

УДК 620.1

В.С. Ерасов<sup>1</sup>, Е.И. Орешко<sup>1</sup>

**ПРИЧИНЫ ЗАВИСИМОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛА ОТ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64

*Рассмотрены причины зависимости механических характеристик трещиностойкости материала от размеров образца, представлены особенности современных конструкционных материалов, влияющие на характеристики трещиностойкости. На примере решения задачи о пластине с центральной трещиной представлены ограничения линейной механики разрушения. Предлагается оценивать в зоне вершины трещины синергизм многочисленных механизмов протекания процессов напряженно-деформационного взаимодействия элементов структуры, что позволит ввести в практику оценки характеристик трещиностойкости новые показатели качества материала, актуализировать имеющиеся и разработать новые стандарты по экспериментальному определению характеристик трещиностойкости.*

**Ключевые слова:** конструкционный материал, трещиностойкость, размер образца, металлическая атомная связь, ковалентная связь, многоуровневая модель, линейная механика разрушения, силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения, зона разрушения.

V.S. Erasov<sup>1</sup>, E.I. Oreshko<sup>1</sup>

**REASONS FOR DEPENDENCE OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MATERIAL FRACTURE RESISTANCE ON SAMPLE SIZES**

*The article considers the reasons for dependence of mechanical characteristics of material fracture resistance on sample sizes and presents features of the modern constructional materials affecting on characteristics of fracture resistance. Restrictions of linear fracture mechanics are presented as exemplified in problem solving plate with the central crack. It is proposed to evaluate synergism of numerous mechanisms of the processes of stress-strain interaction of structure elements in the zone of crack tip that will allow to introduce new indicators of material quality into practice of evaluating fracture resistance, to actualize current standards and to develop new ones on experimental characterization of fracture resistance.*

**Keywords:** constructional material, fracture resistance, size of a sample, metal atomic bonding, covalent bond, multilevel model, linear fracture mechanics, power, deformation and energy criteria of failure, destruction zone.

<sup>1</sup>Федеральное 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**

Успешное взаимодействие эксперимента и теории служит основой развития научных представлений о прочности материалов. После открытия закона Гука в 1660 году понадобилось не одно столетие, чтобы перейти от зависимости

$$P=K\Delta l, \tag{1}$$

где  $P$  – приложенная к образцу нагрузка;  $\Delta l$  – абсолютное упругое удлинение;  $K$  – коэффициент упругости,

к зависимости

$$\sigma=E\varepsilon, \tag{2}$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение в поперечном сечении;  $\varepsilon$  – относительное удлинение;  $E$  – модуль упругости первого рода (модуль Юнга).

Этот переход дал возможность ввести в практику силовые и деформационные характеристики материала (а не образца из него), разработать теоретические основы расчета конструкций на прочность, стандартизовать механические испытания.

Примером перехода от теории к практическому получению механических характеристик материала является механика разрушения. Математический анализ напряженно-деформированного состояния в зоне вершины трещины при условии изменения напряжений по зависимости  $\sigma_{ij} \approx 1/\sqrt{r}$  и перемещений  $u_i \approx \sqrt{r}$  (где  $r$  – радиус зоны вершины трещины) показал, что коэффициенты  $K_\alpha$  ( $\alpha$ : I, II, III) в тензоре напряжений могут выступать как характеристики материала (коэффициенты интенсивности напряжений),

представляющие напряженно-деформированное состояние в зоне вершины трещины. Локальные напряжения и деформации в зоне вершины трещины зависят от внешней нагрузки и размера трещины через коэффициенты  $K_a$ . Из-за того, что локальные напряжения  $\sigma_{ij}$  обращаются в бесконечность в вершине трещины, было предложено оценивать напряженное состояние с помощью коэффициентов интенсивности напряжений. Для предсказания начала разрушения была разработана линейная механика разрушения, в которой материал – однородная изотропная линейно-упругая среда, а трещина – свободные поверхности на малом расстоянии друг от друга, причем вершина трещины имеет предельно заостренную форму. Вопрос упругопластического состояния в области вершины трещины не рассматривается. Появление пластической деформации в зоне вершины трещины изменяет вид напряженно-деформированного состояния ( $\sigma_{ij} \neq 1/\sqrt{r}$ ), меняются значения коэффициентов интенсивности напряжений и объем нагруженной области в зоне вершины трещины. К этому следует добавить внешние размеры тела, определяющие запас в нем упругой энергии. Введение пластической поправки в расчет длины трещины частично решает вопрос определения коэффициентов интенсивности напряжений, одновременно показывая необходимость исследования нагруженной области в зоне вершины трещины.

При расчете на прочность предполагают, что материал в основном несет силовую нагрузку и деформируется в упругой области. Однако дефекты материала в виде микротрещин, пор и других видов концентраторов напряжений, появившиеся в результате изготовления деталей и конструкций, вызывают образование очагов пластической деформации и ее рост при эксплуатации. Увеличение пластической деформации приводит к появлению трещин и как результат – сначала к понижению несущей способности конструкции, а затем и к ее разрушению. Проектирование высокотехнологичных конструкций, таких как летательные аппараты, проводится по принципу «безопасного повреждения» с целью повышения эффективности при эксплуатации и допускает появление повреждения конструкции и его развитие в процессе эксплуатации, но не до критических размеров. При эксплуатации это повреждение должно быть обнаружено и конструкция отремонтирована. Такой принцип требует многопутной (статически неопределимой) конструкции, где силовые элементы подстраховывают друг друга, и подразумевает использование материалов с высокими характеристиками сопротивления развитию повреждаемости и разрушению, которые гарантируют межремонтный срок эксплуатации.

Расчетные методы определения работоспособности и повреждаемости конструкции в процессе эксплуатации разрабатываются с учетом резуль-

татов большого количества испытаний образцов из материала конструкции [1–7]. В расчет на прочность становится необходимым введение диаграмм деформирования и разрушения. В работе [8] 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.

На стадии развития в материале макротрещины оценка повреждаемости подразумевает знание зависимости допустимого брутто-напряжения в бездефектной части образца, детали или конструкции от размера макротрещины. Критический размер макротрещины – величина, при которой любое приращение размера приведет к разрушению за счет накопленной упругой энергии, и произойдет это вследствие концентрации напряжения, деформации и, соответственно, энергии в зоне вершины трещины. В результате получаем, что комбинация из следующих основных факторов, а именно: брутто-напряжение, размер макротрещины, величина концентрации напряжения, деформации и энергии в зоне вершины трещины, вид напряженно-деформированного состояния в ней, объем нагруженной области в зоне вершины трещины, определяет способность материала сопротивляться развитию трещины. В стандартах на испытания материалов на трещиностойкость [9–17] силовые ( $K_{Ic}, K_c^y, K_c$ ), деформационные ( $\delta_{Ic}, \delta_c$ ) и энергетические характеристики ( $G_{Ic}, J_{Ic}, J_c$ ) зависят от исходных размеров образца. Характеристики материала, зависящие от размера образца из него, требуют дальнейшего исследования.

В данной работе проведен анализ причин зависимости характеристик трещиностойкости материала от размеров образца.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 3.3. «Технологии 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») [18].

### Материалы и методы

Современную модель твердого металлического тела можно представить в виде объема вещества, состоящего из ионов, погруженных в среду, образованную коллективизированными электронами [19, 20]. Причиной связи в металлической решетке является взаимодействие ионов с электронами. Тип связи на атомном уровне позволяет судить о преобладающем виде процесса разрушения: хрупкий отрыв реализуется при ковалентной связи, пластическое разрушение – при металлической связи.

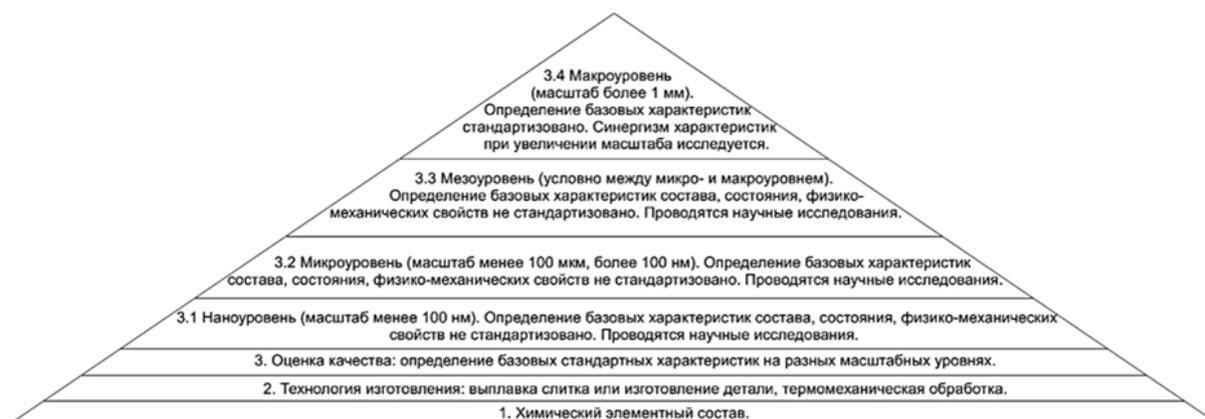


Рис. 1. Многоуровневая схема формирования свойств конструкционного материала

Конструкционный металлический материал является продуктом металлургического производства. Он изготавливается по регламентированным правилам и имеет фиксированный химический элементный состав, фазовый состав как результат взаимодействия химических элементов, строение, структуру и определяемый ими комплекс свойств. На рис. 1 в виде пирамиды представлена многоуровневая схема формирования свойств конструкционного материала. В основе материала (рис. 1, позиция 1) лежит химический элементный состав. Следующий этап (позиция 2) представлен технологией изготовления. Этот этап включает выплавку слитка или сразу заготовки детали, термомеханическую обработку (ковку, прокат, штампование, волочение, закалку, отжиг, отпуск, термохимическую обработку) и как результат – продукт металлургического производства в виде полуфабриката (плиты, штамповки, прутка, листа, профиля, детали, полученной литьем). После получения материала проводится оценка его качества. Основная задача оценки качества материала – определение базовых, стандартных характеристик на нано-, микро-, мезо- и макроуровнях:

- структурного состава и состояния структурных элементов;
- физико-механических свойств при вариации размеров [21].

Представленная схема демонстрирует масштабные уровни для оценки синергизма (согласованного поведения) многочисленных механизмов протекания процессов силового и деформационного взаимодействия элементов структуры. Согласно схеме (рис. 1) логично было бы подниматься по позициям по их возрастанию от 1 до 3.4. Практика, несмотря на то, что гипотеза об атомном строении веществ была сформулирована еще в Древней Греции, позволила реализовать путь в последовательности позиций схемы: 2→3.4→1→3.2. В настоящее время активно проводятся работы по реализации позиций 3; 3.1; 3.3.

Базовые, стандартные характеристики, при их введении в перечень контролируемых параметров при производстве, дают возможность жесткого контроля технологического процесса и получения продукции со стабильными свойствами, а при эксплуатации позволяют осуществлять техническую диагностику силовых элементов конструкций и деталей машин.

Механические свойства конструкционного материала – основные показатели качества, обеспечивающие безопасность и надежность изделий из него. Механические свойства, в том числе и трещиностойкость, являются результатом различных типов атомной связи, вида микро-, мезо- и макроструктуры. До настоящего времени взаимовлияние характеристик на нано-, микро-, мезо- и макроуровнях изучено недостаточно. Математические модели на макроуровнях построены феноменологически, исходя из представлений континуальной сплошной среды, а реальный процесс разрушения представляет собой многоступенчатый процесс, который начинается на наноуровне (рис. 1, позиция 3.1) и заканчивается на макроуровне (рис. 1, позиция 3.4). Таким образом, исследование поведения образца с трещиной дает уникальную возможность реализовать исследование конструкционного металлического материала согласно многоуровневой схеме на рис. 1 – от нано- до макроуровня. Исследования структуры зоны границы трещины, ее напряженно-деформированного состояния на нано- и микроуровнях необходимы для оценки высокой концентрации напряжений, величины поверхностной энергии и построения механизмов образования новой свободной поверхности. Результаты исследования позволят получить новые знания для оценки синергизма многочисленных механизмов протекания процессов силового и деформационного взаимодействия элементов структуры, ввести в практику оценки характеристик трещиностойкости новые показатели качества, актуализировать имеющиеся и разработать новые стандарты по их экспериментальному определению.

**Результаты исследования**

Линейная механика разрушения была разработана для предсказания начала разрушения. В настоящее время она является наиболее развитым разделом теории разрушения: имеются хорошо обоснованные экспериментальные методики и многочисленные данные о свойствах материалов, позволяющие проводить их классификацию и давать прямые оценки их пригодности в той или иной ситуации. Однако существует жесткий набор условий для ее применения из-за того, что линейная механика разрушения основана на упрощенных представлениях о материале. Если рассматривать упругое твердое тело, то силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения оценивают напряженно-деформированное состояние материала теоретически, локально – в точке тела. Связь между критериями представлена уравнением [2, 9, 13]

$$\frac{K_{Ic}^2(1-\mu^2)}{E} = 2\delta_{Ic}\sigma_b = G_{Ic} = J_{Ic} = 2\gamma, \quad (3)$$

где  $K_{Ic}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений, силовой критерий разрушения;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\delta_{Ic}$  – критическое раскрытие в вершине трещины, деформационный критерий разрушения;  $\sigma_b$  – предел прочности;  $G_{Ic}$  – критическая интенсивность освобождающейся энергии, энергетический критерий разрушения;  $J_{Ic}$  – критический джей-интеграл, энергетический критерий разрушения;  $\gamma$  – поверхностная энергия.

Определение критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ , предела прочности  $\sigma_b$ , модуля упругости  $E$ , коэффициента Пуассона  $\mu$  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.

Оценка масштабов показывает, что линейная механика разрушения связывает через макроразмерную длину трещины характеристику микроуровня (в хрупком случае) или мезоуровня при наличии ограниченной по величине пластической деформации в зоне вершины трещины,  $K_{Ic}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений с характеристикой  $\sigma^{брутто}$  – брутто-напряжение в бездефектной части образца (усредненное по поперечному сечению образца напряжение):

$$K_{Ic} = \sigma^{брутто} \sqrt{\pi l} \cdot f(2l/B), \quad (4)$$

где  $\sigma^{брутто}$  – брутто-напряжение в бездефектной части образца;  $l$  – полулина трещины у образца с центральной трещиной;  $B$  – ширина образца с центральной трещиной;  $f(2l/B)$  – безразмерная функция, обеспечиваю-

щая постоянство критического коэффициента интенсивности напряжений с увеличением длины трещины  $l$ .

Теоретически, для неограниченных во внешних размерах тел с нагрузками, приложенными на бесконечности,  $-f(2l/B)=1$ . Для тел конечных размеров, в частности образцов из пластин с центральной трещиной (рис. 2) [9], формулу (4) приводят к виду

$$K_{Ic} = \sigma^{брутто} \sqrt{B} \cdot Y_1(2l/B), \quad (5)$$

а безразмерную функцию  $Y_1(2l/B)$  вычисляют по формуле

$$Y_1(2l/B) = 0,380[1 + 2,308(2l/B) + 2,439(2l/B)^2] \quad (6)$$

или табулируют в пределах  $0,3 \leq 2l/B \leq 0,5$ , при значениях которых определяют характеристики трещиностойкости. График изменения функции  $Y_1(2l/B)$  и график ее табулированных значений в стандарте [9] представлены на рис. 3 – графики совпадают.

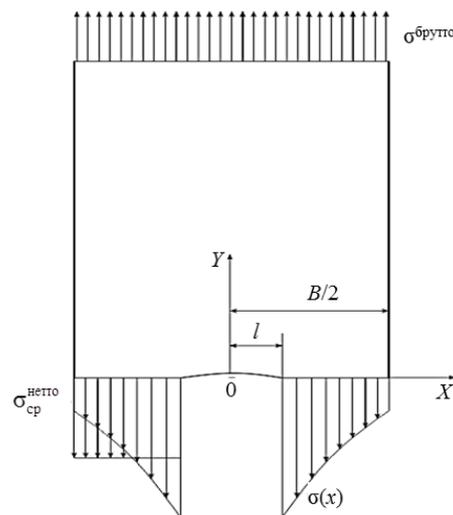


Рис. 2. Пластина с центральной трещиной

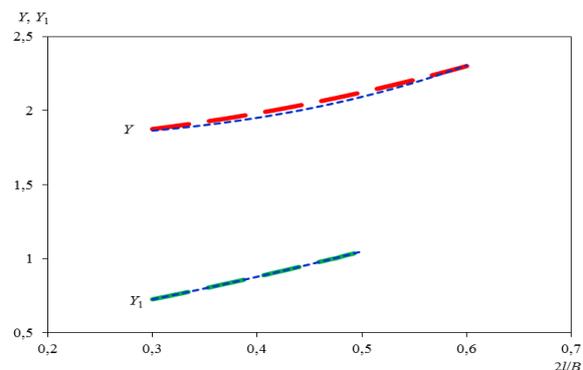


Рис. 3. Изменение безразмерных функций  $Y$  (---) и  $Y_1$  (---) и графики их табулированных значений (- - -) [9, 10]

Для пластины шириной  $B$ ,  $K_{Ic}$  остается константой, когда  $\sigma^{брутто}$  связано с длиной трещины зависимостью

$$\sigma^{брутто}(l) = \frac{C}{\sqrt{l}} / f(2l/B), \quad (7)$$

где  $C$  – константа, а для формулы (5) зависимостью

$$\sigma^{брутто}(l) = D / (a + bl + cl^2), \quad (8)$$

где  $D, a, b, c$  – константы.

Брутто-напряжения  $\sigma^{брутто}(l)$  в формулах (4) и (5) будут равны при условии

$$f(2l/B) = Y_1(2l/B) \sqrt{\frac{B}{\pi l}}. \quad (9)$$

На характеристики трещиностойкости большое влияние оказывает пластическая деформация в зоне вершины трещины. В условиях плоского напряженного состояния сильнее проявляется и проще исследуется влияние пластической деформации. При проведении испытаний в условиях плоского напряженного состояния испытывают образцы в виде пластин с центральным надрезом. Основным их отличием от пластин для определения  $K_{Ic}$  является небольшая ( $1 \div 5$  мм) толщина пластины. В результате испытаний определяют следующие характеристики статической трещиностойкости:

– критическое значение коэффициента интенсивности напряжения  $K_c$

$$K_c = \sigma_{\max}^{брутто} \sqrt{\pi l_c} \cdot Y(2l/B), \quad (10)$$

где  $l_c$  – полудлина трещины при  $\sigma_{\max}^{брутто}$ ;  
– критическое значение условного коэффициента интенсивности напряжения  $K_c^y$

$$K_c^y = \sigma_{\max}^{брутто} \sqrt{\pi l_0} \cdot Y(2l/B), \quad (11)$$

где  $l_0$  – исходная полудлина трещины;  
– значение коэффициента интенсивности напряжения при страгивании трещины  $K_{стр}$

$$K_{стр} = \sigma_{стр}^{брутто} \sqrt{\pi l_0} \cdot Y(2l/B); \quad (12)$$

– остаточную прочность образца в нетто-сечении  $\sigma_c^{нетто}$ ;

–  $R$ -кривую или  $K$ - $R$ -кривую сопротивления распространению трещины при статическом нагружении, которая представляет собой зависимость между текущим значением коэффициента интенсивности напряжения  $K_R$  и приростом эффективной длины трещины;

– критическое раскрытие вершины трещины  $\delta_c$ ;  
–  $J_c$  – джей-интеграл [10, 22].

В формулах (10)–(12) брутто-напряжение соответствует максимальному значению приложен-

ной нагрузки ( $\sigma_{\max}^{брутто}$ ) и значению приложенной нагрузки при страгивании трещины ( $\sigma_{стр}^{брутто}$ ). График изменения безразмерной функции  $Y(2l/B)$

$$Y(2l/B) = 1,77[1 + 0,128(2l/B) - 0,288(2l/B)^2 + 1,525(2l/B)^3] \quad (13)$$

и график ее табулированных значений в стандарте [10] для тонких пластин с соотношением  $0,3 \leq 2l/B \leq 0,6$  представлены на рис. 3. Табличные результаты находятся ниже значений, вычисленных по формуле (10), разница достигает величины в 3,4%, поэтому требуется корректировка результатов.

Практика оценки характеристик трещиностойкости в условиях плоского напряженного состояния [22–25] показывает зависимость характеристик от ширины образца. С ее увеличением возрастают значения коэффициента интенсивности напряжения  $K$ , а нетто-напряжение уменьшается. Это предполагает, что с увеличением длины трещины в области ее вершины увеличивается зона пластической деформации.

Рассмотрим условие равновесия пластины с центральной трещиной (рис. 2). Условие равенства сил по вертикальной оси  $Y$  может быть представлено в виде

$$\sigma^{брутто}(l) B t = 2t \int_l^{B/2} \sigma(x) dx, \quad (14)$$

где  $\sigma^{брутто}(l)$  – брутто-напряжение в бездефектной части пластины с центральной трещиной длиной  $2l$ ;  $B$  – ширина пластины;  $t$  – толщина пластины;  $\sigma(x)$  – распределение напряжений на отрезке  $l \leq x \leq B/2$ .

После сокращений формулу (14) можно представить для упругого твердого тела в виде

$$\sigma^{брутто}(l) = \frac{2}{B} \int_l^{B/2} \sigma(x) dx \quad (15)$$

или в виде

$$\sigma^{брутто}(l) = \sigma_{ср}^{нетто}(l) \left(1 - \frac{2l}{B}\right) = \sigma_B \left(1 - \frac{2l}{B}\right) \quad (16)$$

для тела, обладающего большой пластической деформацией. В формуле (16)  $\sigma_{ср}^{нетто}(l)$  – среднее нетто-напряжение в сечении пластины с трещиной равно пределу прочности  $\sigma_B$  при наличии пластической деформации по всему нетто-сечению. В этом случае 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 по величине прочности при растяжении. Для тела,

обладающего большой пластической деформацией, трещина представляет опасность только из-за уменьшения площади несущего нагрузку сечения в соответствии с формулой (16).

Процесс хрупкого разрушения материала при распространении трещины определяется напряжением, локализованным в зоне ее вершины – теоретически в точке  $\sigma(x=l)$ . Уравнение (15) позволяет получить аналитическую зависимость предельного напряжения в зоне вершины трещины от длины трещины. Для этого необходимо получить зависимость от длины трещины  $\sigma^{\text{брутто}}(l)$ . В уравнении присутствует одно ограничение на соотношение  $2l/B: l \leq B/2$ . Преобразуем уравнение (15) с учетом формулы (4) для тел с  $f(2l/B)=1$  к виду

$$A \cdot l^{-1/2} = -\frac{2}{B} \int_0^l \sigma(x) dx, \quad (17)$$

где  $A$  – константа, равная  $\frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi}}$ .

Получаем предельное напряжение в зоне вершины трещины

$$\sigma(x=l) = \frac{d}{dl} (A \cdot l^{-1/2}) = -\frac{A}{2} \cdot l^{-3/2} = -\frac{A}{2} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi}} l^{-3/2} = -\frac{A}{4} \sigma^{\text{брутто}}(l) l^{-1}. \quad (18)$$

Из-за того, что отношение  $B/l$  принято равным бесконечности, получаем  $\sigma(x=l)$  также равным бесконечности, даже при минимальных значениях брутто-напряжения, т. е. уравнение (15) при данных условиях не применимо или требует уточнения формула (4).

Рассмотрим уравнение для образца с фиксированным размером  $B$  и с учетом формулы (5)

$$D/(a+bl+cl^2) = -\frac{2}{B} \int_0^l \sigma(x) dx. \quad (19)$$

В этом случае получаем предельное напряжение в зоне вершины трещины

$$\sigma(x=l) = 1/2 \cdot [D(b_1+2c_1l)/(a+bl+cl^2)^2], \quad (20)$$

где константы  $b_1=Bb$  и  $c_1=Bc$ .

Предельное напряжение в зоне вершины трещины связано с брутто-напряжением зависимостью

$$\sigma(x=l) = \sigma^{\text{брутто}}(l) (b_1+2c_1l)/2(a+bl+cl^2). \quad (21)$$

Для соотношения  $2l/B=0,3$  при  $a=0,380$ ,  $b=1,754 \cdot \frac{1}{B}$ ,  $c=3,707 \cdot \frac{1}{B^2}$ ,  $Y_1(l)=0,726$  получаем

$$\sigma(x=l=0,15B) = 1,97 \sigma^{\text{брутто}}(l=0,15B), \quad (22)$$

а для  $2l/B=0,5$

$$\sigma(x=l=0,25B) = 1,72 \sigma^{\text{брутто}}(l=0,25B). \quad (23)$$

Получаем снижение предельного напряжения в зоне вершины трещины с увеличением длины трещины, что и следовало ожидать вследствие того, что более длинная трещина опаснее короткой трещины. Однако вызывают сомнения низкие значения соотношения  $\sigma(x=l)/\sigma^{\text{брутто}}(l)$ : 1,98 и 1,72.

Уравнения (15) и (16) представляют напряжения, действующие по всему сечению образца. Для них выполняются граничные условия

$$\sigma^{\text{брутто}}(l=0) = \sigma_B \text{ и } \sigma^{\text{брутто}}(l=B/2) = 0. \quad (24)$$

Если пластическая деформация отсутствует или она локализована в зоне вершины трещины, то

$$\sigma_{\text{ср}}^{\text{нетто}}(l) = \left( \frac{1}{B/2-l} \right) \int_l^{B/2} \sigma(x) dx < \sigma_B. \quad (25)$$

Среднее нетто-напряжение  $\sigma_{\text{ср}}^{\text{нетто}}(l)$  в сечении пластины с трещиной (как функция от длины трещины) должно отвечать следующим граничным условиям:

$$\sigma_{\text{ср}}^{\text{нетто}}(l=0) = \sigma_B, \quad \sigma_{\text{ср}}^{\text{нетто}}(l=B/2) = 0. \quad (26)$$

Зависимостью, удовлетворяющей требованиям граничных условий, является зависимость

$$\sigma_{\text{ср}}^{\text{нетто}}(l) = \sigma_B \left( 1 - \frac{2l}{B} \right)^n, \quad (27)$$

где  $n \geq 1$ .

В результате, с учетом выражения (16), получаем следующую зависимость брутто-напряжения от длины трещины:

$$\sigma^{\text{брутто}}(l) = \sigma_B \left( 1 - \frac{2l}{B} \right)^{n+1}, \quad (28)$$

где  $n \geq 0$ .

На рис. 4 представлены графики изменения соотношения напряжений  $\sigma^{\text{брутто}}(l)/\sigma_B$  по формуле (28) от длины трещины и коэффициента  $n$ .

Приведенный в формуле (28) коэффициент  $n$  можно представить как показатель хрупкости материала. В этой формуле  $\sigma^{\text{брутто}}(l)$  зависит только от соотношения размера трещины к ширине образца  $2l/B$ . Критический коэффициент интенсивности напряжений будет постоянной величиной, согласно выражению (5), когда произведение в правой части уравнения (29) будет постоянной величиной:

$$\frac{K_{Ic}}{\sigma_B \sqrt{B}} = \left( 1 - \frac{2l}{B} \right)^{n+1} \cdot Y_1(2l/B) \approx \text{const}. \quad (29)$$

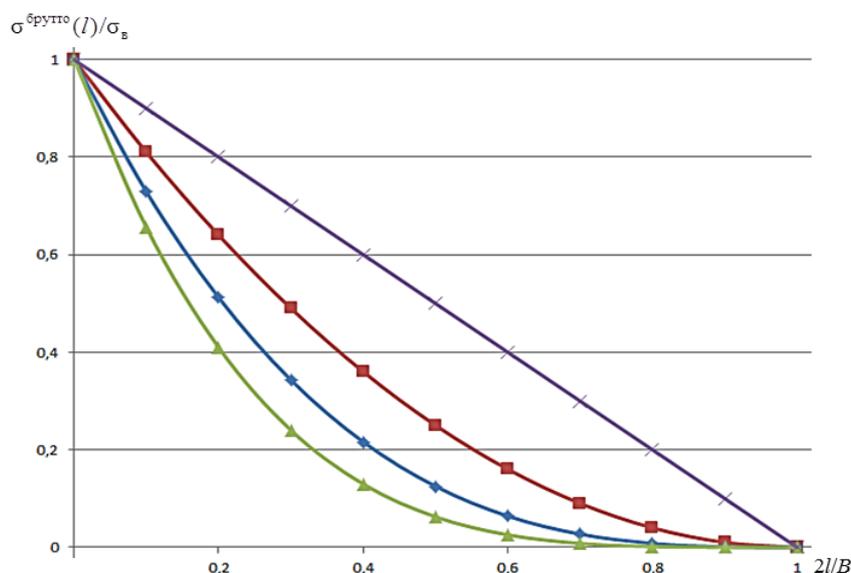


Рис. 4. Зависимость отношения напряжений  $\sigma_{\text{брутто}}(l)/\sigma_B$  от длины трещины при коэффициенте  $n$ : 1 (×), 2 (■), 3 (◆) и 4 (▲)

На рис. 5 представлены графики изменения безразмерной величины  $\frac{K_{Ic}}{\sigma_B \sqrt{B}}$  от длины трещины и коэффициента  $n$ . Видно, что коэффициент  $K_{Ic}$  при  $2l/B=0,3-0,5$  тем дольше остается постоянной величиной, чем ближе коэффициент  $n$  к значениям 0 и 10. Коэффициент  $n$ , как показатель хрупкости материала, показывает уровень локализации напряжения, деформации и энергии в зоне вершины трещины:

- при  $n=0$  локализация отсутствует, в наличии развитая по всему нетто-сечению пластическая деформация;
- при  $n=10$  имеется большая локализация в зоне вершины трещины, приводящая к низким значениям критического коэффициента интенсивности напряжений.

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 в структуре материала [26]. Трещиностойкость таких материалов следует изучать, опираясь на исследования энергетических и деформационных критериев разрушения, из-за 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 и отслеживать экспериментально.

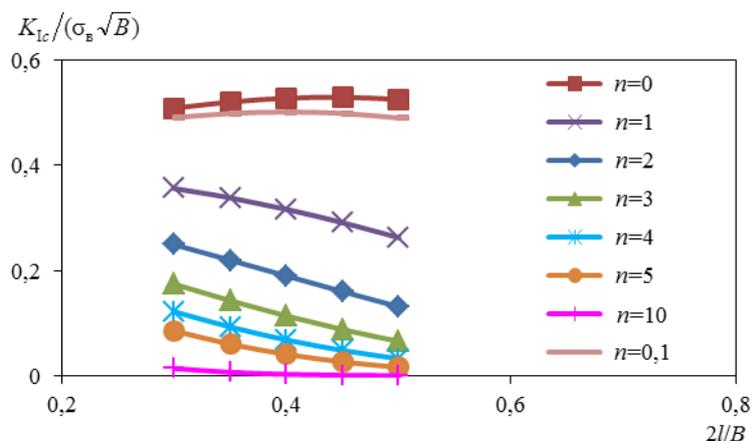


Рис. 5. Зависимость безразмерной величины  $K_{Ic}/(\sigma_B \sqrt{B})$  от длины трещины и коэффициента  $n$

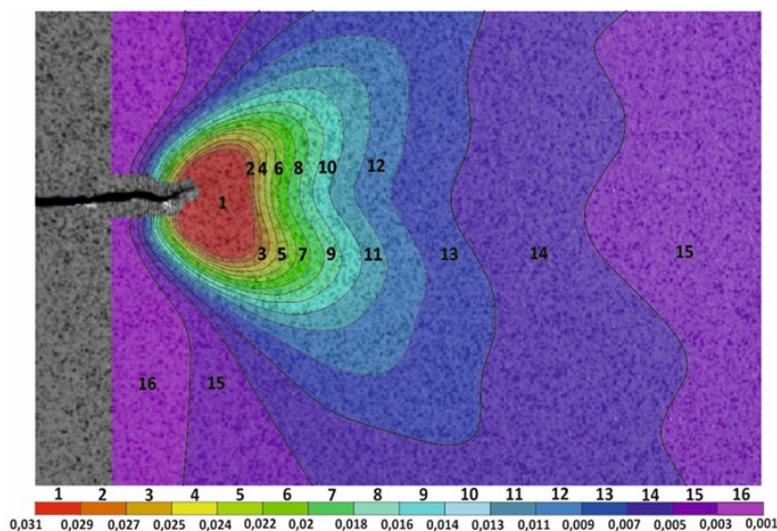


Рис. 6. Распределение деформаций в направлении растяжения в конце центральной трещины

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 шириной 200 мм и толщиной 5,0 мм с центральной трещиной, изготовленный из листа титанового сплава ВТ6.

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 трещины изменяется. Момент перехода отражает появление из вершины трещины хорошо заметных полос скольжения (усов) под углом  $\sim 50$  градусов к существовавшему направлению развития трещины.

#### Обсуждение и заключения

Показано, что характеристики трещиностойкости являются результатом различных типов атомной связи, вида микро-, мезо- и макроструктуры. Исследование поведения образца с трещиной дает уникальную возможность реализовать исследование конструкционного металлического материала согласно многоуровневой схеме – от нано- до макроуровня.

Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения, в случае упругого твердого тела, связаны через величину поверхностной энергии и с их помощью оценивают напряженно-

деформированное состояние материала теоретически, локально – в точке тела. Коэффициент интенсивности напряжений (силовая характеристика трещиностойкости материала), полученный из математического решения задачи о напряженно-деформированном состоянии в зоне вершины трещины, зависит от формы и размера образца, что вызывает сомнение в точности его определения. В расчетных формулах используется безразмерная функция, которая с увеличением длины трещины  $l$  обеспечивает постоянство коэффициентов интенсивности напряжений.

Представлено влияние пластической деформации в зоне вершины трещины на несущую способность пластины на примере решения задачи о разрушении пластины с центральной трещиной. Коэффициент  $n$  на зависимости брутто-напряжения от длины трещины можно представить как показатель хрупкости материала.

В конструкционных материалах всегда присутствует макроскопическая область вершины трещины, в которой начинается и развивается процесс разрушения – процесс появления и развития новой свободной поверхности. Величина этой области служит показателем сопротивления материала развитию трещины. Оценка в области вершины трещины синергизма многочисленных механизмов силового и деформационного взаимодействия элементов структуры позволит ввести в практику оценки характеристик трещиностойкости новые показатели качества материала, разработать новые и актуализировать имеющиеся стандарты по экспериментальному определению характеристик трещиностойкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. 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: 18.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-11-11.
3. 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.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
5. Вильдеман В.Э., Третьяков В.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №2. С. 93–98.
6. 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://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.
7. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Критические напряжения потери устойчивости в гибридных слоистых пластинах // Материаловедение. 2016. №11. С. 17–21.
8. 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.
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. ОСТ1 90356–84. Металлы. Метод определения статической трещиностойкости (вязкости разрушения) обшивочных материалов при плоском напряженном состоянии. М., 1984. 31 с.
11. 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.
12. ASTM E 561-10. Standard Test Method for K-R Curve Determination. American Society for Testing and Materials, 2010.
13. Zhu X.-K., Joyce J.A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization // U.S. Navy Research. 2012. No. 49. 47 p.
14. ASTM E 1290–08. Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement. American Society for Testing and Materials, 2008.
15. 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.
16. ASTM E 1820–11. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. American Society for Testing and Materials, 2011.
17. 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.
18. 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.
19. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. С. 27–32.
20. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. С. 73–77.
21. Махутов Н.А. Проблемы технической диагностики материалов, деталей и конструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. №4. С. 47–48.
22. Швечков Е.И. Анализ российских и зарубежных методов испытаний на статическую трещиностойкость авиационных материалов // Технология легких сплавов. 2016. №1. С. 99–106.
23. Нотт Дж.Ф. Основы механики разрушения. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1978. С. 97–98.
24. Кузмичев С.В. Зарождение и эволюция дефектов структуры в твердых хрупких телах под воздействием внешней механической нагрузки: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: Ин-т проблем машиноведения РАН, 2011. 16 с.
25. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 156–158.
26. Каблов Е.Н., Гриневич 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.