

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-9-72-78

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫХ СХЕМ НАГРУЖЕНИЯ ДВУХБАЛОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ

© Владимир Юрьевич Гольцев, Виктор Михайлович Маркочев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия;
e-mail: gvy587@gmail.com, vmmark@yandex.ru*Статья поступила 17 февраля 2017 г.*

Цель работы — исследование возможных схем нагружения двухбалочных (ДКБ) образцов для пополнения арсенала методов их испытания. Приведен математический анализ десяти схем нагружения образцов с различными способами закрепления и нагружения консолей — силовым, деформационным и деформационно-силовым. Для каждой схемы нагружения приведены формулы коэффициентов интенсивности напряжений, а также зависимости угла разворота торцевых сечений консолей-плеч образца от длины трещины. Эти зависимости рассматриваются как основа разработки методов измерения длины трещины, изменяющейся в процессе испытания. Для определения коэффициентов интенсивности напряжений использован энергетический подход. Классическая схема силового нагружения ДКБ образца парой сил дополнена схемой нагружения двумя парами сил, приложенных в разных сечениях. Осуществлена схема модификации ДКБ образца путем жесткого связывания концов его консолей. В этом случае каждое плечо образца представляет собой один раз статически неопределимую балку и ДКБ образец превращается в двухбалочный. Исследуется также возможность перестановки сечений приложения нагрузки и положения жесткой опоры-связи. Деформационное нагружение моделируется установкой клина в одном или двух сечениях. Эффект клина рассматривается в виде задаваемой деформации в одном из сечений и связыванием консолей образца — в другом. Приведены формулы коэффициента интенсивности напряжений неметричного относительно линии распространения трещины ДКБ образца при чисто силовом нагружении силами, приложенными в одном сечении. Представлены ссылки на работы, в которых ряд предлагаемых схем экспериментально опробован.

Ключевые слова: ДКБ образец; коэффициент интенсивности напряжений; угловая деформация; силовое нагружение; деформационное нагружение; деформационно-силовое нагружение.

COMPUTER SIMULATION OF COMBINED SPLITTING FORCE: STRAIN LOADING OF DOUBLE-BEAM SAMPLES

© Vladimir Yu. Goltsev, Viktor M. Markochev

National research nuclear university “МЭФИ”, Moscow, Russia; e-mail: gvy587@gmail.com, vmmark@yandex.ru

Submitted February 17, 2017.

The purpose of this work is to study possible schemes of loading double-cantilever beam (DCB) specimens to replenish the arsenal of the methods used in their testing. Mathematical analysis of ten different modes of specimen loading is carried out for different methods of immobilizing and loading of the cantilever including splitting force, deformational and combined loading. Analytical expressions for the stress intensity factor (SIF), as well as the dependence of the beam spread angle θ (rotation angle of the beam head) on the crack length are derived. Those dependences form a basis for developing the methods for measuring the dynamics of the crack length changes during testing. The energy approach is used in determination of the stress intensity factors. The classical scheme of force loading of the DCB specimen by a pair of forces is supplemented with a loading scheme with two pairs of forces applied to different cross sections. A modification of the DCB specimen by rigid binding of the ends of its consoles when each shoulder of the specimen is considered a singly statically indeterminate beam and DCB specimen becomes a double-beam specimen is also considered. The possibility of rearranging the sections of the load application and position of the rigid support-link is also studied. The deformational loading is simulated by inserting a wedge in one or two sites along the specimen length. The wedge effect is modeled by a preset deformation in one of the sections and binding of the specimen consoles in the other. Formulas of the stress intensity factor for the DCB specimen asymmetric with respect to the crack propagation line upon pure force loading by the forces applied in one section are presented. References to the reports on experimental implementation of a number of proposed and considered load configurations are presented.

Keywords: double cantilever beam specimen; stress intensity factor; angular deformation; splitting force loading; deformational loading; splitting force — deformational loading.

Образец в виде двухконсольной балки — ДКБ образец (рис. 1) широко используют для исследований сопротивления материалов росту трещин. Пионер в этой области — И. В. Обреимов [1], измеривший сопротивление слюды процессу ее расщепления на тонкие пластинки при жестком нагружении. В. Д. Кузнецов [2] с сотрудниками продолжил исследования, используя поверхностную энергию в качестве параметра трещиностойкости. ДКБ образцы современной конструкции [3, 4] применяют для определения влияния среды на сопротивление разрушению [5, 6], для исследований трещиностойкости материалов по старту и остановке трещины [7–9], для изучения трещиностойкости неметаллических материалов и клеевых соединений [10–12]. ДКБ образцы используют для исследований усталостной трещиностойкости, особенно в связи с их возможностью стабилизировать значение размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в процессе роста трещины [13–15]. Разработаны нормативные документы [16–18], регламентирующие методики испытаний ДКБ образцов. Сами образцы модернизируют и изучают их возможности [19, 20].

ДКБ образец принципиально отличается от других образцов, применяемых для испытаний материалов на трещиностойкость. В нем можно отчетливо выделить три зоны: *AB* — предназначена для приложения нагрузок; *BC* — зона распространяющегося процесса разрушения; *CD* — практически не нагруженная зона.

Зона *AB*, имеющая достаточную протяженность, позволяет нагружать плечи образца не одной, а двумя силами: одна действует в сечении *A*, другая — в сечении *B*, причем эти нагрузки могут быть как силового, так и деформационного происхождения. Надлежащий подбор этих нагрузок позволяет стабилизировать напряженное состояние — коэффициент интенсивности напряжений (КИН) на фронте распространяющейся трещины (сечение *C*).

Нагрузки действуют не на удалении от сечения разрушения, а практически на линии трещины. Изгибные напряжения направлены вдоль плеч образца, разрушающие напряжения перед фронтом трещины — перпендикулярно его плечам. Поэтому для стабилизации направления роста трещины необходимы боковые надрезы вдоль всего образца.

Существенной особенностью ДКБ образца является то, что угол θ относительного разворота торцевых сечений плеч образца (сечение *A*) однозначно связан с длиной трещины L , которая отсчитывается от сечения *B*. На этой основе могут быть созданы системы непрерывного измерения длины трещины в процессе испытаний. Цель

данной работы — анализ возможных схем нагружения ДКБ (двухбалочных) образцов в целях пополнения арсенала методов их испытания и повышения вероятности выбора надлежащего образца для испытаний материалов на трещиностойкость.

Методика вычислений КИН для двухбалочных образцов

В общем случае коэффициент интенсивности напряжений, контролирующий рост трещины в ДКБ образце, равен

$$K = \sqrt{t_0 \frac{E}{dL} \frac{dU(L)}{dL}}, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга; t_0 — толщина образца в месте надреза; U — энергия упругой деформации двух плеч образца;

$$U(L) = \int_0^{a+L} \frac{M_z^2(x)}{EI_z} dx. \quad (2)$$

Здесь $M_z(x)$ — зависимость изгибающего момента от координаты сечения x , которая отсчитывается от сечения *A* к сечению *C*;

$$I_z = bh^3/12 \quad (3)$$

осевой момент инерции поперечного сечения одного плеча образца; b — толщина плеча образца, h — высота плеча образца (см. рис. 1).

Поскольку (2) — определенный интеграл с переменным верхним пределом L , то в соответствии с теоремой Лейбница – Ньютона производная от интеграла по L равна подынтегральной функции при $x = a + L$, т.е.

$$\frac{dU}{dL} = \frac{M_z(a+L)^2}{EI_z}. \quad (4)$$

В результате преобразования формулы (1) для КИН с учетом уравнений (2), (3) и (4) получим

$$K = \frac{M_z(a+L)}{\sqrt{t_0 I_z}} = \frac{M_z(a+L)}{bh} \sqrt{\frac{12b}{t_0 h}}. \quad (5)$$

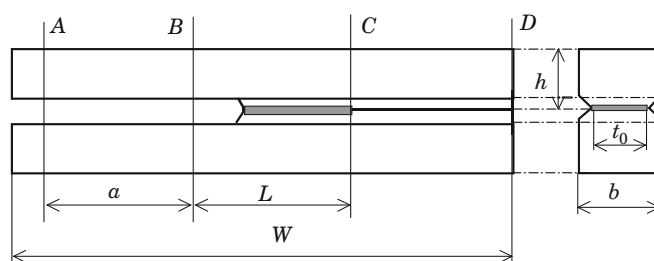


Рис. 1. Схема ДКБ образца

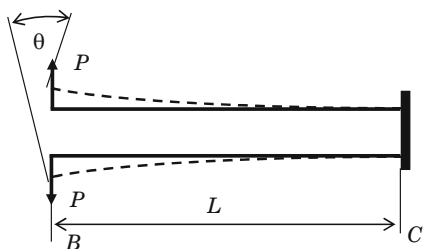


Рис. 2. Схема простого силового нагружения образца

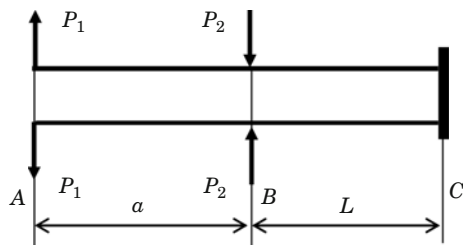


Рис. 3. Схема нагружения образца двумя противоположными силами

Из формулы (5) следует важный вывод — значение КИН для ДКБ образца зависит от геометрии его поперечного сечения и значения изгибающего момента в одном плече на уровне кончика трещины вне зависимости от принятой схемы нагружения — силовой, деформационной или деформационно-силовой. Это существенно упрощает вычисление КИН.

Силовое нагружение образца

На рис. 2 показана схема нагружения ДКБ образца двумя силами P в сечении B . Пунктиром обозначено положение деформированных плеч образца; θ — угол взаимного разворота торцевых сечений консолей.

Для этого случая коэффициент интенсивности напряжений

$$K_1 = \frac{PL}{\sqrt{t_0 I_z}}. \quad (6)$$

Угол разворота торцевых сечений

$$\theta_1 = \frac{PL^2}{EI_z}, \quad (7)$$

где E — модуль Юнга материала образца. Видно, что угол разворота пропорционален квадрату длины трещины.

На рис. 3 показана схема нагружения образца двумя силами в сечениях A и B . Для этого случая нагружения формулы для КИН и угла разворота сечений имеют следующий вид:

$$K_2 = \frac{(P_1 - P_2)L + P_1 a}{\sqrt{t_0 I_z}}, \quad (8)$$

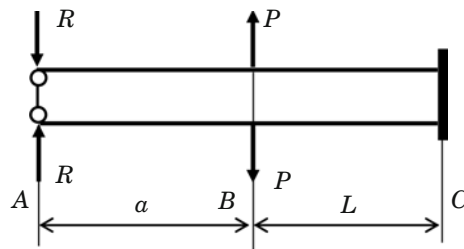


Рис. 4. Схема нагружения образца с жесткой опорой в сечении A

$$\theta_2 = \frac{P_1(a+L)2 - P_2 L^2}{EI_z}. \quad (9)$$

При $P_1 = P_2 = P$ эти формулы можно записать как

$$K_2 = \frac{Pa}{\sqrt{t_0 I_z}} \quad (10)$$

и

$$\theta_2 = \frac{Pa(a+2L)}{EI_z}. \quad (11)$$

В последнем случае нагружения КИН не зависит от длины трещины, а угол разворота сечений θ линейно зависит от L .

На рис. 4 показана схема нагружения двухбалочного образца со связанными концами консолей [14]. В данном случае каждое из плеч образца представляет собой один раз статически неопределимую балку, уже не консольную. Реакция опоры R зависит от нагрузки и составляет

$$R = \frac{PL^2}{2(a+L)^2} \left(3 - \frac{L}{a+L} \right). \quad (12)$$

С учетом (8) и (12) получаем выражение для КИН:

$$K_3 = \frac{Pa}{2\sqrt{t_0 I_z}} \left[1 - \frac{a^2}{(a+L)^2} \right]. \quad (13)$$

Используя формулу (12), а также интеграл Мора, получаем зависимость θ от L :

$$\theta_3 = \frac{PaL^2}{2EI_z(a+L)}. \quad (14)$$

При $L \gg a$ КИН не зависит от длины трещины —

$$K_3 = \frac{Pa}{2\sqrt{t_0 I_z}}, \quad (15)$$

а θ от L линейно зависит —

$$\theta_3 = \frac{PaL}{2EI_z}. \quad (16)$$

Такой вид нагружения ДКБ образца использован в работе [14] для исследования влияния среднего

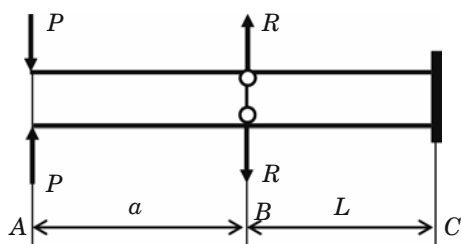


Рис. 5. Схема нагружения образца с жесткой опорой в сечении B

значения цикла нагружения на скорость роста усталостной трещины.

На рис. 5 приведена схема нагружения образца, следующая из схемы на рис. 4 посредством перестановки сечений приложения нагрузки и положения жесткой опоры [21].

В этом случае опорная реакция

$$R = P \left(1 + \frac{3a}{2L} \right), \quad (17)$$

а формулы для КИН и угла разворота сечений имеют следующий вид:

$$K_4 = \frac{Pa}{2\sqrt{t_0} I_z}, \quad (18)$$

$$\theta_4 = \frac{Pa(2a + L)}{2EI_z}. \quad (19)$$

Деформационное нагружение образца

Простейшее деформационное нагружение образца иллюстрирует рис. 6. Отметим, что шарнирный механизм на этом и следующих рисунках не является нагружающим устройством и показан для обозначения деформационного нагружения в выбранном сечении образца.

Эквивалентная прогибу δ сила

$$P_\delta = \frac{3\delta EI_z}{2L^3}. \quad (20)$$

Тогда формулы для КИН и θ будут следующие:

$$K_5 = \frac{3\delta E}{2L^2} \sqrt{\frac{I_z}{t_0}}, \quad (21)$$

$$\theta_5 = \frac{3\delta}{2L}. \quad (22)$$

На рис. 7 показана схема деформационного нагружения образца [22], эквивалентная схеме силового нагружения на рис. 5. Применительно к рис. 8 зависимость силы P_δ от прогиба δ выражается формулой

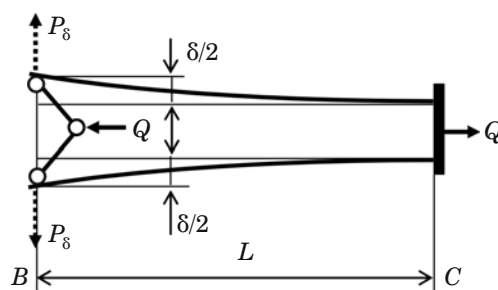


Рис. 6. Схема нагружения ДКБ образца расклинивающими силами

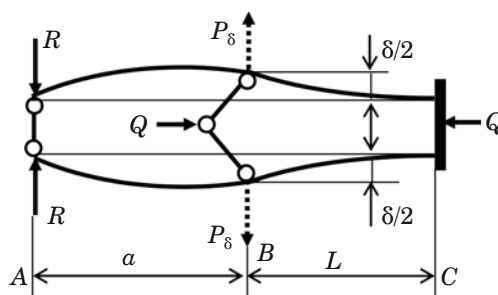


Рис. 7. Схема жесткого нагружения образца в сечении B при наличии жесткой опоры в сечении A

зависимость силы P_δ от прогиба δ выразим формулой

$$P_\delta = 6\delta EI_z \frac{(a + L)^3}{a^2 L^3 (4a + 3L)}. \quad (23)$$

Реакция опоры R на прогиб δ составит

$$R = \frac{P_\delta L^2}{(a + L)^2} \left(3 - \frac{L}{a + L} \right). \quad (24)$$

Формулы для КИН и разворота плеч θ будут иметь вид

$$K_6 = \frac{3\delta E(2a + L)(a + L)}{aL^2(4a + 3L)} \sqrt{\frac{I_z}{t_0}}, \quad (25)$$

$$\theta_6 = \frac{3\delta(a + L)^2}{aL(4a + 3L)}. \quad (26)$$

На рис. 8 показана схема деформационного нагружения образца, которая эквивалентна схеме силового нагружения на рис. 5. Применительно к рис. 8 зависимость силы P_δ от прогиба δ выражается формулой

$$P_\delta = \frac{6\delta EI_z}{a^2(4a + 3L)}, \quad (27)$$

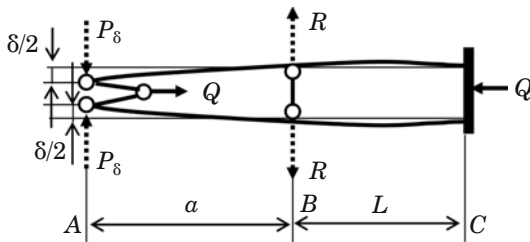


Рис. 8. Схема жесткого нагружения образца в сечении A при наличии жесткой опоры в сечении B

реакция R на прогиб δ —

$$R = P_{\delta} \left(1 + \frac{3a}{2L} \right), \quad (28)$$

коэффициент интенсивности напряжений —

$$K_7 = \frac{3\delta E}{a(4a + 3L)} \sqrt{\frac{I_z}{t_0}}, \quad (29)$$

зависимость угла разворота плеч θ от L —

$$\theta_7 = \frac{3\delta(2a + L)}{a(4a + 3L)}. \quad (30)$$

На рис. 9 приведена схема двойного жесткого нагружения [22], в соответствии с которой сначала образец расклинивается в сечении B на δ , затем жестко стягивается на δ_1 в сечении A.

До первого жесткого расклинивания в сечении B консоль ABC статически определима и расклинивающая сила P_{δ} связана с прогибом δ формулой (20). После этого консоль становится статически неопределимой и сжимающая сила P_1 , обусловленная прогибом δ_1 на конце A, составляет

$$P_1 = \frac{6\delta_1 EI_z}{a^2(4a + 3L)}. \quad (31)$$

Соответственно, реакция

$$R = P_1 \left(1 + \frac{2a}{2L} \right). \quad (32)$$

Формула для КИН примет вид

$$K_8 = \frac{3E}{2a} \left(\frac{2\delta_1}{4a + 3L} + \frac{\delta a}{L^2} \right) \sqrt{\frac{I_z}{t_0}} \quad (33)$$

при зависимости θ от L

$$\theta_8 = \frac{3}{2} \left[\frac{\delta}{L} - \frac{2\delta_1(2a + L)}{a(4a + 3L)} \right]. \quad (34)$$

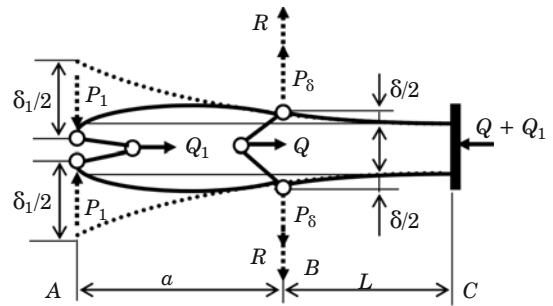


Рис. 9. Схема двойного деформационного нагружения образца

Деформационно-силовое нагружение

Схемы деформационно-силового нагружения [23] показаны на рис. 10 и 11. В отличие от схем на рис. 5 и 6 при деформационно-силовом нагружении расклинивание образца на δ рассматривается как предварительное, начальное, задающее нужный силовой фон. Действующей нагрузкой служит сила P .

Для случая рис. 10 формула для КИН имеет вид

$$K_9 = \frac{Pa}{2\sqrt{t_0 I_z}} + \frac{3\delta E}{2L^2} \sqrt{\frac{I_z}{t_0}}, \quad (35)$$

формула для угла θ —

$$\theta_9 = \frac{Pa(2a + L)}{2EI_z} - \frac{3\delta}{2L}. \quad (36)$$

Полученные формулы математически подтверждают, что схема рис. 10 — это наложение схем рис. 5 и рис. 6.

Для случая рис. 11 формула для КИН принимает вид

$$K_{10} = \frac{3\delta E}{2(a + L)^2} \sqrt{\frac{I_z}{t_0}} - \frac{Pa}{2\sqrt{t_0 I_z}} \left[1 - \frac{a^2}{(a + L)^2} \right], \quad (37)$$

формула для угла θ —

$$\theta_{10} = \frac{PaL^2}{2EI_z(a + L)} + \frac{3\delta}{2(a + L)}. \quad (38)$$

Формулы (37) и (38) могут быть получены суммированием формул для схем на рис. 4 и 6 при замене L на $a + L$.

Несимметричные ДКБ образцы

Образец, показанный на рис. 1, симметричен относительно плоскости разрушения. Если высота h_1 одного плеча образца не равна высоте h_2 другого плеча, то в соответствии с формулой (3) будут различаться и осевые моменты инерции се-

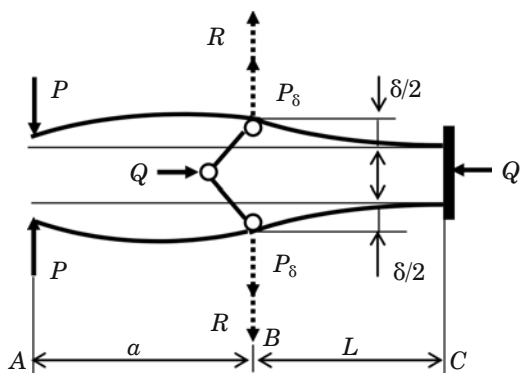


Рис. 10. Схема силового нагружения в сечении А после жесткого прогиба на δ в сечении В

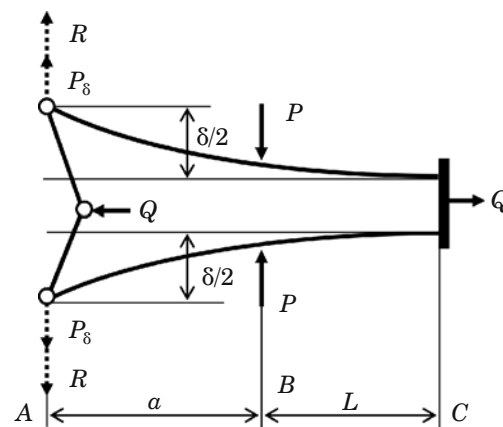


Рис. 11. Схема силового нагружения в сечении В после жесткого прогиба на δ в сечении А

чений I_{z1} и I_{z2} . Могут отличаться и модули упругости материалов плеч — E_1 и E_2 . В этом случае [22] после преобразования формулы (5) получим

$$K = \frac{1}{\sqrt{2t_0}} \sqrt{\frac{M_1(a+L)^2}{I_{z1}} + \frac{M_2(a+L)^2}{I_{z2}}}. \quad (39)$$

При чисто силовом нагружении в соответствии с рис. 2 и 3 изгибающие моменты $M_1(a+L)$ и $M_2(a+L)$ на плечах образца равны. Жесткое нагружение по схеме рис. 6 ($a=0$, $M_1(L) = 3\delta_1 E_1 I_{z1}/L^2$, $M_2(L) = 3\delta_2 E_2 I_{z2}/L^2$) приводит формулу (39) к виду

$$K = \frac{3}{L^2 \sqrt{2t_0}} \sqrt{\delta_1^2 E_1^2 I_{z1} + \delta_2^2 E_2^2 I_{z2}}. \quad (40)$$

Прежде всего отметим, что все десять формул КИН для двухбалочных образцов (ДКБ образцов) и углов разворота торцевых сечений получены в балочном приближении, являются хорошими ориентирами, но, несомненно, в ряде случаев потребуется их уточнение, например, с применением метода конечных элементов. Из десяти рассмотренных случаев нагружения экспериментально опробованы четыре (см. схемы на рис. 2–4 и 6). Представляется весьма перспективной схема нагружения на рис. 5, которая обеспечивает независимость КИН от длины трещины.

Приведенные зависимости угла разворота торцевых сечений от длины трещины свидетельствуют о возможности применения дополнительного метода контроля за длиной трещины (помимо метода разности электрических потенциалов и др.). Пример использования угла разворота сечения для измерения длины трещины приведен в статье [21]. Метод оказался весьма перспективным при проведении испытания образцов в коррозионных средах.

На данный момент времени разработано большое число образцов для испытаний материалов (только в [17] описано 11 образцов для испытаний на циклическую трещиностойкость). Возникает проблема сопоставления и выбора образца на основе некоторых критериев. Сравнительный анализ методов испытаний на усталостную трещиностойкость дан в работах [15, 24]. В работе [25] сделана попытка оценки измерительной способности образцов для испытаний на усталостную трещиностойкость на основе введения понятия абсолютного и относительного диапазона измерений трещины. Представляется, что данная статья будет способствовать появлению работ в направлении классификации, обобщения, оценки и развития методов испытаний материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Obreimoff I. W. The splitting strength of mica // Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A. 1930. Vol. CXXVII. N 804. P. 290 – 297.
2. Кузнецов В. Д. Поверхностная энергия твердых тел. — М.: ГИТТЛ, 1954. — 220 с.
3. Гилман Дж. Дж. Скол, пластичность и вязкость кристаллов. — В кн.: Атомный механизм разрушения. — М.: ГИТИЛ, 1963. С. 218 – 253.
4. Риплинг Э. Дж. Проблемная дискуссия / Прикладные вопросы вязкости разрушения. — М.: Мир, 1968. С. 530 – 532.
5. Краев А. Г., Марковцев В. М., Яблонский И. С. О влиянии среды на рост усталостной трещины в сплавах В95пчТ2 и Д19пчТ / В сб.: Физика и механика деформации и разрушения. Вып. 5. — М.: Атомиздат, 1978. С. 63 – 67.
6. Roy A. Stress corrosion cracking test using DCB specimens. — Lawrence Livermore National Laboratory, 1996. — 8 p.
7. Kanninen M. F. An augmented double cantilever beam model for studying crack propagation and arrest / Int. J. Fract. 1973. Vol. 9. N 1. P. 83 – 92.
8. Марковцев В. М., Краев А. Г., Бобринский А. П. и др. Исследования вязкости разрушения корпусной стали 12Х2МФА по моменту старта и остановки трещины при неизотермических условиях испытаний / В сб.: Физика и механика деформации и разрушения. Вып. 4. — М.: Атомиздат, 1977. С. 41 – 47.

9. Лышов Л. Л., Маркочев В. М., Барабанов В. Н. Определение трещиностойкости углеродистых материалов по остановке трещины / Заводская лаборатория. 1983. Т. 49. № 4. С. 76 – 80.
10. Franklin V. A., Christopher T. Fracture energy estimation on DCB specimens made of glass/epoxy. An experimental study / Adv. Mater. Sci. Eng. 2013. Vol. 2013. Article ID41206. P. 7.
11. Bardis J. D., Kedward K. T. Surface preparation effects on mode I testing of adhesively bonded composite / J. of Composites Technology & Research. 2002. Vol. 24. N 1. P. 30 – 37.
12. Arola D., Rouland J. A., Zhang D. Fracture of bovine dentin / Experimental Mechanics. 2002. Vol. 42. N 4. P. 380 – 388.
13. Маркочев В. М., Краев А. Г. Методика исследований роста усталостных трещин при постоянном значении размаха коэффициента интенсивности напряжений / Заводская лаборатория. 1976. Т. 42. № 4. С. 469 – 473.
14. Гольцев В. Ю., Маркочев В. М. Методика исследования процессов роста усталостных трещин при постоянном размахе коэффициента интенсивности напряжений / Деформация и разрушение материалов. 2012. № 7. С. 43 – 47.
15. Гольцев В. Ю., Маркочев В. М. Методы стабилизации коэффициента интенсивности напряжений при испытании материала на трещиностойкость и их развитие / Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. № 11 – 12. С. 964 – 970.
16. МР 71–82. Методические рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) на стадии остановки трещины. — М.: ВНИИМАШ Госстандарта, 1982. — 27 с.
17. РД 50-345–82. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. — М.: Издательство стандартов, 1983. — 96 с.
18. МР 14–01. Определение зависимости трещиностойкости (вязкости разрушения) от скорости распространения трещины / В кн.: Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Т. 2. — М.: Ассоциация КОДАС, 2001. С. 143 – 167.
19. Зайнуллин Р. С., Абдуллин Л. Р. Модифицированный ДКБ образец для испытаний на трещиностойкость / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 8. С. 66 – 67.
20. Biel A., Stigh U. An analysis of the evaluation on fracture energy using DCB-specimen / Arch. Mech. 2007. Vol. 42. N 4 – 5. P. 311 – 327.
21. Гольцев В. Ю., Краев А. Г., Маркочев В. М. Исследовательские возможности применения образцов типа двухконсольной балки / Деформация и разрушение материалов. 2014. № 7. С. 34 – 43.
22. Гольцев В. Ю., Маркочев В. М. Коэффициент интенсивности напряжений двухбалочного образца при различных схемах жесткого нагружения / Деформация и разрушение материалов. 2014. № 8. С. 40 – 46.
23. Гольцев В. Ю., Маркочев В. М. Коэффициенты интенсивности напряжений в ДКБ образце при деформационно-силовом нагружении его консолей / Атомная энергия. 2014. Т. 117. № 9. С. 137 – 142.
24. Гольцев В. Ю., Маркочев В. М. Сравнительный анализ методов испытания материалов на усталостную трещиностойкость / Атомная энергия. 2015. Т. 118. № 1. С. 14 – 18.
25. Гольцев В. Ю., Маркочев В. М. Измерительная способность образцов для испытаний на усталостную трещиностойкость / Атомная энергия. 2015. Т. 118. № 2. С. 85 – 90.
5. Kraev A. G., Markochev V. M., Yablonskii I. S. About the influence of environment on the growth of fatigue cracks in alloys V95pchT2 and D19pchT / In coll.: Physics and mechanics of deformation and fracture. Issue 5. — Moscow: Atomizdat, 1978. P. 63 – 67 [in Russian].
6. Roy A. Stress corrosion cracking test using DCB specimens. — Lawrence Livermore National Laboratory, 1996. — 8 p.
7. Kanninen M. F. An augmented double cantilever beam model for studying crack propagation and arrest / Int. J. Fract. 1973. Vol. 9. N 1. P. 83 – 92.
8. Markochev V. M., Kraev A. G., Bobrinskii A. P., et al. Study of fracture toughness of the vessel steel 12Kh2MFA at the time of the start and stop of a crack with non-isothermal test conditions / In coll.: Physics and mechanics of deformation and fracture. Issue 4. — Moscow: Atomizdat, 1977. P. 41 – 47 [in Russian].
9. Lyshov L. L., Markochev V. M., Barabanov V. N. Determination of fracture toughness of carbon-graphite materials to stop the cracks / Zavod. Lab. 1983. Vol. 49. N 4. P. 76 – 80 [in Russian].
10. Franklin V. A., Christopher T. Fracture energy estimation on DCB specimens made of glass/epoxy. An experimental study / Adv. Mater. Sci. Eng. 2013. Vol. 2013. Article ID41206. P. 7.
11. Bardis J. D., Kedward K. T. Surface preparation effects on mode I testing of adhesively bonded composite / J. of Composites Technology & Research. 2002. Vol. 24. N 1. P. 30 – 37.
12. Arola D., Rouland J. A., Zhang D. Fracture of bovine dentin / Experimental Mechanics. 2002. Vol. 42. N 4. P. 380 – 388.
13. Markochev V. M., Kraev A. G. The technique of researches of fatigue-crack growth at a constant value of the amplitude of the stress intensity factor / Zavod. Lab. 1976. Vol. 42. N 4. P. 469 – 473 [in Russian].
14. Gol'tsev V. Yu., Markochev V. M. Methods of research of processes of growth of fatigue cracks under constant amplitude of stress intensity factor / Deform. Razrush. Mater. 2012. N 7. P. 43 – 47 [in Russian].
15. Gol'tsev V. Yu., Markochev V. M. Methods of stabilization of the stress intensity factor in the test material to the fracture toughness and their development / Yadern. Fiz. Inzh. 2013. Vol. 4. N 11 – 12. P. 964 – 970 [in Russian].
16. MR 71–82. Methodical recommendation. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Characterization of fracture toughness (crack resistance) at the stage stop cracks. — Moscow: VNIINMASH Gosstandarta, 1982. — 27 p. [in Russian].
17. RD 50-345–82. Determination of crack resistance (fracture toughness) characteristics under cyclic loading. — Moscow: Izd. standartov, 1983. — 96 p. [in Russian].
18. MR 14–01. Determination of the dependence of crack resistance (fracture toughness) on the velocity of crack propagation / In book: The mechanics of disasters. Determination of characteristics of crack resistance of structural materials. Vol. 2. — Moscow: Assotsiatsiya KODAS, 2001. P. 143 – 167 [in Russian].
19. Zainullin R. S., Abdullin L. R. The modified DKB test specimen for fracture toughness / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2008. Vol. 74. N 8. P. 66 – 67 [in Russian].
20. Biel A., Stigh U. An analysis of the evaluation on fracture energy using DCB-specimen / Arch. Mech. 2007. Vol. 42. N 4 – 5. P. 311 – 327.
21. Gol'tsev V. Yu., Kraev A. G., Markochev V. M. Research of possibility of application of the samples the type of double-cantilever beams / Deform. Razrush. Mater. 2014. N 7. P. 34 – 43 [in Russian].
22. Gol'tsev V. Yu., Markochev V. M. The stress intensity factor double beam sample under different loading hard / Deform. Razrush. Mater. 2014. N 8. P. 40 – 46 [in Russian].
23. Gol'tsev V. Yu., Markochev V. M. The stress intensity factors in the DCB sample during deformation-force loading its consoles / Atom. Énerg. 2014. Vol. 117. N 9. P. 137 – 142 [in Russian].
24. Gol'tsev V. Yu., Markochev V. M. Comparative analysis of methods for testing materials in fatigue crack growth resistance / Atom. Énerg. 2015. Vol. 118. N 1. P. 14 – 18 [in Russian].
25. Gol'tsev V. Yu., Markochev V. M. Measuring the ability of test specimen on fatigue crack growth resistance / Atom. Énerg. 2015. Vol. 118. N 2. P. 85 – 90.

REFERENCES