетических потерь образовавшаяся поверхность не исчезает при снятии упругой деформации.

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») [1–3].

Модели деформирования и разрушения

В качестве примера рассмотрим процесс деформирования при растяжении участка длинного стержня из изотропного материала [4, 5]. Пусть ε – относительная продольная деформация стержня при приложении к нему растягивающей нагрузки, μ – коэффициент Пуассона. В пределах упругости $0 < \mu < 0,5$ относительное изменение площади боковой поверхности стержня равно $\varepsilon(1-\mu)$, объема: $\varepsilon(1-2\mu)$. Данные значения получены при условии, что $\varepsilon \ll 1$, 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. Величина энергии, затраченной на образование новой поверхности только за счет упругой деформации атомов, является незначительной частью энергии, подведенной к телу. Процессы изменения объема, площади поверхности и линейных размеров являются обратимыми.

При появлении и росте пластической деформации коэффициент Пуассона также увеличивается и достигает значения $\mu=0,5$. При только пластической деформации ($\mu=0,5$) теоретически объем не меняется, изменение поверхности может достичь больших величин, а относительное изменение линейных размеров ε стать >1 . Увеличение

площади поверхности образца проходит в основном вследствие пластического выхода материала из объема на поверхность образца [6, 7]. При этом величина энергии, затраченной на образование новой поверхности, является (как и в случае упругой деформации) только частью энергии, подведенной к телу. Основная энергия расходуется на внутренние структурные преобразования, а часть энергии рассеивается за счет нагрева образца, излучения звуковых и электромагнитных волн (энергия диссипации). Большая величина рассеянной энергии делает процесс необратимым.

При достижении предельного значения упругой деформации или упругого напряжения, а в совокупности предельного значения удельной объемной энергии упругой деформации, если по какой-либо причине развитие пластической деформации невозможно, увеличение площади поверхности происходит вследствие образования пор и роста трещин [8]. При образовании свободной поверхности энергетически выгодно сначала образование поры в виде сферы. Сфера, при минимальной площади образованной поверхности позволяет энергетически разгрузить максимальный объем, уменьшая потенциальную энергию тела. При этом часть энергии, затрачиваемой на образование новой поверхности, рассеивается за счет излучения звуковых и электромагнитных волн. Критический радиус поры, больше величины которой становится энергетически выгодным дальнейшее образование поверхности в твердом теле, прямо пропорционален величине поверхностной энергии и обратно пропорционален удельной объемной энергии упругой деформации твердого упругого тела:

$$R_{\max} = \frac{2(\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}})}{1/2\sigma_y \epsilon_y} = \frac{2(\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}})}{U}, \quad (1)$$

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 при образовании единицы новой поверхности; σ_y – предельное упругое напряжение; ϵ_y – предельная упругая деформация; U – удельная объемная энергия упругой деформации.

При образовании поры меньших размеров, напряжение вокруг нее падает. Вследствие образования новой поверхности в виде множества пор, тело одновременно поглощает подведенную к нему энергию и увеличивает свою потенциальную энергию. Увеличение напряжения вызовет рост и деформацию пор, а также их слияние с образованием трещины [5]. Из-за возможности высокой концентрации напряжения, деформации и энергии в малых объемах, критический размер новой поверхности для самопроизвольного развития хрупкого трещинообразования мал, а скорость трещинообразования высокая.

Пластическая деформация может увеличивать новую поверхность путем увеличения площади внешней поверхности образца, а также образовывать ее внутри него в виде трещин.

Различие в процессах образования и развития новой свободной поверхности при хрупком разрушении и пластическом деформировании заключается в механизмах протекания процессов и энергетических затратах на их реализацию. В случае упругого твердого тела силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения являются критериями, оценивающими напряженно-деформированное состояние материала локально, теоретически – в точке тела. Связь между критериями представлена уравнением [8–10]:

$$\frac{K_{1c}^2 (1 - \mu^2)}{E} = 2\delta_{1c} \sigma_b = G_{1c} = J_{1c} = 2\gamma, \quad (2)$$

где K_{1c}^2 – критический коэффициент интенсивности напряжений, силовой критерий разрушения; E – модуль нормальной упругости; δ_{1c} – критическое раскрытие в вершине трещины, деформационный критерий разрушения; σ_b – предел прочности; G_{1c} – критическая интенсивность освобождающейся энергии, энергетический критерий разрушения; J_{1c} – критический джейн-интеграл, энергетический критерий разрушения.

Определение критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} [9], предела прочности σ_b , модуля нормальной упругости E и коэффициента Пуассона μ позволяет рассчитать значения остальных характеристик трещиностойкости хрупкого тела, в том числе величину поверхностной энергии.

Достижение критерия разрушения вызовет высокоскоростное полное разрушение. Медленное подрастание трещины возможно только в условиях падения внешней нагрузки со скоростью, опережающей скорость развития поверхности разрушения. На рис. 1 представлена зависимость интенсивности освобождающейся энергии от размеров трещины согласно модели, представленной авторами в работе [8].

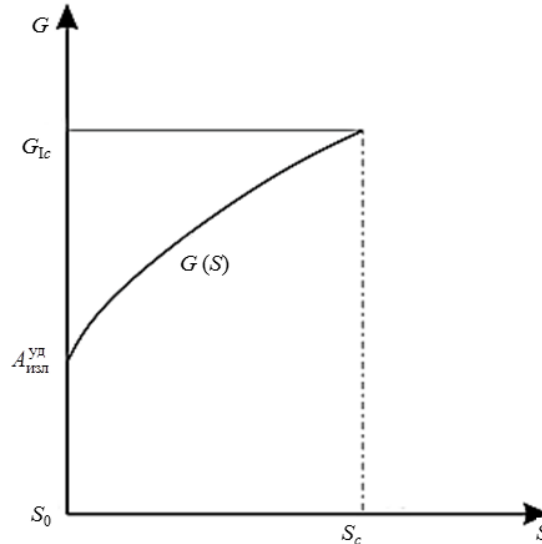


Рис. 1. Зависимость интенсивности освобождающейся энергии от размеров трещины (S_0 – исходная площадь поверхности трещины; S_c – критическая площадь поверхности трещины)

Используя параметр G , можно представить энергетический критерий разрушения в форме

$$G(\sigma, S) = R(S). \quad (3)$$

Функция $R(S)$ представляет зависимость удельного сопротивления (R –кривая) от роста размеров трещины. Трещина с площадью поверхности S_0 начнет распространяться либо при условии $G(\sigma_0, S_0) = G_{Ic}$, либо при напряжении $\sigma_c < \sigma_0$, когда трещина подросла за счет изменения внешней нагрузки таким образом, что в локальной зоне вершины трещины выполнялось условие уравнения (3). Существует напряжение, меньше которого трещина не растет, что наблюдается на практике. Получается, что даже в хрупком теле трещина способна медленно расти и останавливаться сообразно с изменением внешней нагрузки, особенно в условиях высокочастотной вибрации.

При растяжении образцов, обладающих пластической деформацией, трещина может не образоваться. Необходимую для разрушения (разделения тела на части) новую поверхность обеспечивает пластическая деформация. Пластическая деформация может развиваться равномерно по длине образца либо локально. Критерий локального разрушения надо искать в причине локализации деформации в ограниченном объеме образца и возможности ее свободного протекания в нем. Удельная энергия, затрачиваемая на пластическое деформирование, больше удельной энергии упругой деформации.

Реальные тела не изотропны. Деформационный хаос [7] на начальной стадии деформирования – типичное явление. Пластическое течение неоднородно. Оно тем неоднороднее, чем меньше масштаб [11]. Образование и рост пор, появление микротрещин также хаотично. Появление макротрещины локализует процессы появления новой

поверхности в области ее вершины и, вероятно, с сохранением хаоса, но в локализованной области – около вершины трещины. Остальной объем тела становится поставщиком энергии упругой деформации для этого процесса. В такой ситуации подход к определению критериев разрушения с позиций закона сохранения энергии при образовании и развитии свободной поверхности является наиболее рациональным.

Определение характеристик трещиностойкости, как правило, требует регистрации диаграммы «нагрузка P –смещение v » (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 [9, 12–14]. Характерные типы диаграмм « P – v » (рис. 2) специально представлены с одинаковой величиной максимальной нагрузки в точке C , чтобы наглядно представить энергетические затраты (площади под диаграммами), необходимые для развития трещины в теле с реализацией небольшой пластической деформации (I тип) и значительной пластической деформации (IV тип).

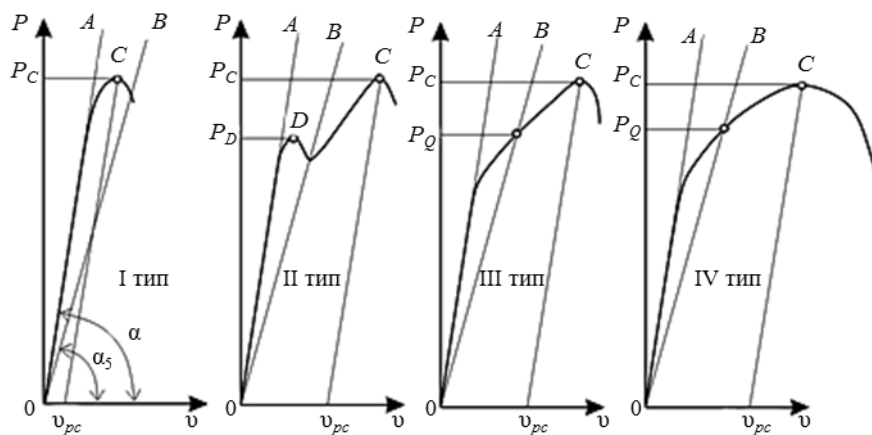


Рис. 2. Характерные типы диаграмм « P – v » (α – угол наклона линейного участка диаграммы к оси v ; α_5 – угол наклона прямой OB к оси v под углом, тангенс которого на 5% меньше тангенса угла α)

Критическое раскрытие трещины [9] определяют по формуле

$$\delta_c = \frac{K'_c{}^2(1-\mu^2)}{2\sigma_{0,2}E} + v_{pc}, \quad (4)$$

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

Полное смещение при нагружении представляет собой сумму упругого смещения, смещения за счет развития пластической деформации и за счет подрастания трещины. Раскрытие трещины складывается из упругой и пластической частей. Вид диаграмм « P – v » похож на диаграммы растяжения в координатах «нагрузка P –абсолютная деформация образца Δl ». Величина условного пластического смещения v_{pc} , аналогичная величинам абсолютного и относительного пластического удлинения при растяжении после разрушения, должна служить характеристикой, демонстрирующей сопротивление материала разрушению. Стандарт [9] предусматривает определение этой характеристики, но на практике для оценки качества материала ее определяют и используют редко. Одной из причин медленного внедрения в практику определения деформационных

характеристик трещиностойкости является трудность их экспериментальной оценки как в процессе испытания, так и после него – например, по изменению геометрических характеристик образца в зоне разрушения. Введение в практику испытаний на трещиностойкость деформационных характеристик, получаемых в процессе испытания с помощью обработки геометрических показателей вида деформированной области около вершины трещины на поверхности образца, а также получаемых обработкой геометрических показателей вида разрушенного образца, было бы весьма полезным для материаловедения.

Деформация – сложный процесс, но, несмотря на деформационный хаос, она развивается стадийно [15, 16]. Сначала реализуются механизмы с низкой энергией активации (упругая деформация), затем – с более высокой (пластическая деформация). Разные виды пластической деформации протекают с различными скоростями [17]. В сложных системах также возможно двойственное поведение – бифуркация [18]. В работе [15] отмечено, что стадии деформации одни и те же при разных видах испытаний. При испытании на растяжение образца можно выделить следующие стадии деформации.

1. Стадия упругой деформации – выполняется закон Гука, упругая деформация преобладает над остальными видами деформации на участке до 0,2%, далее упругая деформация медленно растет с увеличением напряжения до σ_b , а потом снижается.

2. Стадия микротекучести – микропластическая деформация в благоприятно ориентированных зернах, в приграничном слое у поверхности образца (деформация – от 0,2 до 0,4%) происходит микропластическая деформация металла, где ее наиболее интенсивное развитие наблюдается в приповерхностных слоях глубиной порядка размера зерна.

3. Стадия текучести – повышение плотности дислокаций, неомогенная пластическая деформация, полосы Чернова–Людерса, образование субмикротрещин (деформация – от 0,4 до 1–2%).

4. Стадия деформационного упрочнения – формирование дислокационной ячеистой структуры, образование субмикротрещин на поверхности порядка 1–2 мкм, процессы старения и фазовые превращения; завершается эта стадия достижением максимальной нагрузки и началом шейкообразования.

5. Период распространения трещин – от начала шейкообразования до полного разрушения материала.

На рис. 3 представлены типичные графики:

- график «нагрузка P –абсолютная деформация образца Δl »;
- диаграмма деформирования $\sigma=F(\epsilon)$;
- график «затраченная на деформирование образца работа A –новая поверхность образца S »;
- график «затраченная на деформирование образца работа A –абсолютная деформация образца Δl ».

Рассмотрим представленные графики на упругом участке деформирования (до $\Delta l_y, S_y, \epsilon_y$). Затраченная на упругое деформирование работа (энергия) равна

$$A = \int_0^{\Delta l} P(\Delta l) d(\Delta l) = V_1 \int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon = V_1 k \epsilon^2 = V_1 k_1 S_0^2, \quad (5)$$

где V_1 – объем рассматриваемого участка длинного стержня; k – коэффициент, равный $E/2$; k_1 – коэффициент, равный $E/2S_0^2(1-\mu)^2$; S_0 – исходная величина поверхности рассматриваемого участка стержня объемом V_1 .

Если взять нагруженный на стадии упругой деформации образец с новой поверхностью S_1 и совершить над ним дополнительную работу $A_{\text{доп}}$ (нагружение в пределах

упругой деформации до появления новой поверхности $S > S_1$), то энергетический баланс будет выглядеть следующим образом:

$$V_1 k_1 S_1^2 + A_{\text{доп}} = V_2 k_1 S^2, \quad (6)$$

тогда из формулы (6) при $V_2 \approx V_1$ вытекает

$$A_{\text{доп}} = V_1 k_1 S^2 - V_1 k_1 S_1^2 \quad (7)$$

и, соответственно,

$$\frac{\partial A_{\text{доп}}}{\partial S} = 2V_1 k_1 S > 0. \quad (8)$$

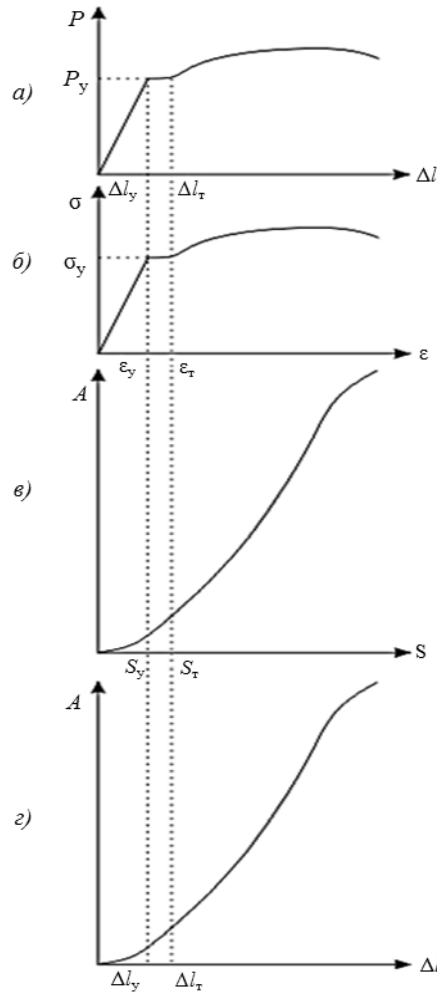


Рис. 3. Типичные графики: «нагрузка P –абсолютная деформация образца Δl » (а), диаграмма деформирования $\sigma = F(\varepsilon)$ (б), график «работа A –новая поверхность образца S » (в), график «работа A –абсолютная деформация образца Δl » (г), получаемые при растяжении стержня из материала с площадкой текучести

Освобождающейся при образовании новой поверхности упругой энергии на этом участке нет. Интенсивность освобождающейся энергии $G=0$.

Если бы образец был хрупким, он начал бы разрушаться на этом участке при достижении предельной упругой деформации ε_y . Условия начала хрупкого разрушения можно представить в виде уравнений (9) или (10) [8]. Пусть в области объема V_1 накопленная потенциальная энергия деформирования превысит значение $V_1 k \varepsilon_y^2$ на величину

$A_{\text{доп}}$. Хрупкое разрушения начнется, когда $A_{\text{доп}} > 0$. Формула (9) представляет собой равенство энергий в объеме V_1 до начала процесса разрушения и после образования одного очага разрушения со свободной поверхностью площадью S :

$$V_1 k \varepsilon_y^2 + A_{\text{доп}} = \gamma S - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S + V_1 k \varepsilon_y^2 - V_2 k \varepsilon_y^2, \quad (9)$$

где V_2 – объем разгруженной области вокруг образовавшейся свободной поверхности S .

Для многоочагового разрушения формула (9) примет вид

$$V_1 k \varepsilon_y^2 + A_{\text{доп}} = \gamma \sum_{i=1}^n S_i - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} \sum_{i=1}^n S_i + V_1 k \varepsilon_y^2 - k \varepsilon_y^2 \sum_{i=1}^n V_i, \quad (10)$$

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

$$V_2 = a S^{3/2}, \quad (11)$$

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

Из уравнения (9) следует

$$A_{\text{доп}} = \gamma S - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S - B S^{3/2}, \quad (12)$$

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

Представим формулу (9) графически (рис. 4).

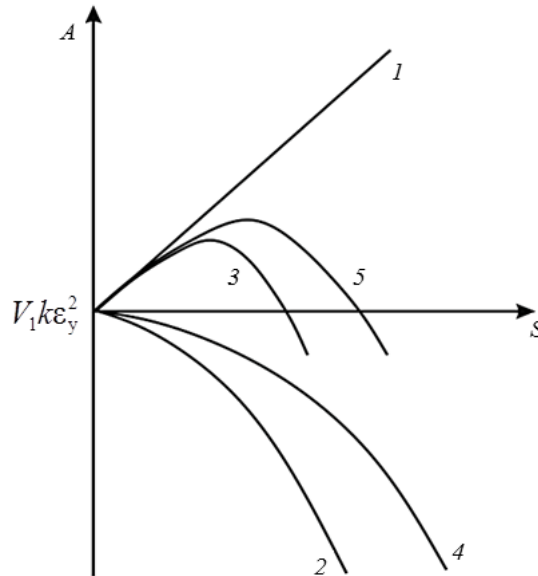


Рис. 4. Изменение потенциальной энергии в объеме V_1 :

1 – рост энергии по линейному закону вследствие 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 :

$$\frac{\partial A_{\text{доп}}}{\partial S} = A_1 - B_1 S^{1/2}, \quad (13)$$

где $A_1 = (\gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}})$ – увеличение потенциальной энергии при образовании единицы новой поверхности (константа); $B_1 = 3/2 \cdot a k \varepsilon_y^2 = 3/2 \cdot B$ – 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 $A_{\text{доп}}$ 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 (магистральная трещина) быстрее (меньше $S_{\text{кр}}$) приведет к разрушению, чем появление нескольких свободных поверхностей (мелкие трещины) $\sum_{i=1}^n S_i$ при

$S = \sum_{i=1}^n S_i$. Материалы с высокими значениями модуля упругости имеют меньший критический размер дефекта, так как $k = E/2$.

Интенсивность освобождающейся энергии G в объеме V_1 равна

$$G(S) = -\frac{\partial A_{\text{осв}}}{\partial S} = A_{\text{изл}}^{\text{уд}} + \frac{3}{2} B S^{1/2}. \quad (14)$$

Если хрупкого разрушения не происходит, а начинается пластическая деформация, то на участке площадки текучести (от Δl_y до Δl_T) условие начала процесса текучести можно представить в виде равенства энергий в объеме V_1 – до начала процесса и после образования свободной поверхности площадью S :

$$V_1 k \varepsilon_y^2 + A_{\text{доп}} = \gamma S - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S + V_1 k \varepsilon_y^2 + B^{\text{уд}} S - B_{\text{изл}}^{\text{уд}} S, \quad (15)$$

где $B^{\text{уд}}$ – работа, затраченная на пластическое деформирование нагружаемого объема образца для образования единицы новой поверхности (константа); $B_{\text{изл}}^{\text{уд}}$ – удельная диссипативная энергия тепловых и звуковых волн (константа) при образовании единицы новой поверхности за счет пластической деформации.

Из формулы (15) следует

$$A_{\text{доп}} = C \cdot S, \quad (16)$$

где C – константа, равная разнице затраченных и освобожденных (рассеянных или диссипативных) удельных энергий, затраченных на образование единицы новой поверхности, т. е.

$$C = \gamma - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} + B^{\text{уд}} - B_{\text{изл}}^{\text{уд}}. \quad (17)$$

Для выражения (17), вероятно, справедливы неравенства

$$\gamma \ll B^{\text{уд}} \text{ и } A_{\text{изл}}^{\text{уд}} \ll B_{\text{изл}}^{\text{уд}}, \quad (18)$$

соответственно тогда

$$\frac{\partial A_{\text{доп}}}{\partial S} = C > 0. \quad (19)$$

Освобождающейся энергии упругой деформации на этом участке нет. Однако существуют энергии диссипации ($A_{\text{изл}}^{\text{уд}}$ и $B_{\text{изл}}^{\text{уд}}$), благодаря которым процесс образования новой поверхности становится необратимым.

Стадия текучести характеризуется повышением плотности дислокаций, образованием полос Чернова–Людерса и субмикротрещин. На следующей стадии – стадии деформационного упрочнения происходит формирование дислокационной ячеистой структуры, образование субмикротрещин на поверхности размером порядка 1–2 мкм. Образование субмикротрещин и пор вызывает освобождение упругой энергии вокруг их свободных поверхностей. В этом случае всю образующуюся новую поверхность S следует разделить на две части: aS – поверхность, образованную путем пластической деформации, и bS – поверхность, образованную за счет разрушения с освобождением энергии упругой деформации, тогда получаем

$$S = aS + bS. \quad (20)$$

Равенство энергий в объеме V_1 на стадии деформирования после $\Delta l_t(S_t)$ до образования новой свободной поверхности площадью S имеет вид:

$$V_1 k \epsilon_y^2 + C(S_t - S_y) + A_{\text{доп}} = \gamma S - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} S + V_1 k \epsilon_y^2 + C(S_t - S_y) + aB^{\text{уд}} S - aB_{\text{изл}}^{\text{уд}} S - b^{3/2} B S^{3/2}; \quad (21)$$

$$A_{\text{доп}} = A_2 S - B_2 S^{3/2}, \quad (22)$$

где $A_2 = (\gamma + aB^{\text{уд}} - A_{\text{изл}}^{\text{уд}} - aB_{\text{изл}}^{\text{уд}})$ – затраты энергии на образование единицы новой поверхности, константа; $B_2 = b^{3/2} B$ – константа.

Продифференцируем дополнительную энергию по площади образовавшейся поверхности S :

$$\frac{\partial A_{\text{доп}}}{\partial S} = A_2 - B_3 S^{1/2}, \quad (23)$$

где $B_3 = 3/2 \cdot B_2 = 3/2 \cdot b^{3/2} a k \epsilon_y^2$.

Формула (23) по внешнему виду похожа на формулу (13), однако в формуле (23) константа $A_2 \gg A_1$, а константа $B_3 \ll B_1$, что наглядно представлено на рис. 3. На стадиях текучести и деформационного упрочнения свободная поверхность появляется в результате параллельного действия пластической деформации и разрушения до момента образования либо магистральной трещины, либо локализации пластической деформации. В зоне вершины магистральной трещины происходит концентрация напряжений и соответственно деформаций. Однако для реализации пластической деформации в зоне вершины необходимо еще и соответствующее объемное напряженное состояние (плоское

напряженное состояние), характерное для поверхности образца. Теоретически [19] размер зоны пластической деформации у вершины трещины на поверхности (при плоском напряженном состоянии) в 3 раза больше, чем у вершины трещины в глубине образца (при плоской деформации). При одинаковой величине упругой энергии около зоны вершины трещины влияние упругой энергии на рост трещины в условиях плоской деформации больше, поэтому трещина в глубине образца растет быстрее, чем на поверхности образца.

Обсуждение и заключения

Рассмотрено явление образования новых поверхностей в твердом теле на стадиях упругой и пластической деформаций, начала и развития разрушения.

Показано, что в упругой области величина энергии, затраченной на образование новой поверхности только за счет упругой деформации атомов, является незначительной частью энергии, подведенной к телу. Процесс изменения площади поверхности является обратимым. При достижении предельного значения удельной объемной энергии упругой деформации, если по какой-либо причине развитие пластической деформации невозможно, увеличение площади поверхности происходит вследствие образования пор и роста трещин. Из-за возможности высокой концентрации энергии в малых объемах хрупких тел критический размер новой поверхности для начала самопроизвольного развития трещинообразования мал, а скорость трещинообразования высокая. На начальном этапе разрушения энергетически выгодно образование пор в виде сферы. Сфера, при минимальной поверхности, позволяет разгрузить максимальный объем. Критический размер поры прямо пропорционален величине поверхностной энергии и обратно пропорционален удельной объемной энергии упругой деформации. Трещина даже в хрупком теле способна медленно расти и останавливаться сообразно с изменением внешней нагрузки.

При реализации небольшой пластической деформации механизмы образования новой поверхности близки к механизмам хрупкого разрушения. Пластическая деформация локализует места разрушения, энергию разрушения обеспечивает упругая деформация.

Способность тела к пластической деформации снижает опасность острой концентрации энергии. Начало пластического деформирования вызывает рост нагружаемого объема тела при незначительном изменении напряжения, возрастает потребляемая на деформирование энергия, а энергия упругой деформации увеличивается незначительно. При растяжении образцов, обладающих значительной пластической деформацией, трещина может и не образоваться. Необходимую для разрушения (разделения тела на части) новую поверхность обеспечивает пластическая деформация. Энергетические затраты на разрушение в результате пластического деформирования существенно больше затрат на хрупкое разрушение.

Следует отметить отсутствие современных отечественных национальных 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 джейн-интегральных характеристик разрушения материалов, актуализации имеющихся и разработки новых отечественных стандартов по их экспериментальному определению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
3. 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.
4. 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 (44). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.
5. 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.
6. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Шуклинов А.В., Денисов А.А. Динамика деформационных полос и разрушение алюминий-магниевого сплава АМг6 // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. №10. С. 1873–1878.
7. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А. Деформационный хаос и самоорганизация на стадии предразрушения сплава АМг6 // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. №10. С. 1879–1884.
8. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №10 (58). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-11-11.
9. 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.
10. 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.
11. Штремель М.А. Разрушение. М.: МИСиС, 2014. Кн.1: Разрушение материала. С. 66–113.
12. ОСТ1 90356–84. Металлы. Метод определения статической трещиностойкости (вязкости разрушения) обшивочных материалов при плоском напряженном состоянии. М., 1984. 31 с.
13. 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.
14. ASTM E 561-10. Standard Test Method for K-R Curve Determination. American Society for Testing and Materials, 2010.
15. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. С. 37–44.
16. Вильдеман В.Э., Третьяков В.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №2. С. 93–98.
17. Махутов Н.А., Москвитин Г.В. Влияние условий нагружения на накопление повреждений и разрушение // Машиностроение: энциклопедия. М.: Машиностроение, 2010. Т. II-I: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. С. 220–221.
18. Шанявский А.А. Синергетика эволюции металлов от частично замкнутой к открытой динамической системе при циклическом нагружении // Динамика сложных систем. 2007. Т. 1. №1. С. 90–104.
19. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. С. 73–77.