

Материаловедение

УДК: 669.295:539.422.23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ*

Е.Е. Дерюгин, Б.И. Суворов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

634021, г. Томск, проспект Академический, 2/4

E-mail: dee@ispms.tsc.ru

На примере технического титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной методами интенсивной пластической деформации (ИПД), описана новая методика определения трещиностойкости материалов по данным испытаний малоразмерных образцов с шевронным надрезом. Решена проблема выделения из общего смещения точек приложения нагрузки части, связанной с изменением податливости образца в процессе распространения трещины. Получены уравнения для расчета удельной энергии разрушения по экспериментальным данным испытаний малоразмерных образцов с шевронным надрезом.

Ключевые слова: ультрамелкозернистая (УМЗ) структура, локализация деформации, разрушение, удельная энергия разрушения.

Введение. Стандартные испытания материалов на трещиностойкость проводятся, как правило, с использованием массивных образцов толщиной не менее 10 мм. Однако во многих случаях удобнее использовать для этой цели малоразмерные образцы с существенно меньшей толщиной. Они для испытаний не требуют большого количества материала и испытательных машин большой мощности. В связи с этим возникает проблема оценки трещиностойкости ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурных материалов, изготовление которых в достаточно объемных заготовках связано с рядом технических проблем. При испытании на вязкость разрушения (трещиностойкость) малоразмерных образцов, как правило, используют образцы с шевронным надрезом [1-5]. Кроме того, в образцах с такой конфигурацией не требуется предварительно наводить усталостную трещину.

В данной работе на примере технического титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ6 описана новая методика определения трещиностойкости (вязкости разрушения) материалов с УМЗ-структурой, полученной методами интенсивной пластической деформации (ИПД). В процессе выполнения работы были проведены важные вычислительные работы, связанные с использованием при испытаниях образцов с шевронным надрезом:

– расчет модуля Юнга E материала;

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Проекты № 08-10-01182а и 12-01-98515-р_восток_а.

Евгений Евгеньевич Дерюгин (д.ф.-м.н., проф.), ведущий научный сотрудник.
Борис Иванович Суворов (к.т.н.), научный сотрудник.

– определение интенсивности высвобождения упругой энергии (трещиодвижущей силы) при продвижении трещины G_s [6].

Определение модуля Юнга при испытании образцов с шевронным надрезом. Данных о величине модуля Юнга материалов с УМЗ-структурой в литературе ограниченное количество. Известно только, что на величину E сильно влияет режим ИПД [7, 8]. Ниже описан способ определения модуля Юнга по данным испытания образцов с шевронным надрезом.

Схема образца с шевронным надрезом приведена на рис. 1. Такую конфигурацию образца можно рассматривать как двухконсольную конструкцию.

Отдельную консоль представляли в виде пачки элементарных консолей (мини-консолей) бесконечно малой толщины dx . Из рис. 1 видно, что длина элементарной консоли на расстоянии x от оси образца равна $l(x) = l_0 + x \cdot \cot(\alpha/2)$, где l_0 – минимальное расстояние от точки приложения нагрузки до границы шевронного надреза, α – угол на конце шевронного надреза. Для каждой консоли в пачке справедлива известная формула из теории упругости [9-11]

$$E = \frac{4dP(x)}{\lambda' dx} \left(\frac{l(x)}{b} \right)^3, \quad (1)$$

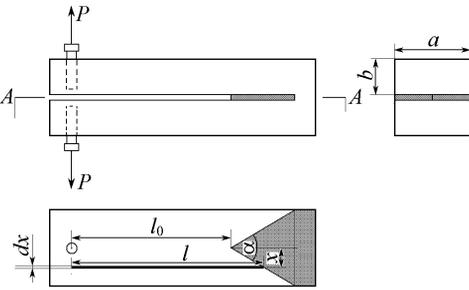


Рис. 1. Схема образца с шевронным надрезом

где b – толщина консоли; dP – нагрузка, которая обеспечивает прогиб консоли шириной dx на величину λ' . Для двухконсольной конструкции смещение точек приложения нагрузки λ в два раза больше, чем λ' , т. е. $\lambda = 2\lambda'$. С учетом этого из соотношения (1) получим зависимость элементарной нагрузки dP , приложенной к концу миниконсоли, через переменную x :

$$dP(x) = \frac{E\lambda}{8} \left(\frac{b}{l(x)} \right)^3 dx. \quad (2)$$

Интегрирование элементарных сил (2), действующих на каждую миниконсоль по всей ширине образца a , определяет действительную нагрузку P , которой соответствует смещение точек приложения нагрузки на величину λ :

$$P = \frac{E\lambda b^3}{8} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \left[l_0 + x \cdot \text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^{-3} dx = \frac{E\lambda a}{4} \left(\frac{b}{l_0} \right)^3 \left[4 + \frac{a}{l_0} \text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right] \left[2 + \frac{a}{l_0} \text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^{-2},$$

где a – ширина образца (см. рис. 1).

Отсюда получаем рабочую формулу для определения модуля Юнга

$$E = \frac{8M}{a} \left(\frac{l_0}{b} \right)^3 \left[2 + \frac{a}{l_0} \text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2 \left[4 + \frac{a}{l_0} \text{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Величина $M = P/\lambda$ характеризует жесткость образца на начальном этапе упругого нагружения.

По формуле (3) были проведены расчеты модуля Юнга для технического титана

BT1-0 и титанового сплава BT6. Для сплава BT6 с крупнокристаллической (КК) структурой (размер зерна $d = 7-10$ мкм) с получили величину $E = 110 \pm 8$ ГПа. Для этого же материала с УМЗ-структурой получили значение $E = 114 \pm 8$ ГПа. Эти величины согласуются со справочными данными [7]. Модули Юнга технического титана BT1-0 в КК и УМЗ состояниях оказались равными 111 ± 8 ГПа и 113 ± 8 ГПа соответственно, что практически не отличается от значения $E = 110$ ГПа для технического титана по справочным данным [12, 13]. Таким образом, проведенные расчеты с использованием данных эксперимента показали следующее:

- уравнение (3) может быть использовано для приблизительного расчета модуля Юнга материалов по данным испытаний образцов с шевронным надрезом;
- измельчение зеренной структуры методами ИПД не приводит к существенному изменению упругих характеристик исследованных образцов.

Определение интенсивности высвобождения упругой энергии при распространении трещины. При определении условия нестабильного распространения трещины целесообразен энергетический подход. Суть энергетического критерия разрушения можно сформулировать следующим образом: рост трещины имеет место, если система может выделить энергию, необходимую для начала распространения трещины на элементарное расстояние dl . Энергия, необходимая для роста трещины, появляется исключительно за счет энергии упругой деформации, возникающей в объеме материала под действием внешней приложенной силы.

Рассмотрим сначала случай образца, имеющего форму двухконсольной балки с узким прямолинейным надрезом (рис. 2). Расстояние от точек приложения нагрузки до границы надреза в принципе является трещиной длиной l_0 . В работе [6] для этого случая показано, что необходимое условие для начала распространения трещины подчиняется уравнению

$$G = \frac{P d\eta}{dS}, \quad (4)$$

где P – приложенная к образцу нагрузка; $dS = 2a \cdot dl$ – удвоенная площадь, заемаемая трещиной при распространении на малое расстояние dl (см. рис. 2); $\eta = \lambda_e/P$ – податливость образца (величина обратная жесткости $M = \lambda_e/P$). Величина G определяет интенсивность высвобождения упругой энергии при распространении трещины. Далее характеристику G мы будем называть удельной энергией разрушения.

Согласно [6], смещение точек приложения нагрузки λ_e для образца шириной a с длиной трещины l обеспечивает нагрузка

$$P = \frac{E\lambda_e a}{8} \left(\frac{b}{l}\right)^3. \quad (5)$$

Податливость такого образца равна

$$\eta = \frac{\lambda_e}{P} = \frac{8}{Ea} \left(\frac{l}{b}\right)^3.$$

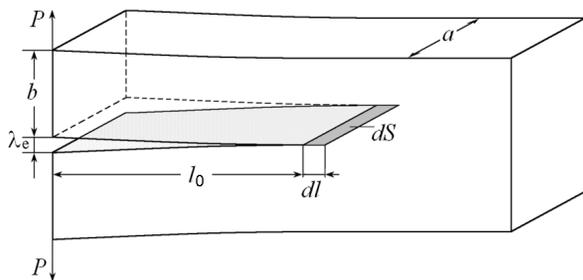


Рис. 2. Образец с прямолинейным надрезом

Учитывая, что $dS = 2a \cdot dl$, найдем производную $d\eta/dS$ в уравнении (4):

$$\frac{d\eta}{dS} = \frac{d\eta}{2adl} = \frac{12 \cdot l^2}{E \cdot a^2 b^3}.$$

Подставив данное выражение в (4), получим

$$G = P^2 \frac{d\eta}{dS} = \frac{12P^2 l^2}{Ea^2 b^3}. \quad (6)$$

Уравнение (6) определяет удельную энергию разрушения по длине трещины l и величине внешней нагрузки P , при которой трещина начинает распространяться.

Подставив в это уравнение выражение (5), получим уравнение для G_s , позволяющее вычислить энергию разрушения по длине трещины l и по величине λ_e :

$$G = \frac{3E \lambda_e^2 b^3}{16 l^4}. \quad (7)$$

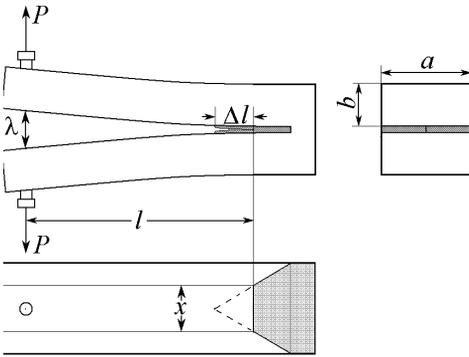


Рис. 3. К определению энергии разрушения G_s

Видно, что в данном представлении величина G не зависит от ширины образца a .

Применим эти соображения к образцу с шевронным надрезом. Допустим, что в процессе нагружения данного образца материал потерял сплошность на участке Δl (рис. 3). Фронт трещины представим в виде прямой линии. Из геометрических построений легко найти, что длина этой линии равна $x = 2\Delta l \operatorname{tg}(\alpha/2)$. К средней части образца шириной x можно применить уравнение (7), в котором длина трещины равна $l = l_0 + \Delta l$. Используя уравнение (7), можно найти удельную энергию разрушения G , если нам будет известно приращение Δl . Кроме того, необходимо знать смещение точек приложения силы λ_e , обусловленное увеличением податливости образца при увеличении длины трещины на Δl .

Следует отметить, что измеренное значение λ (см. рис. 3) кроме λ_e содержит вклад от пластической деформации материала в целом как в устье трещины, так и в объеме образца.

Величину λ_e можно определить, если найти ее зависимость от внешней силы P . Для определения P представим образец с

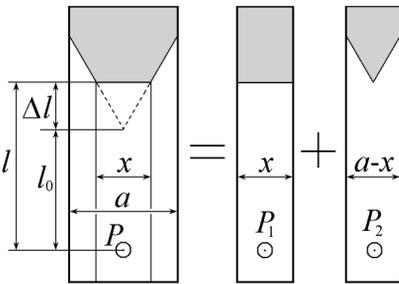


Рис. 4. Представление образца с трещиной в виде двухконсольных балок

трещиной в виде совокупности двухконсольных балок: с прямолинейным надрезом шириной x и с шевронным надрезом шириной $\tilde{\alpha}x$ (рис. 4). Найдем для каждой части силы P_1 и P_2 , определяющие одинаковое смещение λ_e точек приложения этих сил. Используя уравнение (5), легко получить выражение для силы P_1 , действующей на образец шириной $x = 2\Delta l \operatorname{tg}(\alpha/2)$, которая обеспечивает смещение точек приложения нагрузки P_1 на заданную величину λ_e :

$$P_1 = \frac{E \cdot \lambda_e \Delta l}{4} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left(\frac{b}{l} \right)^3. \quad (8)$$

Используя уравнение (3), с учетом того, что ширина образца с шевронным надрезом равна $a - x$, получим выражение для силы P_2 , которая обеспечивает смещение точек приложения нагрузки на ту же величину λ_e :

$$P_2 = \frac{E \lambda_e a}{8} \left(1 - \frac{2 \Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{b}{l} \right)^3 \frac{l}{l_0} \left[4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2 \Delta l}{l_0} \right] \left[2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^{-2}, \quad (9)$$

где $l = l_0 + \Delta l$.

Из уравнений (8) и (9) определяется выражение для λ_e :

$$\lambda_e = \frac{8 P l^3}{E a b^3} \left[\frac{2 \Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \left(1 - \frac{2 \Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \frac{l}{l_0} \left[4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2 \Delta l}{l_0} \right] \left[2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^{-2} \right]^{-1}, \quad (10)$$

где $P = P_1 + P_2$.

Уравнения (7) и (10) были использованы для вычисления энергии разрушения, определяющей необходимое условие для спонтанного распространения трещины в исследуемых материалах.

На рис. 5 приведены типичные диаграммы нагружения для титанового сплава ВТ6 и технического титана ВТ1-0 с УМЗ-структурой, полученные при испытаниях малоразмерных образцов с шевронным надрезом. Обе диаграммы соответствуют скорости нагружения $v = 2,0$ мкм/с. Образцы длиной 18 мм были изготовлены из прутков сечением 6×6 мм².

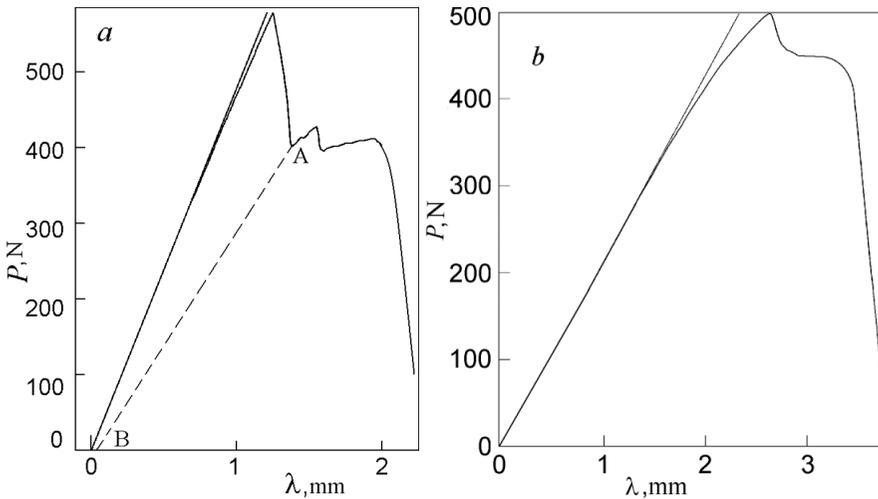


Рис. 5. Диаграммы нагружения сплава ВТ6 (а) и технического титана ВТ1-0 (б) с УМЗ-структурой

Расчеты показали, что на пике нагрузки значение G_s максимально и, следовательно, может служить критерием трещиностойкости исследуемых материалов при заданных геометрических параметрах и условиях нагружения образцов.

В качестве критерия трещиностойкости в инженерной механике разрушения для

трещины отрыва используется, как правило, коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{EG_s}{1-\nu^2}}, \quad (11)$$

где G_s – критическая энергия разрушения. Формула (11) позволяет определить величину K_{Ic} через критическую удельную энергию разрушения G_s .

Значения характеристик трещиностойкости исследованных нами материалов приведены в таблице. Видно, что энергии разрушения сплава ВТ6 в крупнокристаллическом и УМЗ-состояниях сильно отличаются.

Размерность характеристики G_s – энергия на единицу площади. Однако эта величина не является поверхностной энергией материала. Последняя на несколько порядков меньше, чем энергия разрушения G_s . Так, например, поверхностная энергия титана равна 1,7 Дж/м² [12], в то же время величина энергии разрушения технического титана, согласно нашим расчетам, $G_s = 27,82$ кДж/м². Совпадение величин G_s и поверхностной энергии будет наблюдаться только в случае абсолютно хрупкого разрушения. Колоссальное отличие обусловлено тем, что в металлах и сплавах интенсивно развиваются процессы пластической деформации, которые вызывают существенное изменение формы и напряженно-деформированное состояние локального объема у вершины трещины.

Механические характеристики технического титана ВТ1-0 и ВТ6

Материал	λ_p/λ_c	G_s , кДж/м ²	K_{Ic} , МПа/м ^{1/2}	E , ГПа
ВТ1-0 УМЗ	0,17	27,82	56,1	113
ВТ1-0 КК		>60		111
ВТ6 УМЗ	0,13	20,81	48,7	114
ВТ6 КК	0,37	26,05	53,5	110

Согласно уравнению (10) значения λ_c равны 1,07 и 1,914 мм для ВТ6 и ВТ1-0 соответственно. Эти величины оказались меньше экспериментально измеренных значений смещений точек приложения нагрузки λ , а именно: $\lambda = 1,19$ мм для ВТ6 и $\lambda = 2,23$ мм для ВТ1-0. Разница между измеренными и вычисленными значениями обусловлена дополнительным вкладом λ_p пластической деформации в смещения точек приложения нагрузки: $\lambda_p = 0,14$ мм для ВТ6 и $\lambda_p = 0,33$ мм для ВТ1-0. Отношение λ_p/λ_c , по-видимому, может служить механической характеристикой образца, определяющей относительный вклад пластического изменения формы образца в смещение, обусловленное изменением податливости образца.

Заключение. В работе на примере технического титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ6 с УМЗ-структурой описана новая методика определения трещиностойкости материалов по данным испытаний малоразмерных образцов с шевронным надрезом. Решена проблема выделения вклада пластической деформации в смещения точек приложения нагрузки, не связанные с изменением податливости образца в процессе распространения трещины.

В работе решен ряд важных вычислительных задач, связанных с использованием в испытаниях образцов с шевронным надрезом. Получены аналитические выражения для расчета модуля Юнга материала и для определения удельной энергии разрушения.

Расчетные значения модуля Юнга E и коэффициента интенсивности напряжения K_{Ic} согласуются с известными данными испытаний стандартных образцов из технического титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Barker L.M.* Theory for determining K_{Ic} from small, non-LEFM specimens, supported by experiments on aluminum // *Int. J. of Fracture*. – 1979. – Vol. 16. – No. 6. – P. 515-536.
2. *Wang C.T., Pillar R.M.* Short-rod elastic-plastic fracture toughness test using miniature specimens // *J. Mater. Sci.* – 1989. – No. 24. – P. 2391-2400.
3. *Grant T.J., Weber L., Mortensen A.* Plasticity in Chevron-notch fracture toughness testing. – 2000. – No. 67. – P. 263-276.
4. *Дроздовский Б.А., Полищук Т.В., Волков В.П.* Шевронный надрез как средство уменьшения толщины образца при определении величины K_{Ic} // *Заводская лаборатория*. – 1987. – № 6. – С. 74-76.
5. *Рахимкулов Р.Р.* Сопоставление значений величины вязкости разрушения K_{Ic} , полученной на образцах с шевронной прорезкой и по стандартной методике для стали СтЗсп // *Нефтегазовое дело*. – 2010. – Т. 2. – С. 1-10. http://www.ogbus.ru/authors/Rakhimkulov/Rakhimkulov_1.pdf
6. *Броек Д.* Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980.
7. *Салищев Г.А., Галеев Р.М., Мальшиева С.П.* и др. Изменение модуля упругости при отжиге субмикрорекристаллического титана // *ФММ*. – 1998. – Т. 85. – No 3. – С. 178-181.
8. *Бетехтин В.И., Колобов О.Р., Нарыкова М.В.* и др. Механические свойства, плотность и дефектная структура субмикрорекристаллического титана ВТ1-0, полученного после интенсивной пластической деформации при винтовой и продольной прокатках // *ЖТФ*. – 2011. – Т. 81. – Вып. 11. – С. 58-63.
9. *Подскребко М.Д.* Сопротивление материалов. – Минск: Высшая школа, 2007. – 775 с.
10. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
11. ГОСТ 16483.9-73. Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе.
12. *Физические величины: Справочник* // А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Б.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
13. *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник* / Ильин А.А., Колачёв Б.А., Полькин И.С. – М.: ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.
14. *Hernzberg R.W.* Deformation and Fracture Mechanics of Engineering materials. – 1983. – Toronto, NY: John Wiley and Sons.

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2012 г.

DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS OF SMALL-SIZE CHEVRON-NOTCHED SPECIMENS WITH ULTRA-FINE GRAIN STRUCTURE

Ye.Ye. Deryugin, B.I. Suvorov

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk
2/4, Academicheskyy prospect, Tomsk, 634021

A new method for determining crack toughness of materials is described based on test data of small-size chevron-notched specimens in terms of commercial titanium BT1-0 and titanium alloy BT6 with ultra-fine grain (UFG) structure, obtained by methods of severe plastic deformation (SPD). A problem of separating a part, connected with variations in specimen ductility under crack propagation, of the total displacement of load application point, is solved. Equations to calculate specific fracture energy are obtained. The calculated values of stress intensity factor K_{Ic} are in good agreement with known test data of standard specimens.

Keywords: *ultra-fine grains (UFG) structure, strain localization, fracture, stress intensity factor.*

*Yevgeny Ye. Deryugin (Dr. Sci. (Phys. & Math.)), Professor, Leading Research Scientist.
Boris I. Suvorov (Ph.D. (Techn.)), Research Assistant.*