

Трещиностойкость материалов с ультрамелкозернистой структурой

Дерюгин Е.Е.[†], Суворов Б.И., Деревягина Л.С.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

[†]dee@ispms.tsc.ru

Fracture toughness of materials with ultrafine grained structure

E.E. Derugin, B.I. Suvorov, L.S. Derevyagina

Institute of Strength Physics and Materials Science, Tomsk

По данным испытаний малоразмерных образцов с шевронным надрезом определены характеристики трещиностойкости технического титана ВТ1-0, титанового сплава ВТ6 и трубной стали 12ГБА с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной методами интенсивной пластической деформации (ИПД). В качестве основной характеристики трещиностойкости определена удельная энергия разрушения (УЭР). Исследовано изменение УЭР в процессе нагружения образцов с шевронным надрезом.

Ключевые слова: ультрамелкозернистая структура, разрушение, удельная энергия разрушения, коэффициент интенсивности напряжений

From the test data obtained on small samples with a chevron notch the characteristics of fracture toughness of commercial VT1-0 titanium, VT6 titanium alloy and 12GBA tube steel having an ultrafine grained structure processed by the methods of severe plastic deformation (SPD) are determined. As the basic parameter of fracture toughness the specific fracture energy (SFE) is determined. The change of SFE during the process of loading of samples with chevron notch is studied.

Key words: ultrafine grained structure, fracture, specific fracture energy, stress intensity coefficient

1. Введение

Оценка сопротивления конструкционного материала зарождению и распространению трещин является одной из наиболее важных задач механики деформируемого твёрдого тела. В линейной механике разрушения (ЛМР) разработаны определённые критерии трещиностойкости для хрупких и малопластичных материалов. Однако в металлах и сплавах, как правило, потери энергии на пластическую деформацию в вершине трещины на порядки превышают поверхностную энергию. Поэтому прогнозирование разрушения по Гриффитсу является ошибочным. Стандартные испытания материалов на трещиностойкость проводятся при жёстких ограничениях на размеры образцов. Толщина даже малопластичных образцов должна быть не менее 10 мм, чтобы соблюдалось условие плоско-деформированного состояния, ограничивающее развитие зоны пластической деформации у вершины трещины.

В данной работе на примере технического титана ВТ1-0, титанового сплава ВТ6 и трубной стали 12ГБА приводятся результаты оценки трещиностойкости (вязкости разрушения) материалов с УМЗ структурой, полученной методами интенсивной пластической деформации. Применена новая методика определения характеристик трещиностойкости для малоразмерных

образцов с шевронным надрезом [1, 2]. В отличие от подходов ЛМР, данная методика не накладывает жёстких ограничений на размеры пластической зоны у вершины трещины.

2. Материалы и методика исследования

При испытании на вязкость разрушения (трещиностойкость) малоразмерных образцов, как правило, используют образцы с шевронным надрезом [3-6]. В образцах с такой конфигурацией не требуется предварительно выращивать усталостную трещину.

Материалами для экспериментального исследования были выбраны технический титан ВТ1-0, титановый сплав ВТ6 и трубная сталь 12ГБА с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной методами интенсивной пластической деформации (ИПД).

УМЗ структуру в техническом титане ВТ1-0 получали, используя режим всестороннейковки (накопленная деформация 50% при 400°C) + отпуск при 300°C, 1 ч. Трубную сталь 12 ГБА, кроме того, дополнительно прокатывали на 40%.

Были испытаны также образцы из технического титана ВТ1-0 и сплава ВТ6 в исходном крупнокристаллическом (КК) состоянии со средним размером зерна 8÷10 мкм.

Испытание проводили растяжением образцов с шевронным надрезом со скоростью движения захватов испытательной машины $v = 2$ мкм/с при комнатной температуре. Образцы длиной 18 мм вырезали из прутков сечением 6×6 мм². Шевронный надрез наносили электроэрозионным способом в виде узкой щели шириной 0.25 мм, разделяющей толщину образца на две равные части. Границу надреза задавали в виде V-образной линии с углом $\alpha = \pi/3$ (рис. 1). В процессе нагружения через каждые 2 секунды с помощью зеркальной фотокамеры PENTAX K-5 фиксировали изображение боковой поверхности нагружаемого образца. С помощью сканирующей электронной микроскопии (Philips SEM 515) исследовали особенности рельефа поверхности разрушения исследуемых материалов.

В качестве основной характеристики трещиностойкости материала использовали удельную энергию разрушения G , которую рассчитывали согласно новой методике, разработанной для малоразмерных образцов с шевронным надрезом [1,2].

Расчёты показали, что

$$G = \frac{12P^2 l^2 T^2}{Ea^2 b^3}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга.

$$T = \left[\frac{2\Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \left(1 - \frac{2\Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{l}{l_0} \right) \right] \left(4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2\Delta l}{l_0} \right) / \left[2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2 \quad (2)$$

3. Результаты

На рис. 2 приведены типичные диаграммы нагружения для титанового сплава ВТ6 (а) и технического титана ВТ1-0 (б) с УМЗ структурой. Общим для данных материалов является наличие пика нагрузки. Наблюдения показали, что резкое падение нагрузки связано с появлением и спонтанным распространением трещины. «Площадка» на кривой « $P - \lambda$ » соответствует стабильному распространению трещины.

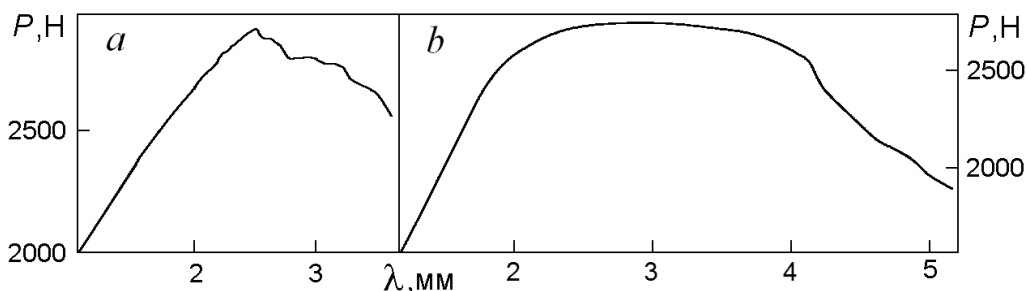


Рис. 3. Диаграммы нагружения сплава ВТ6 в КК состоянии (а) и трубной стали 12ГБА с УМЗ структурой (б).

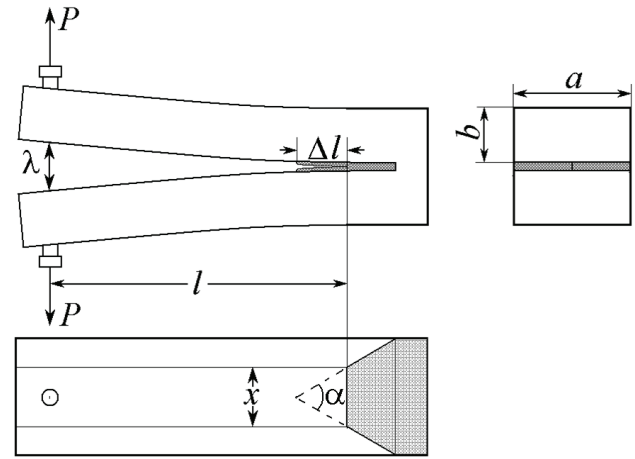


Рис. 1. Схема образца с шевронным надрезом.

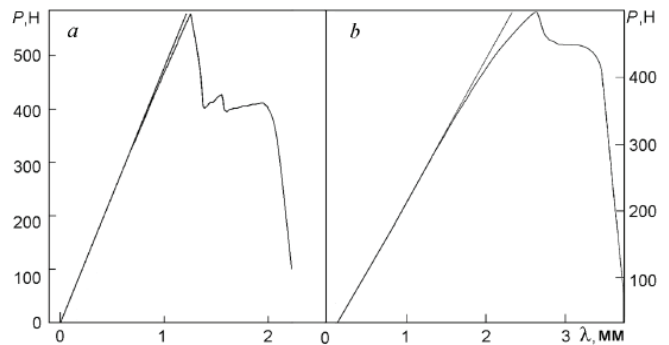


Рис. 2. Диаграммы нагружения сплава ВТ6 (а) и технического титана ВТ1-0 (б) с УМЗ структурой.

На рис. 3 приведены типичные диаграммы нагружения для титанового сплава ВТ6 в КК состоянии и сплава 12 ГБА с УМЗ структурой.

Прерывистый характер диаграммы нагружения сплава ВТ6 свидетельствует о том, что начало зарождения и распространения трещины происходит задолго до того, как внешняя нагрузка достигнет максимума. При этом на всех этапах нагружения трещина распространяется скачкообразно.

В образцах из трубной стали зарождению трещины на конце шевронного надреза предшествует значительная пластическая деформация. Трещина на конце шевронного надреза зарождается в момент, когда нагрузка практически достигает максимума. Происходит сначала медленное подрастание трещины, затем скорость её распространения резко увеличивается. В момент перехода к стадии спонтанного распространения трещины на диаграмме нагружения наблюдается перелом (рис. 3 б).

Известно, что распространение трещины сопровождается увеличением податливости образца $\eta = \lambda_c/P$ [7],

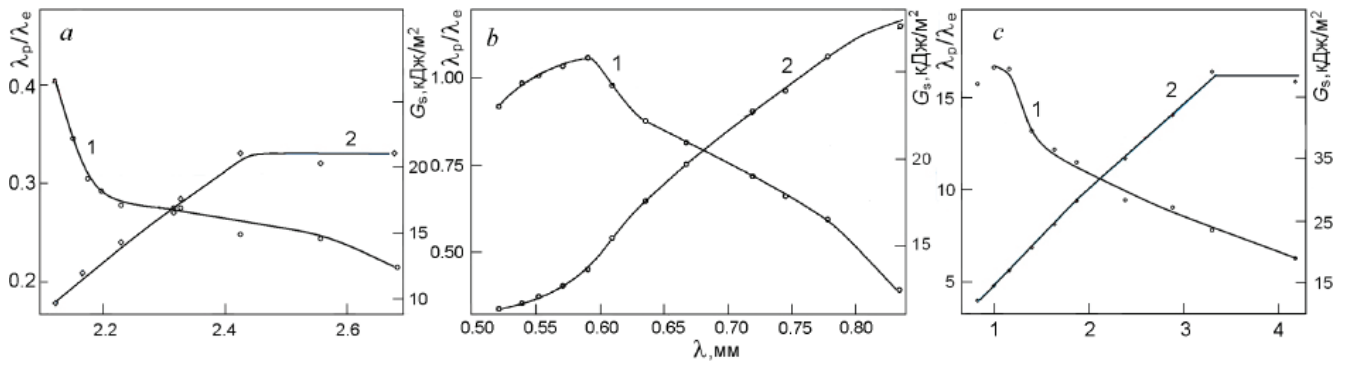


Рис. 4. Зависимость механических характеристик УМЗ технического титана ВТ1-0 (а), сплава ВТ6 в КК состоянии (b), УМЗ трубной стали 12ГБА (с) от смещений точек приложения нагрузки: 1 – удельная энергия разрушения, 2 – отношение λ_p/λ_e .

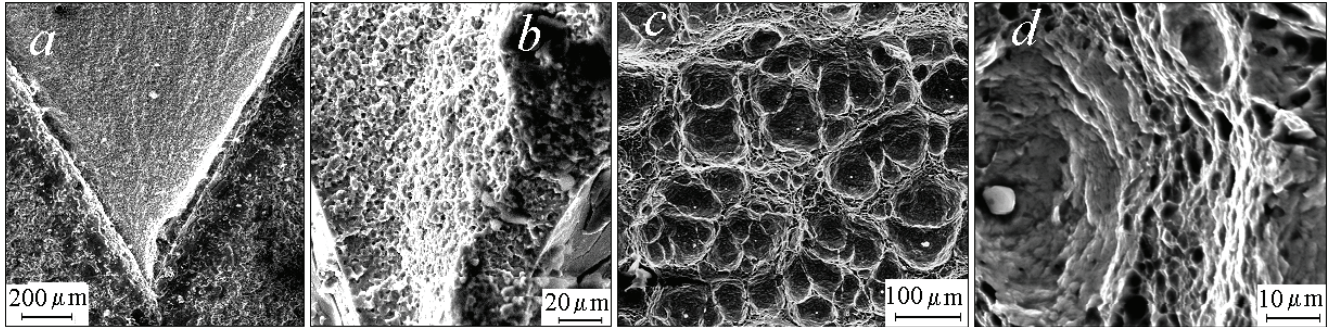


Рис. 5. Поверхности разрушения УМЗ сплавов ВТ6 (а, b) и 12ГБА (с, d).

где λ_e – упругое смещение точек приложения нагрузки P . Теоретические расчёты показали [1], что величина λ_e всегда меньше экспериментально измеренного значения λ . Это объясняется тем, что пластическая деформация вносит в смещения дополнительный вклад λ_p , не связанный с изменением податливости образца, т.е. в моменты, когда не наблюдается увеличения длины трещины. В общем случае λ можно представить в виде суммы $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$. Очевидно, что величина λ_p будет тем больше, чем более вязко будет разрушаться материал. Поэтому отношение λ_p/λ_e является важной характеристикой вязкости разрушения.

Характеристики трещиностойкости ВТ1-0, ВТ6 и 12ГБА сведены в табл. 1, где приведённые данные соответствуют максимальной величине внешней нагрузки.

На рис. 4 приведены зависимости удельной энергии разрушения (кривая 1) и отношения λ_p/λ_e (кривая 2) от величины смещений точек приложения нагрузки λ для

материалов с малым отношением λ_p/λ_e (УМЗ ВТ1-0), повышенным отношением λ_p/λ_e (КК ВТ6) и большим значением отношения λ_p/λ_e (УМЗ 12ГБА). Несмотря на разный качественный характер диаграмм нагружения и большое отличие отношения λ_p/λ_e , обнаруживаются общие закономерности при распространении трещины: во всех случаях с момента достижения максимальной нагрузки происходит двухстадийное уменьшение удельной энергии разрушения. Резкое уменьшение довольно быстро замедляется и далее происходит монотонное уменьшение величины G (кривые 1). Вклад пластической деформации λ_p в общее смещение точек приложения нагрузки λ непрерывно возрастает и выходит на насыщение (кривые 2).

Дополнительную информацию дают картины поверхностей разрушения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. На рис. 5 представлены поверхности разрушения УМЗ сплавов ВТ6 и 12ГБА. При большом увеличении видно, что поверхность разрушения УМЗ сплава ВТ6 представляет собой пластически деформированный материал со сложной пористой структурой (рис. 5 b).

В сплаве 12ГПА вязкий характер разрушения выражен особенно сильно (рис. 5 c, d). Наряду с порами размером порядка 50 мкм и более, источником зарождения которых являются микровыделения, изначально присутствующие в объёме материала, остальной материал содержит высокую концентрацию пор размерами не более 5 мкм.

4. Обсуждение и заключение

Проведённые исследования показали, что при нагружении образцов с шевронным надрезом пластическая деформация может в случае пластичных материалов

Таблица 1.

Механические характеристики сплавов ВТ1-0, ВТ6 и 12ГБА.

Материал	λ_p/λ_e	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
12ГБА УМЗ	5.60	50.9	105.6	219

намного превысит величину смещений, обусловленных увеличением податливости образца. Подобное наблюдается в трубной стали 12ГБА в УМЗ состоянии (см. таблицу 1).

Распространение трещины контролируется двумя конкурирующими процессами. С одной стороны, пластическая деформация существенно уменьшает концентрацию напряжений в окрестности устья трещины [8] и тем самым тормозит развитие трещины. С другой стороны, с увеличением длины трещины концентрация напряжений на её конце увеличивается. По мере нагружения увеличивается также и скорость распространения трещины. С увеличением скорости распространения трещины уменьшается расход энергии на пластическую деформацию. По этой причине удельная энергия разрушения материала в процессе нагружения тоже уменьшается (рис. 4).

С позиции представлений физической мезомеханики возникновение трещины трактуется как результат двухфазного распада сильнонеравновесного материала, одна из фаз которого представляет собой поры и несплошности [9]. Подобные эффекты могут возникать в локальных зонах гидростатического растяжения, которые характеризуются увеличенным молярным объёмом. Материал с УМЗ структурой уже находится в сильно неравновесном состоянии с увеличенным в среднем молярным объёмом. С другой стороны, граничные условия нагружения обеспечивают на конце шевронного надреза напряжённое состояние с высоким уровнем нормальных растягивающих напряжений, способствуя дальнейшему увеличению молярного объёма исследуемых материалов.

Наблюдения показывают, что структура поверхностей разрушения ВТ1-0 и ВТ6 с УМЗ структурой действительно представляет собой локальные зоны сильно деформированного материала с высокой концентрацией пор. Подобная структура не может быть организована с помощью лишь кристаллографических сдвигов по плоскостям плотной упаковки решётки. Это свидетельствует о существенной роли поворотных мод деформации при зарождении и формировании трещины.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 10-08-01182-а и № 13-08 01404-а).

Литература

1. Deryugin E.E., Suvorov B.I. Defining the Fracture Toughness for small-sized Samples of Materials with Submicrostructure [Электронный ресурс]. Proc. Eur. Conf. Fracture 19, Kazan, Russia, 2012. Kazan: Kazan Sci. Center RAS, 2012. CD ROM, P. 1-4.
2. Дерюгин Е.Е., Панин В.Е., Суворов Б.И., Деревягина Л.С., Третьяков Н.В. Характеристики трещиностойкости малоразмерных образцов с ультрамелкозернистой структурой. Тез. ЛII Межд. конференция «Актуальные проблемы прочности»: Уфа, 4-8 июня 2012, С. 214.
3. 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.
4. 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.
5. Grant T.J., Weber L., Mortensen A. Plasticity in Chevron-notch fracture toughness testing. Engineering Fracture Mechanics, 2000, No. 67, P. 263-276.
6. 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.
7. Броек Д. Основы механики разрушения. М: Высшая школа, 1980.
8. Дерюгин Е.Е., Ласко Г.В. Модифицированная модель трещины Гриффитса. ПМТФ, 1998, № 6, С. 132-141.
9. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Роль локальных наноструктурных состояний в пластической деформации и разрушении твёрдых тел. Физ. мезомех., 2012, Т.15, № 5, С. 5-18.