

УДК 539.421

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБОПРОВОДОВ

М. Мериэм-Бенциане, Х. Залу

Университет им. Хассибы Бен Буали, Члеф, Алжир  
E-mails: mbmadid2001@yahoo.fr, zahloulh@yahoo.fr

Приведены результаты экспериментального исследования распространения трещины по третьей моде в стали марки E26-2. Для образцов, имеющих различные толщину и ширину, получены зависимости величины продвижения трещины от приложенной силы. С использованием энергетического подхода определены предельное значение коэффициента интенсивности напряжений и работа, необходимая для продвижения трещины. Показано, что эти величины зависят от толщины и геометрии образца.

**Ключевые слова:** трубопровод, третья мода, разрыв, коэффициент интенсивности напряжений, работа, трещина.

**Введение.** Методы механики разрушения предназначены для исследования разрушения материалов по трем основным модам: первой, второй и третьей [1, 2]. В настоящее время эти методы применяются при изучении разрушения однородных изотропных материалов [1, 3]. Интенсивно развиваются экспериментальные и теоретические методы исследования разрушения материалов по первой и второй модам, но при этом отсутствуют стандартные методы изучения разрушения материалов по третьей моде. В случае разрушения по этой моде краевые условия существенно сложнее, чем в случае разрушения по первой, второй и смешанной (первой и второй) модам [2–6]. Исследование разрушения по третьей моде необходимо для проведения полной классификации форм разрушения материалов.

В последнее время большое внимание уделяется изучению разрушения по третьей моде трубопроводов, предназначенных для транспортировки углеводородов. Транспортировка по трубопроводам сырой нефти и эмульсий на большие расстояния является наиболее экономичным способом их доставки. Поскольку образование трещин в трубопроводах, усталостные явления и коррозия трубопроводов могут приводить к утечке жидкости и даже возникновению пожаров, необходимо провести более полное изучение этих процессов [7, 8]. Многие трубопроводы расположены вблизи магистралей или под ними, вблизи мостов, железных дорог, на территории городов, поэтому создание методов контроля, обеспечивающих целостность трубопроводов, является чрезвычайно важной задачей [9].

В последнее время металлические трубопроводы используются во многих инженерных сооружениях. Несмотря на постоянное совершенствование технологии изготовления трубопроводов, при их эксплуатации часто происходят несчастные случаи [10], что обусловлено наличием дефектов в изделии (трещин), дефектов сварных швов (рис. 1), формой

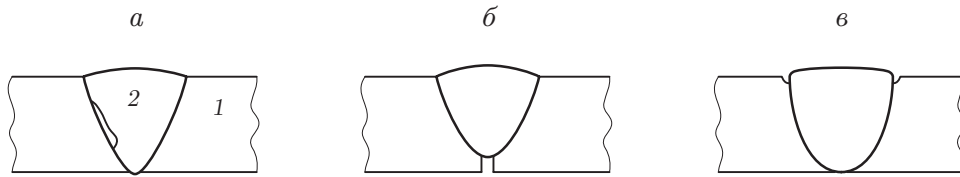


Рис. 1. Типы сварных швов [9]:

*a* — непровар, *б* — неполное проплавление, *в* — подрез металла; 1 — образец, 2 — сварной шов

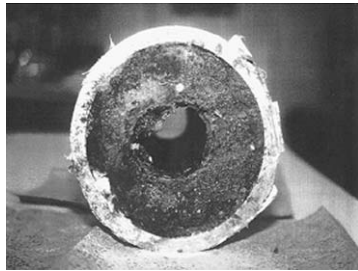


Рис. 2

Рис. 2. Отложения на стенках трубопровода [13]

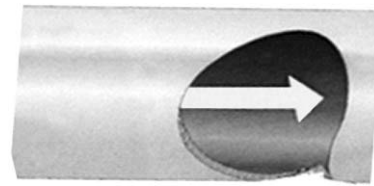


Рис. 3

Рис. 3. Воздействие потока на трубопровод

трубопроводов, использованием их в сложных метеорологических условиях и образованием отложений [9–12]. Кроме того, нагрев стенок трубопровода является причиной возникновения на них кристаллических образований, состоящих из жидкой и твердой фаз (рис. 2) [13]. Появление дефекта возможно также вследствие воздействия потока на трубопровод, расположенный на опорах (рис. 3).

В данной работе экспериментально исследуется продвижение трещины в зависимости от приложенной силы в трубопроводах различной толщины и определяются величина прогиба трубопровода между опорами, работа, затрачиваемая на продвижение трещины, и критический коэффициент интенсивности напряжений (ККИН). Эти величины позволяют оценить усталость материала, которая является важным показателем работы трубопровода. Изучаемые в настоящей работе трубопроводы используются в Алжире для транспортировки углеводородов.

**1. Механика разрушения.** В механике разрушения целостность конструкции определяется процессом развития трещины, изначально имеющейся в материале. Прежде всего необходимо сформулировать критерий разрушения материала с трещиной в результате приложения нагрузки. Этот критерий определяется на основе анализа напряжений и деформаций в вершине трещины [13–15].

В [16, 17] приведены результаты экспериментальных исследований разрушения по третьей моде тонких листов среднепрочных сталей.

**2. Методика эксперимента.** Ниже исследуется распространение трещины в трубопроводе (рис. 4), обусловленное наличием дефектов.

Появление трещин, соответствующих антиплоскому сдвигу, зависит также от положения опор трубопровода. Распространение таких трещин соответствует разрушению по третьей моде (рис. 5).

Геометрия исследуемых образцов показана на рис. 6. Испытывались образцы толщиной  $h = 0,5; 1,2$  мм и шириной  $2B = 40, 50, 80, 100$  мм. Образцы были изготовлены

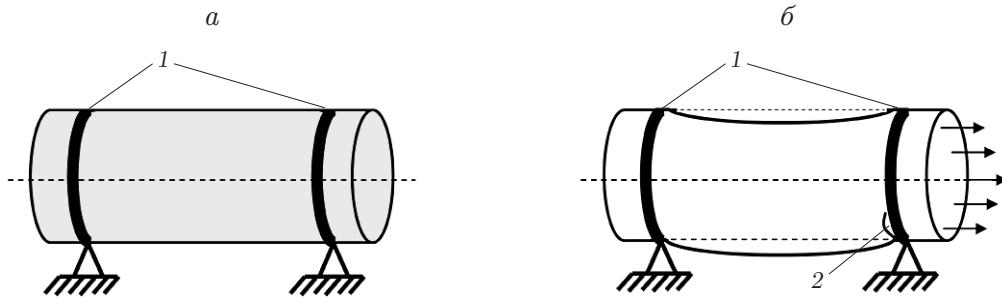


Рис. 4. Схемы трубопровода:

*a* — исходное состояние, *б* — появление поперечной трещины вблизи опор; 1 — опоры, 2 — трещина

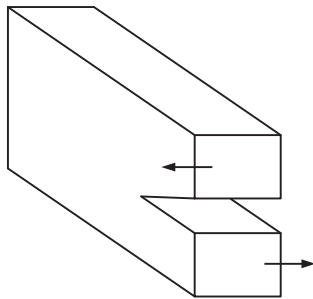


Рис. 5

Рис. 5. Разрушение по третьей моде

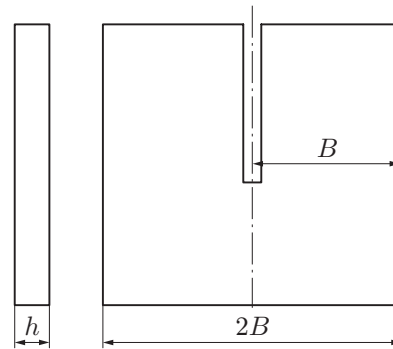


Рис. 6

Рис. 6. Образец для испытаний на разрушение по третьей моде

из стали марки E26-2, в состав которой входят углерод (0,25 %), фосфор (0,062 %) и сера (0,062 %). Механические характеристики материала следующие: предел упругости  $R_e = 205 \div 255$  МПа, временное сопротивление  $\sigma_B = 410 \div 490$  МПа, удлинение  $\Delta = 20$  %, вязкость разрушения  $K = 18,9$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>, показатель упрочнения  $n = 0,22$ .

Проведено несколько экспериментов при различных нагрузках. В образцах создавалась начальная усталостная трещина, длина которой равна половине толщины образца. Затем проводился эксперимент, в котором трещина продвигалась в течение некоторого промежутка времени. После этого создавалась новая усталостная трещина длиной 5 мм. Таким образом, каждый образец испытывался два раза. В ходе эксперимента определялись смещение берегов трещины и радиус деформированной области.

**3. Аналитический метод определения параметров, характеризующих разрушение по третьей моде.** Ниже с использованием основных положений механики разрушения определяются работа  $W_e$ , необходимая для продвижения трещины продольного сдвига (третья мода), и ККИН. Аналитический метод обработки экспериментальных данных основан на методах механики вязкого разрушения.

Аналитически и экспериментально исследуется разрушение тонкой пластины с трещиной (элемента трубопровода), к которой приложен момент, обеспечивающий чистый сдвиг. С использованием энергетического подхода решается плоская задача о распространении трещины с учетом различных краевых условий для напряжений в ее вершине.

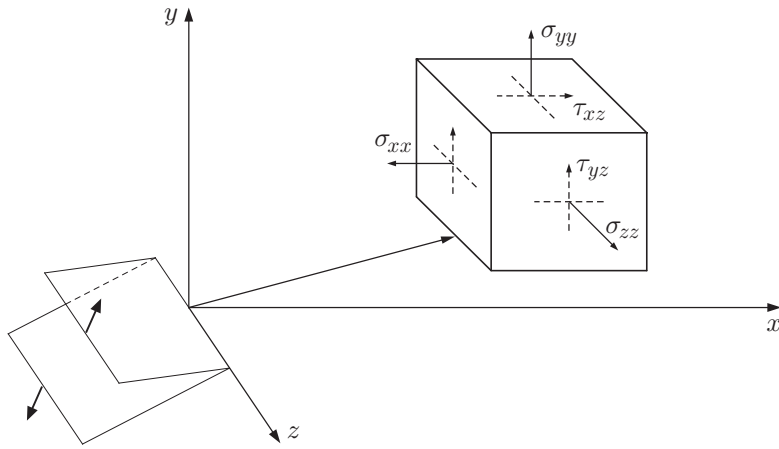


Рис. 7

Рис. 7. Разрыв участка трубопровода по третьей моде

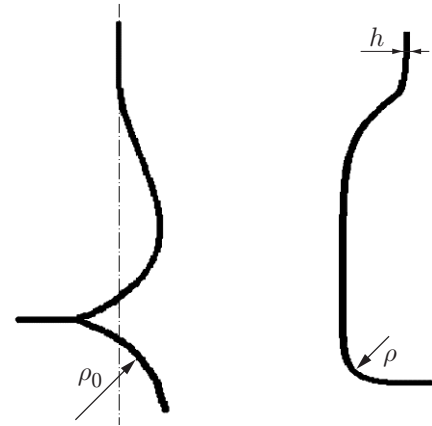


Рис. 8

Рис. 8. Деформация образца при пластическом деформировании

В случае трещины поперечного сдвига (рис. 7) энергетическое уравнение имеет вид

$$F du = W_e h da, \tag{1}$$

где  $F$  — сдвиговая сила;  $h$  — толщина пластины (трубопровода);  $du$  — приращение смещения точки приложения силы  $F$ ;  $da$  — приращение длины трещины.

Поскольку  $du = 2 da$  (см. рис. 7) [16], уравнение (1) можно записать в виде

$$W_e = 2F/h,$$

где  $W_e$  — удельная работа, необходимая для продвижения трещины.

Необходимо учесть работу, затрачиваемую на деформирование “основания” образца. Приращение длины трещины на величину  $dx$  создает бесконечно малый изгибающий момент. Для радиуса кривизны упругой кривой (рис. 8) имеем выражение

$$\rho_e = hE/(2R_e),$$

где  $E$  — модуль Юнга. Выражение для изгибающего момента напряжений, соответствующих пластическим деформациям, записывается в виде

$$M_p = \int_0^{h/2} y \sigma \cdot 2B dy. \tag{2}$$

Напряжения и деформации в области пластического деформирования связаны зависимостью

$$\sigma = K \varepsilon^n, \tag{3}$$

где  $\sigma$  — напряжение;  $\varepsilon$  — деформация:

$$\varepsilon = y/\rho, \tag{4}$$

$y$  — расстояние от нейтральной оси до текущей точки;  $\rho$  — радиус кривизны;  $n$  — константа материала.

Подставляя (3), (4) в (2), получаем

$$M_p = \frac{Kh^{n+2}B}{2^{n+1}\rho_0^n(n+2)}.$$

Работа напряжений в элементе  $dx$  “основания” образца с радиусом кривизны  $\rho_0$  вычисляется по формуле [16]

$$dw = dx \int_{1/\rho_e}^{1/\rho_0+1/\rho} M_p d\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{KBh^{n+2}}{2^{n+1}(n+1)(n+2)} dx \left[ \left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_e}\right)^{n+1} - \frac{1}{\rho_e} \right].$$

Заметим, что до момента достижения значения радиуса кривизны  $\rho_e$  “основание” образца сначала деформируется упруго, а затем — пластически. Следовательно, момент напряжений, соответствующий пластическим деформациям, вычисляется по формуле

$$M_p^* = \frac{Kh^{n+2}B}{2^{n+1}(n+2)} \left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_e}\right)^n,$$

а работа, совершаемая этим моментом, — по формуле

$$dw^* = dx \int_{1/\rho_e}^{1/\rho_0} M_p^* d\left(\frac{1}{\rho}\right),$$

или

$$dw^* = \frac{\sigma_0 Bh^{n+2}}{2^{n+1}(n+1)(n+2)} dx \left[ \left(\frac{2}{\rho_e}\right)^{n+1} - \left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_e}\right)^{n+1} \right].$$

Так как полная работа равна

$$dw_p = dw + dw^*,$$

то

$$dw_p = \frac{\sigma_0 Bh^{n+2}}{2^{n+1}(n+1)(n+2)} dx \left[ \left(\frac{2}{\rho_e}\right)^{n+1} - \left(\frac{1}{\rho_e}\right)^{n+1} \right]. \quad (5)$$

Соотношение (5) позволяет оценить работу  $W_e$ , необходимую для продвижения трещины [16]. В соответствии с положениями механики разрушения ККИН вычисляется по формуле [16]

$$K_{IIIc}^2 = \frac{E}{1+\nu} W_e, \quad (6)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

**4. Результаты исследования и их обсуждение.** Проведено экспериментальное исследование распространения трещины по третьей моде в образцах, имеющих различные толщину и ширину. Образцы были изготовлены из стали марки E26-2.

На рис. 9 представлены зависимости приложенной силы от смещения. При нагрузках, превышающих половину их максимальных значений, эти зависимости являются нелинейными. Продвижение трещины становилось видимым при значении нагрузки, близком к максимальному значению.

Из полученных результатов следует, что радиус кривизны  $\rho_0$  пластической зоны “основания” образца является важным параметром, характеризующим процесс распространения трещин и поведение материала (рис. 10).

На рис. 11 представлена зависимость  $F/h$  от ширины образца  $B$  при различных значениях его толщины. Для образца толщиной 0,5 мм эта зависимость становится нелинейной при  $F/h > 1,2$  кН/мм, для образца толщиной 1,2 мм — при  $F/h > 0,901$  кН/мм. Значения

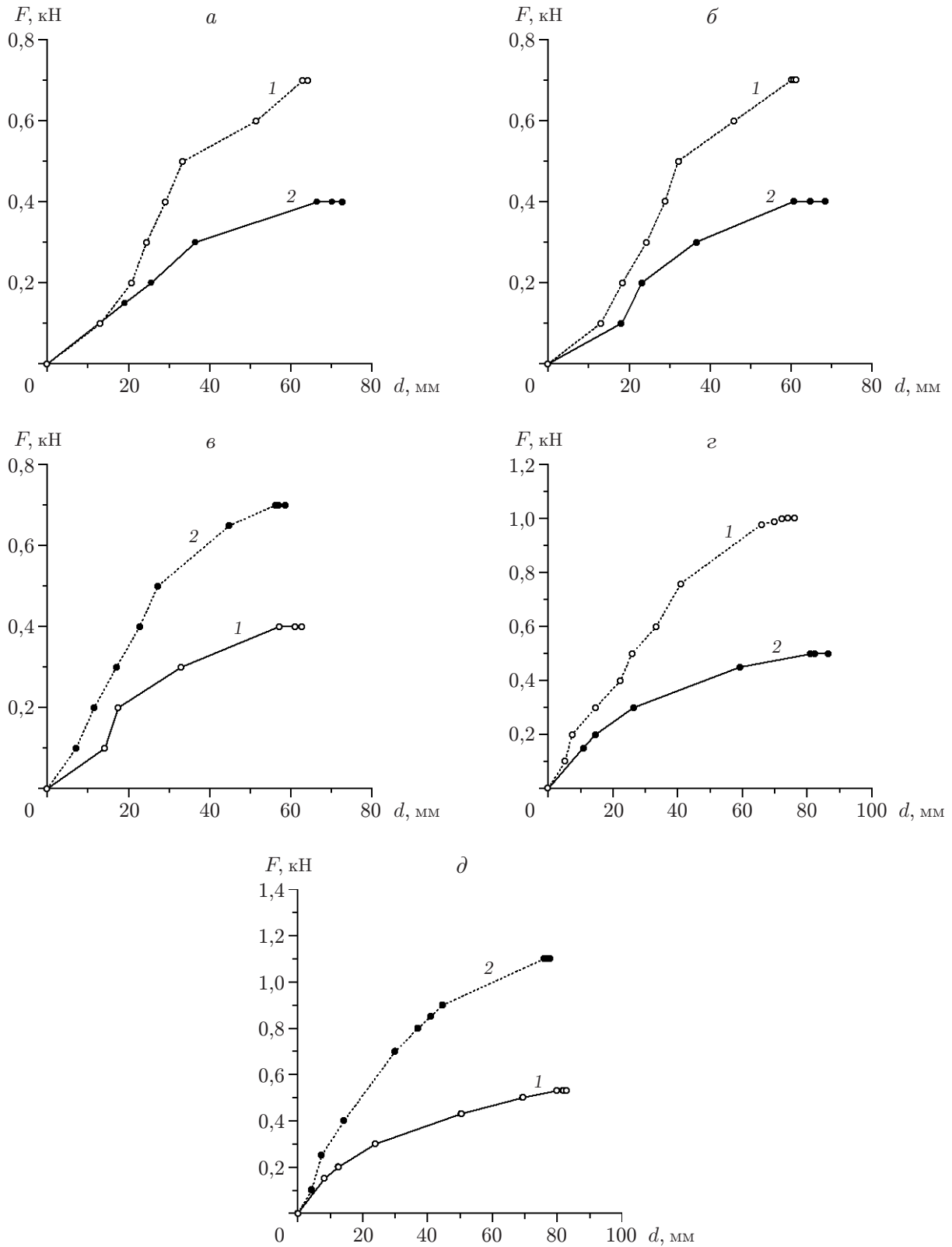


Рис. 9. Зависимость приложенной силы от смещения для образцов различной ширины:  
 $a - 2B = 40$  мм,  $б - 2B = 50$  мм,  $в - 2B = 80$  мм,  $г - 2B = 100$  мм,  $д - 2B = 110$  мм;  
 1 —  $h = 0,5$  мм, 2 —  $h = 1,2$  мм

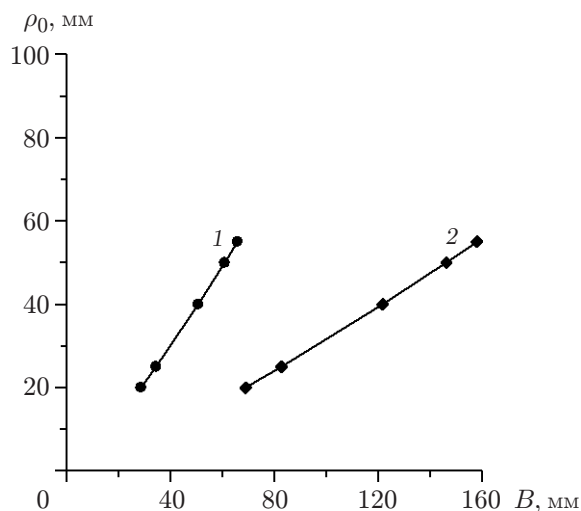


Рис. 10

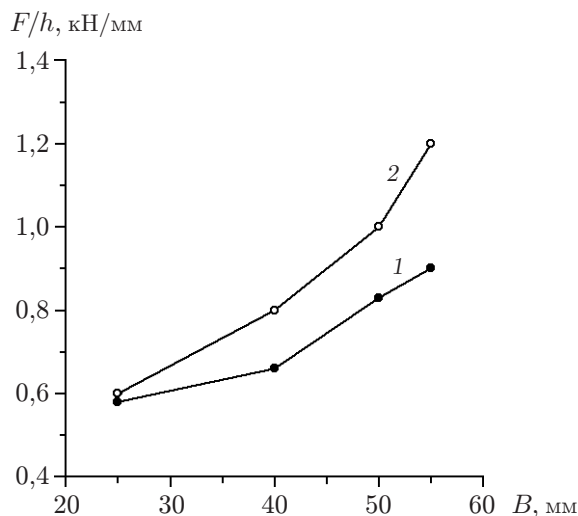


Рис. 11

Рис. 10. Зависимость радиуса кривизны деформированной линии от ширины образца:

1 —  $h = 0,5$  мм, 2 —  $h = 1,2$  мм

Рис. 11. Зависимость отношения  $F/h$  от ширины образца:

1 —  $h = 0,5$  мм, 2 —  $h = 1,2$  мм

Зависимость величин  $W_e$  и  $K_{IIIc}$  от толщины образца  $h$  при  $2B = 40$  мм

$h$ , мм	$2B$ , мм	$W_e$ , кДж/м <sup>2</sup>	$K_{IIIc}$ , МПа · м <sup>1/2</sup>
0,5	40	390	7745
1,2	40	470	8503

отношения  $F/h$ , при превышении которых нарушается линейная зависимость, зависят от геометрии образца.

С использованием соотношений (5), (6) и с учетом краевых условий выполнены вычисления работы  $W_e$  и критического значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IIIc}$ . Результаты вычислений приведены в таблице.

**Заключение.** Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование процесса распространения трещины в стали марки E26-2, используемой при изготовлении трубопроводов. Исследована задача об антиплоском сдвиге (третья мода). Построены зависимости сила — смещение для случая распространения трещины в образцах, имеющих различные ширину и толщину. Установлено, что при изучении процесса распространения трещины необходимо учитывать деформированное состояние “основания” образца.

Для определения работы  $W_e$ , необходимой для продвижения трещины, и критического значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IIIc}$  использованы интегральное представление для момента с учетом краевых условий и поле смещений в окрестности вершины трещины. Для образца толщиной 1,2 мм значения этих величин больше, чем для образца толщиной 0,5 мм. С использованием выражений, полученных для работы  $W_e$  и критического коэффициента  $K_{IIIc}$ , достаточно точно определяется как длина трещины, так и время до разрушения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании трубопроводов, предназначенных для транспортировки углеводородов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Irwin G. R.** Fracture testing of high-strength sheet materials under conditions appropriate for stress analysis: Rep. / U.S. Naval Res. Lab. N 5486. S. 1., 1960.
2. **Sih G. C.** Stress distribution near internal crack tips for longitudinal shear problems // J. Appl. Mech. 1965. V. 32. P. 51–58.
3. **Poulose P. K., Jones D. L., Liebowitz H.** Determination of nonlinear energy toughness values for cyclic loading applications // Engng Fracture Mech. 1976. V. 8, N 1. P. 293–299.
4. **Ehart R. J. A., Stanzl-Tschegg S. E., Tschegg E. K.** Crack face interaction and mixed mode fracture of wood composites during mode III loading // Engng Fracture Mech. 1998. V. 61. P. 253–278.
5. **Szekrenyes A.** Improved analysis of the modified split-antilever beam for mode-III fracture // Intern. J. Mech. Sci. 2009. V. 51. P. 682–693.
6. **Lazarus V., Leblond J.-B.** Crack paths under mixed mode (I+III) or (I+II+III) loadings // C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. 2b. 1998. V. 326. P. 171–177.
7. **Moura de M. F. S. F., Fernandez M. V. C., Morais de A. B., Campilho R. D. S. G.** Numerical analysis of the edge crack torsion test for mode III interlaminar fracture of composite laminates // Engng Fracture Mech. 2009. V. 76. P. 469–478.
8. **Meriem-Benziane M., Bou-Said B.** Determination of friction factor of Algerian crude oil during flow in pipe-lines // Flow Measurement Instrument. 2013. V. 33. P. 28–35.
9. **Carvalho A. A., Rebello J. M. A., Souza M. P. V., et al.** Reliability of non-destructive test techniques in the inspection of pipelines used in the oil industry // Intern. J. Pressure Vessels Piping. 2008. V. 85. P. 745–751.
10. **Ribeiro F. S., Souza Mendes P. R., Braga S. L.** Obstruction of pipelines due to paraffin deposition during the flow of crude oils // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1997. V. 40, N 18. P. 4319–4328.
11. **Frimpong S., Szymanski J., Changirwa R. M. M.** Oil sands slurry and waste recycling mechanics in a flexible pipeline system // Resources, Conservat. Recycling. 2003. V. 39. P. 33–50.
12. **Cravero S., Ruggieri C.** Correlation of fracture behavior in high pressure pipelines with axial flaws using constraint designed test specimens. Pt 1. Plane-strain analyses // Engng Fracture Mech. 2005. V. 72. P. 1344–1360.
13. **Banki R., Hoteit H., Firoozabadi A.** Mathematical formulation and numerical modeling of wax deposition in pipelines from enthalpy-porosity approach and irreversible thermodynamics // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. P. 3387–3398.
14. **Tang P., Yang J., Zheng J., et al.** Failure analysis and prediction of pipes due to the interaction between multiphase flow and structure // Engng Failure Anal. 2009. V. 16. P. 1749–1756.
15. **Dotta F., Ruggieri C.** Structural integrity assessments of high pressure pipelines with axial flaws using a micromechanics model // Intern. J. Pressure Vessels Piping. 2004. V. 81. P. 761–770.
16. **Sapounov V. T., Morozov E. M., Azari Z., Pluvinage G.** Déchirement ductile en statique des alliages d'aluminium // Rev. Franc. Mec. 1994. N 3. P. 239–244.
17. **Shahani A. R., Rastegar M., Botshekanan Dehkordi M., Moayeri Kashani H.** Experimental and numerical investigation of thickness effect on ductile fracture toughness of steel alloy sheets // Engng Fracture Mech. 2010. V. 77. P. 646–659.