

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-2-61-68>

ГЕОМЕТРИЯ ОБРАЗЦА С ШЕВРОННЫМ НАДРЕЗОМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ И СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ

© Игорь Александрович Скотников

Всероссийский институт легких сплавов, Россия, 121596, Москва, ул. Горбунова, д. 2; e-mail: isko57@yandex.ru

*Статья поступила 16 января 2019 г. Поступила после доработки 26 июля 2019 г.
Принята к публикации 16 октября 2019 г.*

Цель работы — оптимизация метода определения вязкости разрушения на образцах с шевронным надрезом. С использованием известных положений механики разрушения определена геометрия образца с шевронным надрезом, обеспечивающая независимость коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины в диапазоне, достаточном для его практического применения. Сформулировано требование к форме зависимости податливости — длина трещины для образца с шевронным надрезом. Обоснован выбор формы поперечного сечения образца с шевронным надрезом, геометрических размеров образца и приведена схема захватного приспособления. Получена и экспериментально подтверждена формула для расчета вязкости разрушения по максимальной нагрузке испытания и толщине образца. Проведено сравнение результатов испытаний на вязкость разрушения с использованием образцов с шевронным надрезом и стандартных образцов для ряда алюминиевых сплавов. Получены данные о масштабном факторе и коэффициенте вариации при определении вязкости разрушения. Приведены результаты исследования распределения вязкости разрушения по высоте толстых плит из сплавов 1163Т1 и В95пчТ2. Построена температурная зависимость вязкости разрушения плиты из сплава 1201Т1 в интервале температур от -196 до $+200$ °С при использовании образцов с шевронным надрезом. Рассмотрены особенности применения образцов с шевронным надрезом для определения скорости роста трещины, связанные с независимостью коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины от ее длины в достаточно широком диапазоне. Описана методика определения скорости роста трещины и приведены результаты оценки $da/dN - \Delta K$ для плиты из алюминиевого сплава 1163Т. Простота и надежность методов определения вязкости разрушения и скорости роста трещины (усталости, ползучести, коррозии) на образцах с шевронным надрезом предложенной геометрии позволяют рекомендовать их для проведения контроля и исследований в различных условиях испытаний.

Ключевые слова: образец с шевронным надрезом; податливость; вязкость разрушения; скорость роста трещины; алюминиевые сплавы.

OPTIMIZATION OF CHEVRON-NOTCHED SHORT BAR SPECIMEN CONFIGURATION FOR DETERMINATION OF THE FRACTURE TOUGHNESS AND CRACK GROWTH RATE OF ALUMINUM ALLOYS

© Igor A. Skotnikov

All-Russian Institute of light alloys, 2, Gorbunova str., 121596, Moscow, Russia; e-mail: isko57@yandex.ru

Received January 16, 2019. Revised July 26, 2019. Accepted October 16, 2019.

The goal of the study is optimization of the fracture toughness determination procedure on the samples with a chevron notch. Well-known principles of fracture mechanics are used to determine the geometry of a specimen with a chevron notch, which ensures the independence of the stress intensity factor from the crack length in the range sufficient for its practical application. A requirement to the shape of the dependence “compliance – crack length” is formulated for a chevron-notched specimen. The choice of the cross-sectional shape of the specimen with a chevron notch, the geometric dimensions of the specimen, and the drawing of the gripping device are justified. The formula for calculation of the fracture toughness from the maximum test load and thickness of the specimen is derived and experimentally validated. The results of the fracture toughness tests of the samples with a chevron notch and standard samples are compared for a number of aluminum alloys. The data on the scale factor in the range of a sample thicknesses of 12.5, 25, and 50 mm and variation coefficient obtained upon the fracture toughness determination revealed the absence of the significant effect of the scale factor, 6% variation under the normal law of the fracture toughness distribution in the tests of chevron-notched specimens. The results on the fracture

toughness distribution in the height of the thick plates of alloys 1163T1 and V95pchT2 are presented. The temperature dependence of the fracture toughness of the plate (alloy 1201T1) are constructed for chevron-notched specimens within a temperature range of $-196 - +200^{\circ}\text{C}$. The features of using chevron-notched specimens for determination of the crack growth rate attributed to independence of the stress intensity factor at the crack tip on crack length are considered in a rather wide range. The method of the crack growth rate determination is described and the results of assessing $da/dN - \Delta K$ for an aluminum alloy plate 1163T are presented. The simplicity and reliability of the methods for determination of the fracture toughness and fracture growth rate (fatigue, creep, corrosion) on chevron-notched specimen of the proposed geometry allow us to recommend them for control tests and research in various test conditions.

Keywords: chevron-notched specimen; compliance; fracture toughness; crack growth rate; aluminum alloys.

Введение

Преимущества и недостатки метода определения вязкости разрушения K_{IcV} на образцах с шевронным надрезом (chevron-notched short bar specimens) хорошо известны [1 – 14]. Данная работа посвящена обоснованию, оптимизации и практическому использованию метода.

Воспользуемся известным соотношением Ирвина – Киса для скорости высвобождения энергии в общем виде для образца с трещиной произвольной формы [15]:

$$G_1 = \frac{P^2}{2} \frac{dC}{dS}, \quad (1)$$

где P — нагрузка на образце; C — податливость образца; S — площадь, образующаяся при подрастании трещины. Схема образца с шевронным надрезом приведена на рис. 1.

Площадь трещины, возникающей в вершине шеврона при нагружении образца,

$$S = \frac{B}{2(W - a_0)} (a - a_0)^2, \quad (2)$$

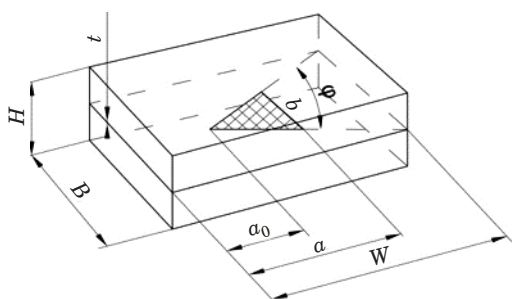


Рис. 1. Схема образца с шевронным надрезом: H — высота образца; B — ширина (толщина) образца; a_0 — длина консоли (расстояние от оси нагружения до вершины надреза); a — длина трещины; W — расстояние от оси нагружения до заднего торца; ψ — угол шеврона; b — ширина фронта трещины; t — ширина надреза

Fig. 1. The scheme of a chevron-notched sample, where H — height of the sample; B — width (thickness) of the sample; a_0 — length of the console (distance from the loading axis to the top of the notch); a — crack length; W — distance from the loading axis to the rear end; ψ — chevron angle; b — width of the crack front; t — width of the notch

соответственно,

$$dS = \frac{B}{W - a_0} (a - a_0) da. \quad (3)$$

С учетом (3) получим следующее выражение для скорости высвобождения энергии в образце с шевронным надрезом:

$$G_1 = \frac{P^2}{2B} \frac{W - a_0}{a - a_0} \frac{dC}{da}. \quad (4)$$

Учитывая (4), а также известное соотношение скорости высвобождения энергии и коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины

$$G_1 = K_1^2 \frac{1 - \mu^2}{E}, \quad (5)$$

получим выражение для коэффициента интенсивности напряжений в виде

$$K_1 = \frac{P}{B^{3/2}} \sqrt{\frac{W - a_0}{2(a - a_0)} \frac{d(EBC/(1 - \mu^2))}{d(a/B)}}. \quad (6)$$

Формулу (6) можно значительно упростить, если выбрать форму образца, при которой выражение в фигурных скобках превращается в константу. Такая геометрия образца обеспечивает следующую квадратичную зависимость податливости от длины трещины:

$$\frac{EBC}{1 - \mu^2} = \frac{EBC_0}{1 - \mu^2} + \lambda \left(\frac{a - a_0}{B} \right)^2, \quad (7)$$

где λ — коэффициент аппроксимирующего экспериментальные данные полинома. Подстановка (7) в (6) и использование максимального значения нагрузки испытания позволяют получить искомую формулу для определения критического коэффициента интенсивности напряжений (вяз-

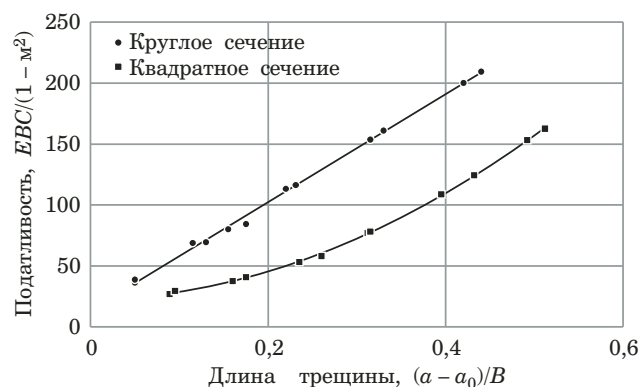


Рис. 2. Зависимости податливости от длины трещины для образцов круглого и квадратного поперечных сечений

Fig. 2. Comparison of compliance dependence on crack length for samples with a round and square cross section

кости разрушения) на образце с шевронным надрезом:

$$K_{1cV} = \frac{P_{\max}}{B^{3/2}} \sqrt{\frac{\lambda(W - a_0)}{B}} = A \frac{P_{\max}}{B^{3/2}}, \quad (8)$$

где $A = \text{const}$ и не зависит от длины трещины в образце, т.е. вязкость разрушения в данном случае определяется только нагрузкой испытания без записи диаграммы нагрузка – раскрытие трещины.

Экспериментальные результаты

Определяли геометрию образца, обеспечивающую требуемую в соответствии с выражением (7) форму зависимости податливости от длины трещины.

Сначала изготавливали образцы круглого и квадратного поперечных сечений из прессованных полос сплава типа Д16. Для всех образцов в данном исследовании угол в вершине шевронного надреза $\psi = 60^\circ$, толщина (диаметр) $B = 25$ мм. Основание шевронного надреза совмещено с задним торцом образца — такое положение шевронного надреза в образце зафиксировано в стандарте ASTM E 1304.

Для определения зависимости податливости – длина трещины трещину имитировали прорезью 0,3 мм, выполненной на электроискровом станке. Податливость измеряли с использованием двухконсольного датчика раскрытия (рис. 2). Цилиндрическая форма образца была исключена из дальнейшего рассмотрения вследствие линейности зависимости между податливостью образца и длиной трещины.

Серия экспериментов по исследованию влияния высоты образца прямоугольного сечения (15 – 35 мм) и длины его консоли (6 – 20 мм) на

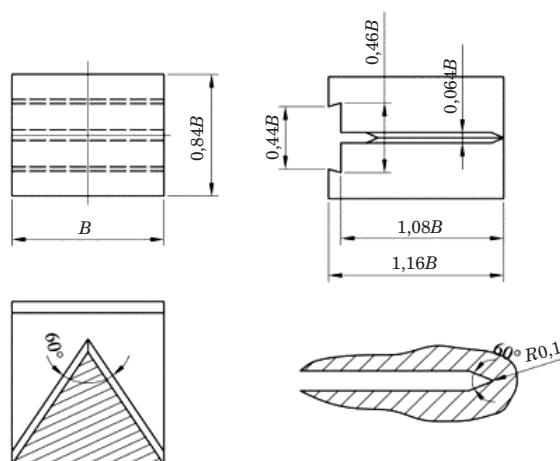


Рис. 3. Размеры образца с шевронным надрезом

Fig. 3. The dimensions of a chevron-notched sample

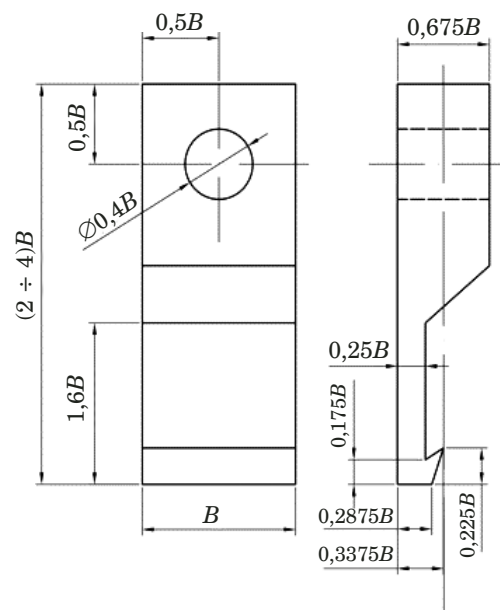


Рис. 4. Схема захвата для испытания образцов с шевронным надрезом

Fig. 4. Gripper tool for testing chevron-notched samples

характер зависимости податливости от длины трещины позволила определить требуемую геометрию образца [12]. Экспериментальные данные по податливости образца с $H = 21$ мм и $a_0 = 6$ мм в зависимости от длины трещины аппроксимируются уравнением

$$\frac{EBC}{1 - \mu^2} = 43,4 + 418 \left(\frac{a - a_0}{B} \right)^2 \quad (9)$$

со среднеквадратической погрешностью аппроксимации около 6 %.

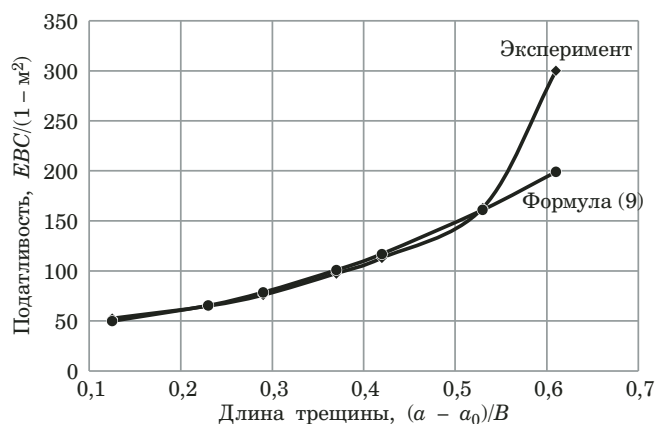


Рис. 5. Зависимость податливости – длина трещины для выбранного образца с шевронным надрезом

Fig. 5. The dependence of the compliance on the crack length for the selected chevron-notched sample

Подстановка размеров образца и $\lambda = 418$ в (8) дает искомую формулу для определения вязкости разрушения

$$K_{IcV} = \frac{P_{\max}}{B^{3/2}} \sqrt{\frac{\lambda(W - a_0)}{B}} = 18,7 \frac{P_{\max}}{B^{3/2}}. \quad (10)$$

Соотношения размеров данного образца и захватов для испытаний показаны на рис. 3 и 4. Для испытания образцов из титановых сплавов применяются захваты усиленной конструкции.

На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость податливости от длины трещины для выбранного образца и ее аппроксимация в соответствии с уравнением (9).

В диапазоне $(0,12 - 0,53)(a - a_0)/B$ или $(0,11 - 0,49)(a - a_0)/W$ коэффициент интенсивности напряжений не зависит от длины трещины. В данном диапазоне происходили практически все зафиксированные случаи разрушения образцов.

Следует отметить, что при испытании выбранного образца уже не требуется применения датчика раскрытия трещины.

Далее сравнивали K_{IcV} со стандартными значениями K_{Ic} различных материалов. Для построения диаграммы $K_{IcV} - K_{Ic}$ испытывали следующие полуфабрикаты: панели из сплавов Д16чТ и Д16пчТ; плиты из сплавов Д16чТ1 и АК4-1Т1; штамповки из сплава В93пчТ2; полосы из сплавов В95пчТ2 и ВМД-10. В зависимости от типа полуфабриката использовали ориентировки образцов ДП, ПД и ВД. Ввиду неоднородности свойств по сечению полуфабрикатов образцы вырезали и изготавливали таким образом, чтобы плоскости развития трещин в стандартных образцах и образцах с шевронным надрезом совпадали. На рис. 6 приведены результаты сравнения экспериментальных значений вязкости разрушения $K_{IcV} - K_{Ic}$. Каждая точка на диаграмме является средним из 6 – 9 измерений.

В табл. 1 приведены результаты статистической обработки данных испытаний на K_{IcV} образцов из плиты Д16чТ1 толщиной 30 мм. Характеристики разброса результатов испытаний соответствуют существующему стандартному методу.

Исследование влияния масштабного фактора. Для изучения масштабного фактора использовали подобные образцы с шевронным надре-

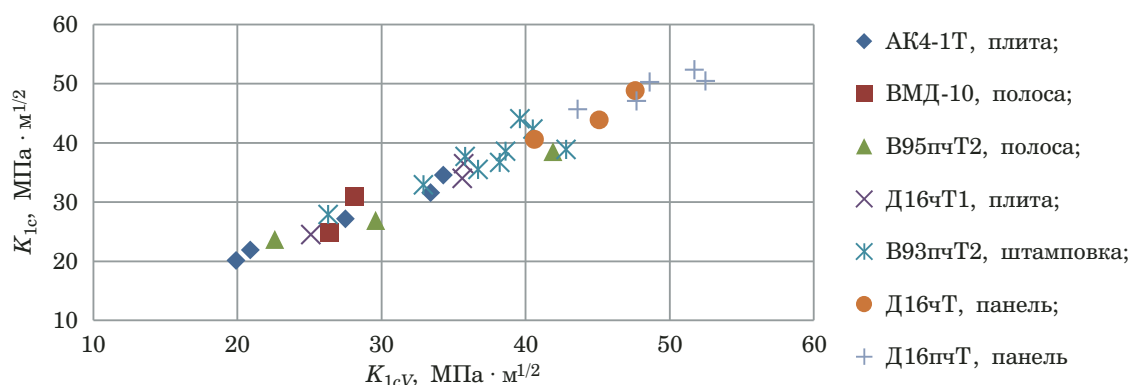


Рис. 6. Диаграмма $K_{IcV} - K_{Ic}$

Fig. 6. Diagram $K_{IcV} - K_{Ic}$

Таблица 1. Результаты статистической обработки

Table 1. The results of statistical processing

Сплав/Полуфабрикат	Число испытаний	Ориентировка образцов	Среднее K_{IcV} , $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	Стандартное отклонение, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	Коэффициент вариации, %	Закон распределения
Д16чТ1/Плита $t = 30$ мм	135	ВД	34,4	2,07	6,02	Нормальный

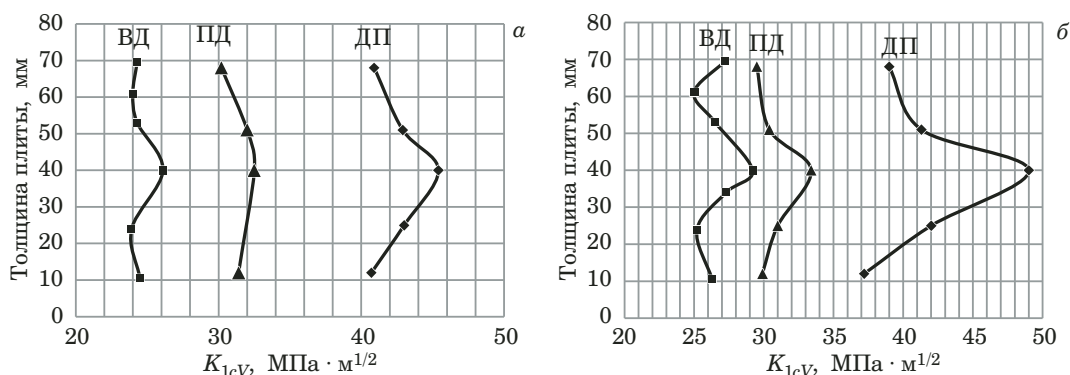


Рис. 7. Распределение K_{IcV} по высоте плит из сплавов 1163Т1 (а) и В95пчТ2 (б) в центральной по ширине части плит

Fig. 7. K_{IcV} distribution in the height of plates: alloys 1163T1 (a) and V95pчT2 (b) in the central part of the plate width

зом толщиной 12,5, 25,0 и 50,0 мм. Заготовки под образцы вырезали из центральной части плиты толщиной 60 мм из сплава В95пчТ2. При изготовлении образцов контролировали неизменность места вырезки по высоте и ширине плиты, а также сохранение ориентировки образцов и плоскости надреза. Применяли образцы с ориентировками ДП, ПД и ВД. Данные табл. 2 свидетельствуют об отсутствии влияния масштабного фактора на результаты определения вязкости разрушения на образцах с шевронным надрезом из указанного сплава.

Примеры применения

Приведем примеры применения образца с шевронным надрезом выбранной геометрии. Во всех приведенных ниже случаях использовали образец толщиной 25 мм.

Распределение K_{IcV} по толщине плит из сплавов 1163Т1 и В95пчТ2. На рис. 7 представлены результаты экспериментального определения вязкости разрушения K_{IcV} по толщине плит из сплавов 1163Т1 и В95пчТ2 толщиной 80 мм. Образцы вырезали из центральной по ширине части плит.

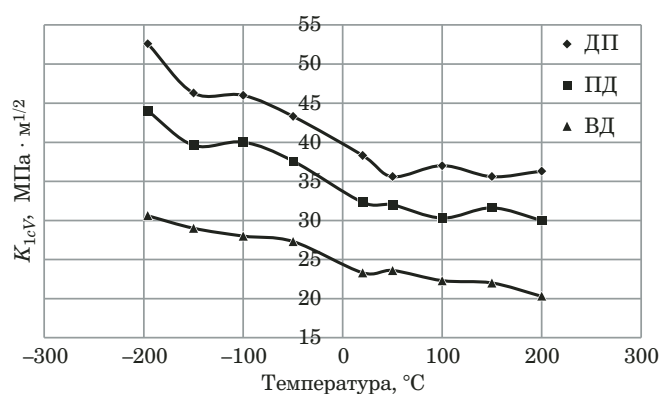


Рис. 8. Температурная зависимость вязкости разрушения K_{IcV} плиты из сплава 1201Т1

Fig. 8. Temperature dependence of the fracture toughness K_{IcV} of the plate made of alloy 1201T1

Следует отметить, что применение для аналогичной цели образцов с шевронным надрезом толщиной 50 мм дает значения вязкости разрушения K_{IcV} , более близкие к K_{Ic} , определяемому стандартным методом, но характер изменения вязкости разрушения по высоте плит сохраняется.

Таблица 2. Влияние масштабного фактора на K_{IcV}

Table 2. The effect of the scale factor on K_{IcV}

Сплав/Полуфабрикат	Ориентировка образцов	Толщина образцов, мм	Число испытаний	Среднее K_{IcV} , МПа · м ^{1/2}
В95пчТ2/Плита $t = 60$ мм	ВД(SL)	12,5	21	25,6
		25,0	14	26,0
		50,0	19	27,5
	ПД(TL)	12,5	21	33,8
		25,0	22	33,9
		50,0	20	32,6
	ДП(LT)	12,5	25	49,8
		25,0	21	49,6
		50,0	17	48,4

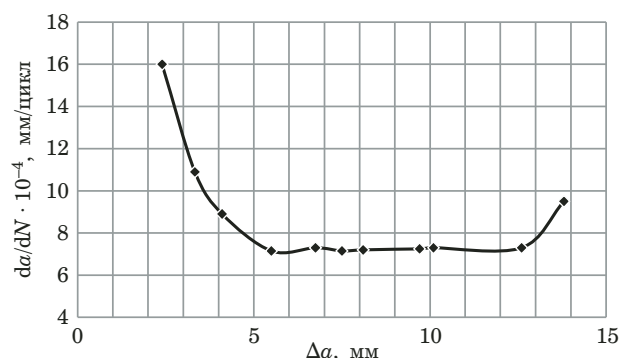


Рис. 9. Зависимость da/dN от приращения длины усталостной трещины в выбранном образце

Fig. 9. Dependence of da/dN on the increment of the fatigue crack length in the selected sample

Температурная зависимость вязкости разрушения K_{IcV} плиты из сплава 1201Т1. На рис. 8 приведены результаты экспериментального определения вязкости разрушения K_{IcV} плиты из сплава 1201Т1 в интервале температур от -196 до $+200$ °С.

Испытания проводили на универсальной испытательной машине, оснащенной печью и криокамерой. В качестве охлаждающей среды использовали жидкий азот и пары азота. Отсутствие необходимости в использовании датчика раскрытия значительно облегчало процедуру испытания.

Определение скорости роста усталостной трещины da/dN . Наличие в образце зоны, где коэффициент интенсивности напряжений не зависит от длины трещины, позволяет проводить циклические испытания с постоянным размахом КИН ΔK при распространении трещины в этой зоне. Это дает возможность определять осредненное по длине трещины значение скорости роста усталостной трещины da/dN при заданном размахе ΔK .

Для наглядности на рис. 9 приведена зависимость скорости роста усталостной трещины от приращения ее длины в выбранном образце с шевронным надрезом. Образцы из сплава В95пчТ2 нагружали при $\Delta K = 14 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до различного числа циклов нагружения, затем разрушали при статическом нагружении и по излому (вдоль оси симметрии образца) определяли приращение длины трещины Δa на инструментальном микроскопе. Скорость роста трещины рассчитывали как отношение приращения длины трещины к числу циклов нагружения, т.е. $da/dN = \Delta a/N$. Из рис. 9 видно, что сначала (первые 5,5 мм) трещина растет ускоренно, затем при дальнейшем продвижении ее скорость становится постоянной. Таким образом, для образца толщиной 25 мм в интервале приращений длин трещин от 6 до 12 мм или диапазоне $(0,22 - 0,44)(a -$

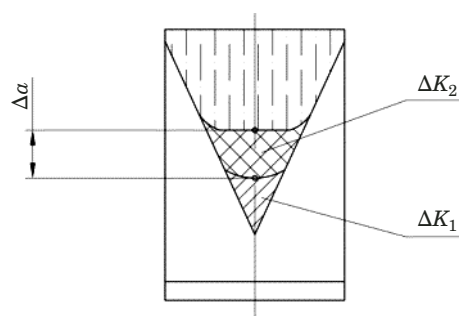


Рис. 10. Схема поверхности разрушения

Fig. 10. Scheme of the fracture surface

$a_0)/W$ возможно определение скорости роста трещины при постоянном ΔK .

Методика испытания для определения da/dN заключается в следующем [13]. Образец устанавливают в захваты испытательной машины, задают необходимые частоту, асимметрию и форму цикла нагружения. Далее задают уровень циклической нагрузки, обеспечивающий размах ΔK_1 вдвое ниже, чем требуется в соответствии с целью исследования, и испытывают образец при циклическом нагружении до подрастания трещины из вершины шевронного надреза на величину около 6 мм. Это необходимо для того, чтобы трещина прошла зону ускоренного роста и вышла в зону измерения. Величину подрастания трещины определяют визуально или любым другим методом. Испытание останавливают. Затем на том же образце, не вынимая его из захватов, задают уровень циклической нагрузки, обеспечивающий размах ΔK_2 в вершине трещины в соответствии с целью исследования, и испытывают образец при размахе ΔK_2 до подрастания трещины Δa на величину 2 – 5 мм, после чего испытание останавливают, фиксируют число циклов нагружения N_2 и доводят образец до разрушения при статическом нагружении. На поверхности разрушения (излома) образца (рис. 10) с использованием инструментального микроскопа измеряют величину подрастания трещины Δa при размахе ΔK_2 вдоль оси симметрии шевронного надреза. Отношение приращения длины трещины Δa к соответствующему числу циклов нагружения N_2 при требуемом уровне ΔK_2 дает искомое значение скорости роста усталостной трещины, т.е. $da/dN = \Delta a/N_2$. На одном образце определять da/dN можно неоднократно. Изломы образцов после испытаний представлены на рис. 11.

На рис. 12 приведены диаграммы $da/dN - \Delta K$ для плиты из сплава 1163Т в направлениях ПД и ДП. Каждое значение скорости роста трещины получено при испытании одного образца с шевронным надрезом. Разброс данных невелик, что объясняется значительным осреднением ско-

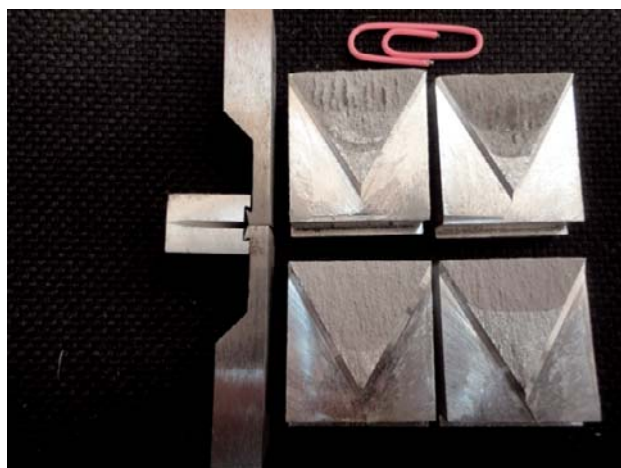


Рис. 11. Изломы образцов после испытаний

Fig. 11. Fractures of the samples after testing

рости роста трещины в испытаниях при $\Delta K = \text{const}$.

Выводы

Определена геометрия образца с шевронным надрезом, обеспечивающая независимость коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины от ее длины в диапазоне длин трещин $(0,11 - 0,49)(a - a_0)/W$. Предлагаемая геометрия образца с шевронным надрезом позволяет определять значения вязкости разрушения алюминиевых сплавов во всем диапазоне ее изменения при различных условиях испытаний. Образец данной геометрии может быть использован для оценки скорости роста трещины усталости, коррозии, ползучести в различных условиях испытаний в диапазоне длин трещин $(0,22 - 0,44)(a - a_0)/W$.

Простота и надежность методов определения вязкости разрушения и скорости роста трещины на образцах с шевронным надрезом предложенной геометрии позволяют рекомендовать их для проведения контроля и исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Munz D. G. Compliance and stress intensity coefficients for short bar specimens with chevron notches/ *Int. J. Fract.* 1980. Vol. 16. N 4. P. 359 – 374.
2. Grant T. J., Weber L., Mortensen A. Plasticity in Chevron-notch fracture toughness testing / *Eng. Fract. Mech.* 2000. Vol. 67. P. 263 – 276.
3. Bartisch M., Zang Z. F., Scheu C., Rühle M., and Messerschmidt U. Fracture parameters of chevron-notched $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$ sandwich specimens / *Z. Metallkd.* 2004. Vol. 95. P. 779 – 784.
4. Рахимкулов Р. Р. Сопоставление значений величины вязкости разрушения K_{1c} , полученной на образцах с шевронной прорезкой и по стандартной методике для стали СтЗсп / Нефтегазовое дело. 2010. № 2. С. 59 – 60.

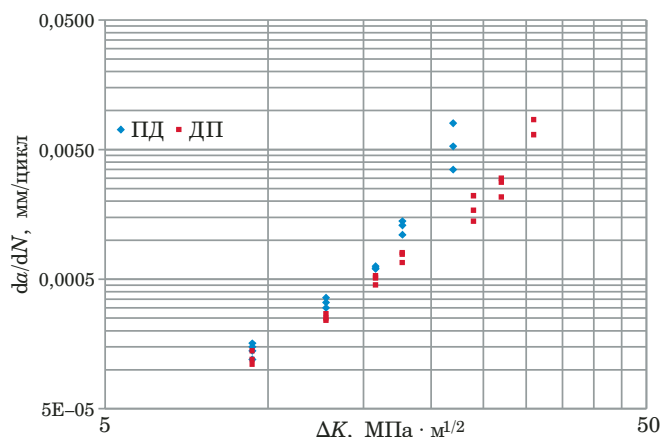


Рис. 12. Диаграммы $da/dN - \Delta K$ для направлений ПД и ДП в плите из сплава 1163Т

Fig. 12. Diagrams $da/dN - \Delta K$ for TL and LT directions in the plate made of alloy 1163T1

5. Dai F., Chen R., Xia K. A Dynamic CCNBD Method for Measuring Dynamic Fracture Parameters. *Dynamic Behavior of Materials / Proceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*. P. 42 – 48.
6. Дерюгин Е. Е., Панин В. У., Суворов Б. И., Кибиткин В. В. Инженерный метод определения трещиностойкости материалов по данным испытаний образцов с шевронным надрезом/ Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 2015: Тезисы докладов. С. 299.
7. Zagar G., Singh A., Pejchal V., Mueller M., Mortensen A. On measuring fracture toughness under load control in the presence of slow crack growth / *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. Vol. 35. P. 3155 – 3166.
8. Berdigulov L. R., Schipachev A. M. Investigation of fracture toughness of metals / *Juvenis scientia*. 2016. N 2. P. 28 – 32.
9. Дерюгин Е. Е., Лепов В. В. Определение трещиностойкости УМЗ материалов при испытании малоразмерных образцов с шевронным надрезом / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 1. С. 64 – 68.
10. Дерюгин Е. Е. Определение трещиностойкости материалов по данным испытаний образцов с шевронным надрезом / LVII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», Севастополь, 2016: Сборник тезисов. С. 59.
11. Deryugin Y., Narkevich N., Antipina N. New Method of Determine Fracture Toughness Characteristics of Small-Size Chevron-Notched Specimens / *Int. J. Innovative Res. Eng. Manag.* 2016. Vol. 3, July. P. 339 – 348.
12. Богданов А. А. Аналитический расчет трещиностойкости материалов по данным испытаний малоразмерных образцов с шевронным надрезом / XV Международная конференция «Перспективы развития фундаментальных работ», Томск, 2018. Т. 1. С. 72 – 74.
13. Erarslan N. The importance of testing method to evaluate the most representative mode I fracture toughness value of brittle rocks / *MOJ Civil Eng.* 2018. Vol. 4(5). P. 437 – 441.
14. Seidl S., Ruziska V., Miarka P., Sobek J. Analysis of various chevron notch types and its influence on the ligament area / *Transactions of the VSB-Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2019. Vol. 19. N 1. P. 28 – 34.
15. Irwin G. R., Kies J. A. Critical Energy Rate Analysis of Fracture Strength / *Weld J.* 1954. Vol. 33. P. 193 – 198.

REFERENCE

1. **Munz D. G.** Compliance and stress intensity coefficients for short bar specimens with chevron notches / *Int. J. Fract.* 1980. Vol. 16. N 4. P. 359 – 374.
2. **Grant T. J., Weber L., Mortensen A.** Plasticity in Chevron-notch fracture toughness testing / *Eng. Fract. Mech.* 2000. Vol. 67. P. 263 – 276.
3. **Bartisch M., Zang Z. F., Scheu C., Rühle M., and Messerschmidt U.** Fracture parameters of chevron-notched $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$ sandwich specimens / *Z. Metallkd.* 2004. Vol. 95. P. 779 – 784.
4. **Rakhimkulov R. R.** Comparison of the values of the fracture toughness K_{1c} obtained on samples with Chevron slotting and the standard method for steel St3sp / *Neftegazovoe delo*. 2010. N 2. P. 59 – 60 [in Russian].
5. **Dai F., Chen R., Xia K.** A Dynamic CCNBD Method for Measuring Dynamic Fracture Parameters. *Dynamic Behavior of Materials / Proceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*. P. 42 – 48.
6. **Deryugin E. E., Panin V. U., Suvorov B. I., Kibitkin V. V.** Engineering method for determining the crack resistance of materials according to the test data of samples with Chevron notch. International conference “Perspective materials with hierarchical structure for new technologies and reliable constructions”, Tomsk, 2015, Abstracts. P. 299 [in Russian].
7. **Zagar G., Singh A., Pejchal V., Mueller M., Mortensen A.** On measuring fracture toughness under load control in the presence of slow crack growth / *J. Eur. Ceram. Soc.* 2015. Vol. 35. P. 3155 – 3166.
8. **Berdigulov L. R., Shipachev A. M.** Investigation of fracture toughness of metals / *Juvenis scientia*. 2016. N 2. P. 28 – 32.
9. **Deryugin E. E., Lepov V. V.** Determination of fracture toughness of materials when testing small-sized samples with Chevron incision / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* Vol. 82. N 1. P. 64 – 68 [in Russian].
10. **Deryugin E. E.** Determination of crack resistance of materials according to test data of samples with Chevron incision / *LVII international conference “Actual problems of strength”, Sevastopol, 2016, Collection of abstracts*. P. 59.
11. **Deryugin Y., Narkevich N., Antipina N.** New Method of Determining Fracture Toughness Characteristics of Small-Size Chevron-Notched Specimens / *Int. J. Innovative Res. Eng. Manag.* 2016. Vol. 3, July. P. 339 – 348.
12. **Bogdanov A. A.** Analytical calculation of fracture toughness of materials on tests of small-sized samples with a chevron notch. *XV international conference “Prospects of development of fundamental works”, Tomsk, 2018*. Vol. 1. P. 72 – 74.
13. **Erarslan N.** The importance of testing method to evaluate the most representative mode I fracture toughness value of brittle rocks / *MOJ Civil Eng.* 2018. Vol. 4(5). P. 437 – 441.
14. **Seitl S., Ruziska V., Miarka P., Sobek J.** Analysis of various chevron notch types and its influence on the ligament area / *Transactions of the VSB-Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2019. Vol. 19. N 1. P. 28 – 34.
15. **Irwin G. R., Kies J. A.** Critical Energy Rate Analysis of Fracture Strength / *Weld J.* 1954. Vol. 33. P. 193 – 198.