

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT1-0

Г.В. Проскурников¹, Е.Е. Дерюгин²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: galen.marek.00@mail.ru

DETERMINATION OF FRACTURE TAUGHTNES TITANIUM ALLOY VT1-0

G.V. Proskurnikov¹, Ye.Ye. Deryugin²

¹National Research Tomsk Polytechnic University

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

E-mail: galen.marek.00@mail.ru

The problem of the experimental determination of fracture toughness of titanium alloy VT1-0. Spend specific fracture energy calculation according to the method developed by ISPM SB RAS. The characteristics of fracture toughness of titanium alloy VT1-0.

В данной работе приводятся результаты оценки трещиностойкости титанового сплава VT1-0. В качестве основной характеристики трещиностойкости материала использовали удельную энергию разрушения G_{cr} (критическую скорость высвобождения упругой энергии при распространении трещины), которую рассчитывали согласно новой методике, разработанной для малоразмерных образцов с шевронным надрезом [1]. В отличие от подходов линейной механики разрушения, данная методика не накладывает жестких ограничений на размеры пластической зоны у вершины трещины.

Известно, что при нестабильном распространении трещины длиной l на элементарное расстояние dl в образце шириной a энергия разрушения определяется уравнением [2, 3]:

$$G_{cr} = \frac{P_{max}^2 d\eta}{2dl \cdot a}, \quad (1)$$

где η – податливость образца (величина, обратная жесткости образца $M = P/\lambda$); λ – упругое смещение под действием внешней нагрузки P ; P_{max} – максимальная внешняя нагрузка, при которой возникает спонтанное распространение трещины.

Образец с шевронным надрезом можно рассматривать как двухконсольную конструкцию. Узкий надрез в образце можно представить, как трещину длиной l_0 (рис. 1).

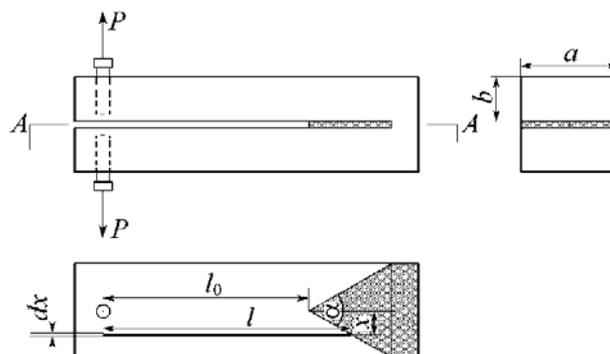


Рис. 1. Схема образца с шевронным надрезом

Будем считать, что фронт трещины представляет собой прямую линию длиной x , ориентированную перпендикулярно к оси образца.

Выделим среднюю часть образца шириной x . Согласно [4], упругий прогиб балки шириной x и длиной l на величину $\lambda/2$ обеспечивает нагрузка

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

Ширина балки, согласно геометрическим построениям, равна $x = 2\Delta l \cdot \text{tg}(\alpha/2)$, где α – угол шевронного надреза. Податливость выделенной части образца определяется выражением

$$\eta = \frac{\lambda}{P} = \frac{8}{E\alpha} \left(\frac{l}{b}\right)^3 = \frac{4}{E\Delta l \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2)} \left(\frac{l}{b}\right)^3.$$

Изменение податливости при увеличении длины трещины на величину dl равно

$$\frac{\partial \eta}{\partial l} = \frac{12l^2}{E\Delta l b^3 \operatorname{tg} \alpha / 2}.$$

Подставляя это значение и выражение (2) в уравнение (1), получим

$$G_{\text{cr}} = \frac{3E\lambda_e^2 b^3}{16l^4}. \quad (3)$$

В [5] показано, что λ_e равно

$$\lambda_e = \frac{8P_{\text{max}}}{Ea} \left(\frac{l}{b}\right)^3 \left[\frac{2\Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \left(1 - \frac{2\Delta l}{a} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}\right) \left(\frac{l}{l_0}\right)^4 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + \frac{2\Delta l}{l_0} \right]^{-1} \left[2 + \frac{a}{l_0} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right]^2$$

где $l = l_0 + \Delta l$, Δl – смещение клина.

Испытание проводили растяжением образцов с шевронным надрезом со скоростью движения захватов испытательной машины $v = 5$ мкм/с при комнатной температуре. Образцы длиной 20 мм вырезали из прутка квадратной формы 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 с помощью зеркальной камеры PENTAX K-5 с интервалом 4с фиксировали изображения нагружаемого образца. По изображениям измеряли изменение ширины щели в точках приложения нагрузки и у конца шевронного надреза, а также раскрытие и длину трещины, в процессе нагружения. Полученные данные использовали для расчета критериев трещиностойкости.

В таблице 1 приведены результаты эксперимента.

Таблица 1 – Результаты полученные в ходе работы

| № кадра | t, c | P_1, H | $\Delta l, \text{мм}$ | $K_{Ic}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ | $G, \text{кДж/м}^2$ |
|---------|--------|----------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------|
| 6875 | 535 | 879,76 | 2,59 | 69,40 | 43,78 |
| 6878 | 545 | 821,41 | 2,70 | 57,75 | 30,32 |
| 6881 | 557 | 801,22 | 2,87 | 56,42 | 28,94 |
| 6887 | 582 | 816,21 | 3,54 | 58,50 | 31,12 |
| 6896 | 617 | 829,66 | 3,80 | 60,13 | 32,87 |
| 6909 | 670 | 830,46 | 4,63 | 57,77 | 30,34 |

Испытания малоразмерных образцов сплава ВТ1-0 показали, что для этого материала на диаграмме «нагрузка P – смещение клина Δl » четко фиксируется момент спонтанного распространения трещины (рис. 2), т.е. хорошо определяется значения критической нагрузки P_{max} , и критическое значение берегов надреза λ_e . Расчеты G_{cr} на стадии стабильного распространения получили усредненным значение $G_{\text{cr}} = 30,7 \pm 2,2$ кДж/м² и $K_{Ic} = 58,1 \pm 2,0$. Полученное значение K_{Ic} практически соответствует значениям для технического титана, приведенным в монографии [6].

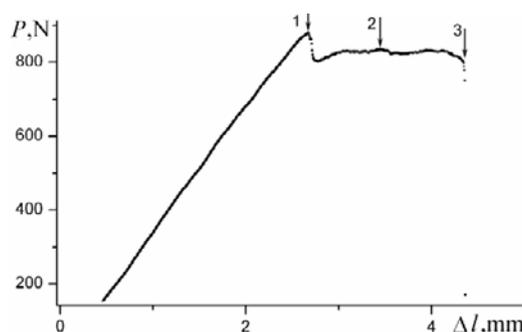


Рис.2. Диаграмма нагружения «Нагрузка-смещение»: 1 – стадия зарождения трещины; 2 – стадия стабильного распространения трещины на участке 1-3; 3 – стадия спонтанного распространения трещины

Известно, что распространение трещины сопровождается увеличением податливости образца $\eta = \lambda_e/P$ [2], где λ_e – смещение точек приложения нагрузки P , связанное с увеличением длины трещины. Расчеты по уравнению (3) показывают, 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. В процессе нагружения наблюдаются моменты, когда не происходит увеличения длины трещины. Увеличение смещения точек приложения нагрузки происходит за счет пластической деформации впереди 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. На стадии зарождения трещины данное отношение равно 0,03 для ВТ1-0.

Список литературы

1. Дерюгин Е.Е., Панин В.Е., Суворов Б.И. и др. Характеристики трещиностойкости малоразмерных образцов с ультрамелкозернистой структурой // Международная конференция «Актуальные проблемы прочности». – Уфа, 2012. – 214 с.
2. Брок Д. Основы механики разрушения. – М. : Высшая школа, 1980. – 368 с.
3. Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. – М. : Металлургия, 1989. – 575 с.
4. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М. : Наука, 1975. – 576 с.
5. Дерюгин Е.Е., Суворов Б.И. Определение вязкости разрушения малоразмерных образцов с ультрамелкозернистой структурой // Вестник Сам-ГТУ. Серия «Технические науки». – Самара, 2012. – 129 с.
6. Ильин А.А., Колачев Б.А. и др. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. – М. : ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.