

15.2

## Определение трещиностойкости образцов с шевронным надрезом с использованием трехточечного изгиба

© Е.Е. Дерюгин<sup>1</sup>, А.А. Богданов<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия<sup>2</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: dee@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 26 июня 2021 г.

В окончательной редакции 9 июля 2021 г.

Принято к публикации 9 июля 2021 г.

Предложен метод экспериментального определения удельной энергии разрушения материала при нагружении трехточечным изгибом образца прямоугольного сечения с шевронным надрезом. Показано, что на начальных этапах распространения трещины в зоне шевронного надреза наблюдается линейная зависимость податливости образца от длины трещины. Это позволяет вычислить удельную энергию разрушения материала без использования феноменологических уравнений, применяемых в стандартных условиях испытаний. Расчеты проведены для технического титана ВТ1-0.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, трехточечный изгиб, шевронный надрез, удельная энергия разрушения, технический титан ВТ1-0.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.20.51612.18936

Важнейшей инженерной характеристикой материала является трещиностойкость. Известны и широко применяются различные способы определения трещиностойкости (вязкости разрушения) материалов: при испытании стандартных образцов с наведенной усталостной трещиной [1], при испытаниях на ударную вязкость образцов с надрезом Шарпи [2], методом микроиндентирования [3], при нагружении изгибом [4] и др. Наиболее простым и доступным методом нагружения малоразмерных образцов является трехточечный изгиб балки прямоугольного сечения с надрезом. Стандартные условия испытаний требуют наличия в вершине надреза усталостной трещины. Нанесение трещины в образце с надрезом является достаточно трудоемкой операцией.

В настоящей работе предложен метод экспериментального определения удельной энергии разрушения при нагружении трехточечным изгибом образца прямоугольного сечения с шевронным надрезом. Для образцов такой конфигурации не требуется операции наведения на конец надреза усталостной трещины. С момента нагружения на конце шевронного надреза возникает большая концентрация напряжения, достаточная для зарождения трещины. При этом трещина сохраняет направление распространения. Геометрия шевронного надреза позволяет фиксировать и продлевать стадию стабильного распространения трещины в малоразмерных и достаточно пластичных материалах. На рис. 1, *a* приведена схема испытаний образца с шевронным надрезом на трехточечный изгиб. На рис. 1, *b* представлено сечение балки в зоне шевронного надреза.

В основе метода лежит определение критического значения скорости высвобождения упругой энергии при распространении трещины  $G$  (удельной энергии разру-

шения). Необходимое условие для начала распространения подчиняется уравнению [5]:

$$G = \frac{P^2}{2a} \frac{d\eta}{dl}, \quad (1)$$

где  $P$  — сила давления на образец (рис. 1, *a*),  $d\eta/dl$  — изменение податливости образца в процессе распространения трещины,  $dl$  — малое расстояние, на которое продвигается прямолинейный фронт трещины. В двумерном варианте эта характеристика эквивалентна величине  $J$ -интеграла [6,7].

Максимальное значение удельной энергии разрушения  $G_c$  является основной характеристикой трещиностойкости материала.

При экспериментальной оценке податливости образца использовался метод периодического изменения внешней нагрузки [8]. На рис. 2, *a* приведена диаграмма периодического нагружения сила  $P$ –прогиб  $\lambda$  технического титана ВТ1-0, полученная на электромеханической машине INSTRON 1518 US (кривая 1). На трехточечный изгиб испытан образец в виде стержня прямоугольного сечения  $a \times b = 4.23 \times 5.02$  mm. Расстояние между опорами равно  $l = 60$  mm. Угол в вершине шевронного надреза  $\alpha = 60^\circ$ . На каждом цикле определялась податливость образца по наклону прямой упругой разгрузки:  $\eta = \lambda/P$ . В процессе нагружения велась непрерывная фотосъемка зоны шевронного надреза камерой PENTAX K-5. По фотоизображениям была измерена длина трещины (рис. 2, *b*).

Из диаграммы периодического нагружения технического титана ВТ1-0 (кривая 1 на рис. 2, *a*) видно, что в процессе нагружения происходит заметное изменение наклона прямой упругой разгрузки, что свидетельствует

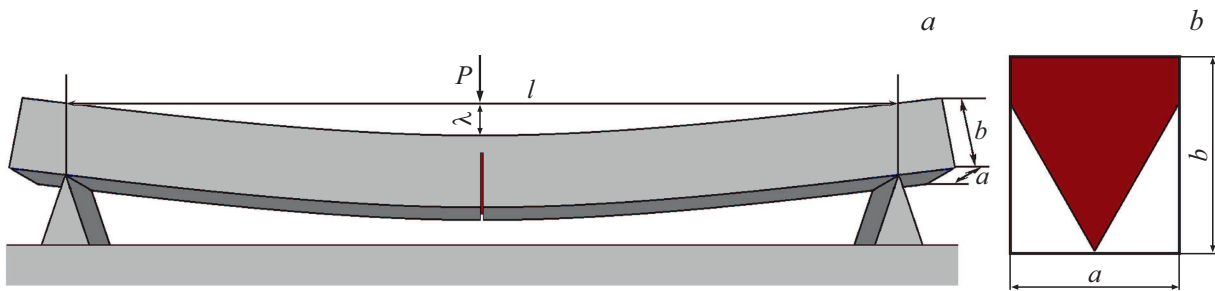


Рис. 1. Схема испытаний образца на трехточечный изгиб (а) и сечение образца в зоне шевронного надреза (b).

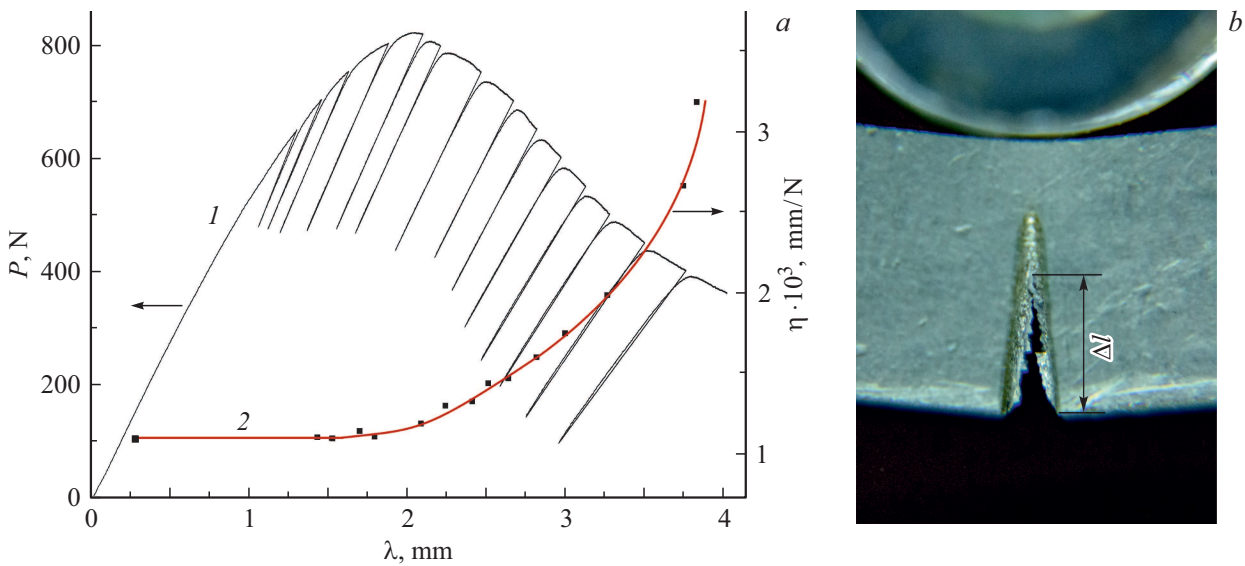


Рис. 2. а — диаграмма нагружения технического титана ВТ1-0 (1) и зависимость податливости образца от величины прогиба (2). б — фотоизображение трещины в зоне шевронного надреза.

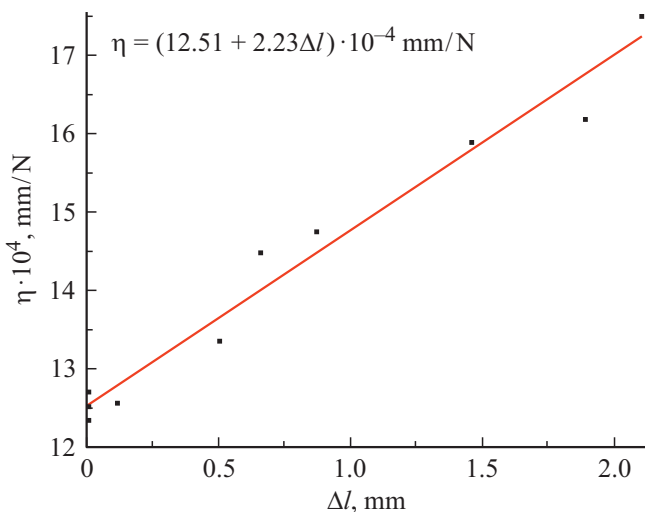


Рис. 3. Зависимость податливости образца от длины трещины.

об увеличении податливости образца и связано с распространением трещины в зоне шевронного надреза. Кри-

вая 2 на рис. 2, а представляет зависимость податливости образца от величины прогиба. На начальной стадии, как и следовало ожидать, податливость образца не изменяется, оставаясь на уровне  $\eta = 1.25 \cdot 10^{-3} \text{ mm/N}$ . С момента достижения максимальной нагрузки податливость начинает плавно увеличиваться с ускорением.

Податливость образца на начальной стадии распространения трещины изменяется практически по линейному закону (рис. 3). Согласно линейной зависимости, производная податливости по длине трещины равна  $d\eta/dl = 2.23 \cdot 10^{-4} \text{ N}^{-1}$ . Подставляя это значение в уравнение (1) при  $P = P_{\text{max}} = 903 \text{ N}$ , получим критическую величину удельной энергии разрушения  $G_c = 21.49 \text{ kJ/m}^2$ . Переход от удельной энергии разрушения к коэффициенту интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  осуществляется согласно известному соотношению

$$K_{Ic} = [G_c E / (1 - \nu^2)]^{1/2},$$

где  $E$  — модуль Юнга,  $\nu$  — коэффициент Пуассона. Принимая для ВТ1-0  $E = 112 \text{ GPa}$  и  $\nu = 0.3$  [9], получим критическое значение коэффициента интенсивности напряжений для технического титана

$K_{Ic} = 51.43 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Полученный результат близок к справочному значению трещиностойкости технического титана ВТ1-0 [10].

Проведенные исследования показали, что предложенный метод представляет собой экспресс-метод для определения трещиностойкости малоразмерных и достаточно пластичных образцов. Материал может быть довольно пластичным, но не настолько, чтобы появление трещины было исключено. Это вытекает из принципа действия предлагаемой методики.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН (проект FWRW-2021).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness  $K_{Ic}$  of metallic materials*. ASTM Designation E 399-09 (West Conshohocken, PA, USA, 2009).
- [2] B.N. Leis, J. Pipeline Eng., **12**, 183 (2013).
- [3] А.П. Крень, В.А. Рудницкий, Завод. лаб. Диагностика материалов, **74** (12), 16 (2008).
- [4] H.H.N. Chen, R.K.L. Su, S.L. Fok, H.G. Zhang, Eng. Fract. Mech., **186**, 143 (2017).  
DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.09.030
- [5] R.W. Hertzberg, *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*, 3rd ed. (Wiley, N.Y., 1989).
- [6] L.G. Malitoa, J.V. Sov, B. Gludovatz, R.O.Ritchie, L.A. Pruitt, J. Mech. Phys. Solids, **122**, 435 (2019).  
DOI: 10.1016/j.jmps.2018.09.022
- [7] W. Brocks, *Plasticity and Fracture*. Solid Mechanics and its Applications book Ser. (Springer, Cham, 2018), vol. 244.  
DOI: 10.1007/978-3-319-62752-6
- [8] T. Bolinder, *Numerical simulation of ductile crack growth in residual stress field*. SSM-Rapport 2014-28 (SSM, 2014).  
[www.stralsakerhetsmyndigheten.se](http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se)
- [9] *Физические и механические свойства титана. Справочник* [Электронный ресурс].  
URL: <https://www.mazprom.ru/spravochnik/>
- [10] А.Г. Илларионов, А.А. Попов. *Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов* (Изд-во Урал. ун-та, Екатеринбург, 2014). [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/28698/1/978-5-7996-1096-8\\_2014.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/28698/1/978-5-7996-1096-8_2014.pdf)