

УДК 539.42

## ОЦЕНКА УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ НА РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛА ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

М. Н. Д. Чериф, М. Эльмегуэнни, М. Бенгуедиаб

Университет им. Джиллали Лиабеса, 22000 Сиди-Бель-Аббес, Алжир

E-mails: n.cherief@yahoo.com, elmeguennimohamed@yahoo.fr, benguediabm@gmail.com

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование ударной вязкости образцов из полимерного материала высокой плотности. Испытывались образцы с односторонним надрезом при трехточечном изгибе и по методике Шарпи. Предложена энергетическая модель оценки ударной вязкости полиэтилена высокой плотности, позволяющая описать как хрупкое, так и вязкое разрушение.

Ключевые слова: ударная вязкость, трехточечный изгиб, полиэтилен высокой плотности.

DOI: 10.15372/PMTF20170218

**Введение.** Пластические свойства полиэтилена высокой плотности (ПВП) (полиэтилена низкого давления) широко используются при изготовлении водо- и газопроводных труб. Прочность на разрушение ПВП меньше прочности на разрушение коммерческих металлов и ферросплавов, также прочность ПВП на растяжение и сдвиг меньше прочности на растяжение и сдвиг металла и бетона, однако эти недостатки частично компенсируются малой массой (большой прочностью) ПВП [1].

Механические и реологические свойства полиэтилена существенно зависят от его микроструктуры. Поскольку полимерные материалы в твердом состоянии являются неоднородными и сжимаемыми, их механические свойства зависят от наличия в них микро- и макротрещин [2]. Как статические [3], так и динамические [4] нагрузки могут привести к образованию и медленному устойчивому распространению хрупкой трещины, до тех пор пока ее размер не достигнет критического, вследствие чего произойдет быстрое разрушение, либо пока в рабочем сечении не возникнут большие напряжения, в результате чего произойдет вязкое разрушение [5]. В зависимости от характера кристаллической структуры разрушение полимеров при ударе может быть различного типа [6–9]: хрупкое (неустойчивая форма разрушения) или вязкое (устойчивая форма разрушения) [10]. Обнаружено несколько типов разрушения, различающихся величиной пластических деформаций в вершине трещины и устойчивым или неустойчивым характером распространения трещины. Для определения энергии удара, затрачиваемой на хрупкое или вязкое разрушение, необходимо использовать энергетическое уравнение, соответствующее виду разрушения [11].

В настоящей работе предложено новое энергетическое уравнение, позволяющее определить энергию, затрачиваемую как на хрупкое, так и на вязкое разрушение. Необходимость

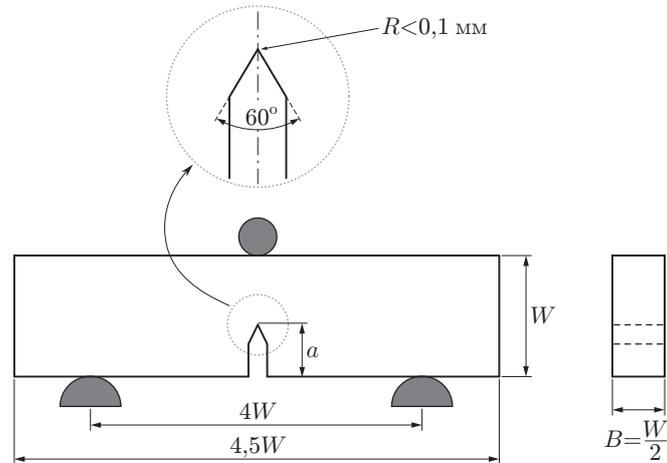


Рис. 1. Геометрия образца и схема его нагружения

построения такого уравнения обусловлена тем, что при распространении по ПВП трещина сначала проходит стадию неустойчивого движения (хрупкое разрушение), затем — стадию устойчивого движения (вязкое разрушение). При построении энергетического уравнения использованы энергетические уравнения Уильямса и Кана [3].

**Материал и геометрия экспериментальных образцов.** Испытания на образцах из ПВП плотностью  $\approx 0,93 \text{ г/см}^3$  с массовой долей технического углерода  $\approx 2,5 \%$ , индексом кристалличности  $\approx 66 \%$ , изготовленных из пресованных труб в соответствии со стандартом ISO 9001:2000. Внешний диаметр труб  $D = 250 \text{ мм}$ , толщина стенки  $t = 18 \text{ мм}$ , длина  $L = 1000 \text{ мм}$ . Согласно [12] истинная деформация при разрушении такого материала составляет приблизительно 250 %. Модуль Юнга равен  $E = 850 \text{ МПа}$ , предел текучести  $\sigma_y$ , определенный по точке пересечения касательной к кривой  $\sigma \sim \epsilon$ , проведенной из начала координат, с касательной, проведенной к пологому участку кривой  $\sigma \sim \epsilon$ , расположенному перед участком, соответствующим стадии упрочнения, равен 25 МПа.

Геометрические параметры образца приведены на рис. 1. Ширина образца  $W$  выбрана в соответствии с международным стандартом ASTM E399 (1997), длина надреза  $a$  варьировалась, безразмерная длина надреза менялась в интервале  $0,35 < a/W < 0,60$ .

Испытания на разрушение при трехточечном изгибе проводились при комнатной температуре с постоянной скоростью смещения  $W/10 \text{ мм/мин}$ , эксперименты на ударное разрушение проводились по методике Шарпи. При этом использовалась стандартизированная методика испытаний надрезанных образцов.

**Методика испытаний и анализ результатов.** Ниже изложена методика статических и динамических испытаний образцов. Для определения основных характеристик разрушения ПВП проводились испытания на трехточечный изгиб со скоростью деформирования  $W/10$ . По результатам этих испытаний были построены зависимости нагрузки  $F$  от смещения  $u$  при различных значениях длины надреза.

Эксперименты по определению ударной вязкости ПВП проводились по методике Шарпи. Несмотря на высокую пластичность образцов из ПВП, наличие надрезов существенно влияет на характер их разрушения, и при большой скорости деформирования они могут разрушаться хрупко.

Для определения энергии, затрачиваемой на разрушение, использовался маятниковый копер Ceast 9050 с энергией 5 Дж, скорость молота которого в момент удара равна приблизительно 4 м/с. Результаты экспериментов по разрушению образцов с различной кристаллической структурой показывают, что процесс разрушения может быть как неустойчивым (хрупкое разрушение), так и устойчивым (вязкое разрушение) [10].

Хрупкое разрушение имеет место в случае, если накопленная образцом энергия значительно больше энергии, затрачиваемой на образование двух поверхностей при разрушении. В этом случае трещина растет неустойчиво. Оставшаяся часть энергии превращается в кинетическую. При этом образец, как правило, делится на две части, которые разлетаются после его разрушения. Для ПВП многих типов образовавшиеся при разрушении поверхности имеют грубую структуру, и наблюдаются разветвления макромолекул [11].

Для определения энергии, поглощаемой образцом при хрупком разрушении, в [3] предложена модель на основе линейной механики разрушения. Энергию  $U$ , поглощенную образцом при разрушении, можно выразить через вязкость материала на сдвиг  $G_C$ :

$$U = G_C B W \Phi, \quad (1)$$

где  $B$ ,  $W$  — толщина и ширина образца соответственно;  $\Phi$  — зависящий от геометрии образца коэффициент, значение которого можно определить для неразрушенного образца.

Для случая вязкого разрушения в работе [9] предложен подход, учитывающий энергию возникновения и энергию распространения трещины в материале. В предположении, что энергия вязкого разрушения линейно зависит от площади поверхности разрушения, получаем

$$G_r = G_i + T_a A; \quad (2)$$

$$U/A = G_i + T_a A/2, \quad (3)$$

где  $G_r$  — фактическая энергия разрушения;  $G_i$  — энергия, затрачиваемая на образование трещины;  $T_a$  — скорость изменения  $G_r$  по мере увеличения площади поверхности разрушения;  $A$  — площадь поверхности разрушения.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Вязкость обычно оценивается энергией деформации, приходящейся на единицу толщины образца и необходимой для достижения критического значения смещения или нагрузки. Энергия, затраченная на разрушение, равна площади области под кривой  $F(u)$  при пластическом деформировании (заштрихованная область на рис. 2).

На рис. 3 приведена зависимость энергии  $U/B$ , затрачиваемой на разрушение и отнесенной к толщине образца, от длины трещины. При постоянном смещении в первом приближении эту зависимость можно считать линейной.

Согласно работам [13, 14] поверхность разрушения, образовавшаяся в экспериментах, проводившихся по методике Шарпи, имеет структуру, описанную в работе [14] (рис. 4).

На рис. 5 показана поверхность, образовавшаяся после разрушения образца в эксперименте, проводившемся по методике Шарпи. Видны три стадии распространения трещины: стадия устойчивого распространения трещины при вязком разрушении, стадия неустойчивого распространения трещины при хрупком разрушении и смешанная стадия, на которой одновременно происходит и вязкое, и хрупкое разрушение. Величина энергии, затрачиваемой на разрушение, зависит от характера разрушения, который по мере движения трещины меняется от “полностью неустойчивого” к “смешанному” и затем к “полностью устойчивому” (см. рис. 5).

На рис. 6 приведены зависимости энергии, затрачиваемой на разрушение, от величины  $BW\Phi$  при хрупком разрушении и от величины  $B(W - a)$  при вязком разрушении.

Поскольку по экспериментальным данным, полученным при ударном нагружении, построить точную зависимость нагрузки от смещения и оценить по ней ударную вязкость трудно, будем использовать энергетический критерий. Ниже приводятся аналитические зависимости, которые позволяют описать обе стадии разрушения (хрупкую и вязкую) и при построении которых использованы зависимости, предложенные в [3].

Зависимости, приведенные на рис. 6, *a*, аппроксимируются выражением

$$U = 0,03BW\Phi + 0,08, \quad (4)$$

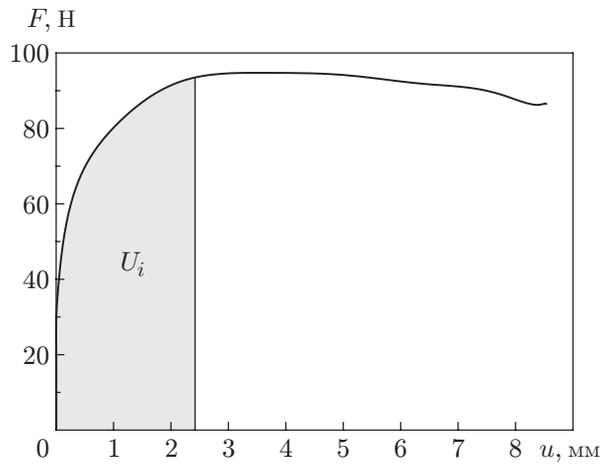


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость нагрузки  $F$  от величины смещения при пластическом деформировании образца

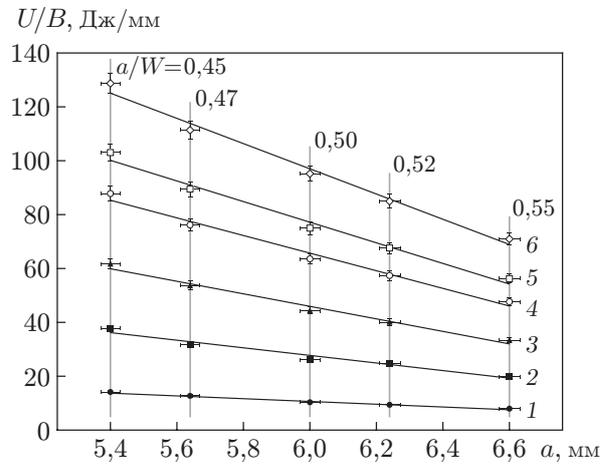


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость энергии пластического деформирования от длины трещины при различных значениях смещения  $D_{pl}$ :

1 —  $D_{pl} = 1,5$  мм, 2 —  $D_{pl} = 3,0$  мм, 3 —  $D_{pl} = 4,5$  мм, 4 —  $D_{pl} = 6,0$  мм, 5 —  $D_{pl} = 7,5$  мм, 6 —  $D_{pl} = 9,0$  мм

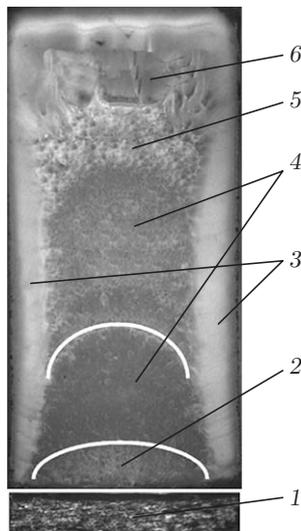


Рис. 4

Рис. 4. Типичная структура поверхности образца после ударного разрушения ПВП [14]:

1 — надрез, 2 — зеркало, 3 — “губы среза”, 4 — область хрупкого разрушения, 5 — область вязкого разрушения, 6 — область сжатия

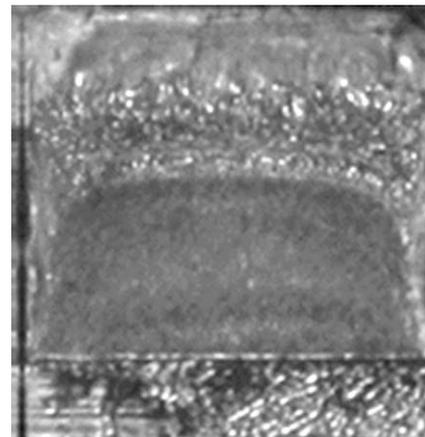


Рис. 5

Рис. 5. Поверхность образца после ударного разрушения

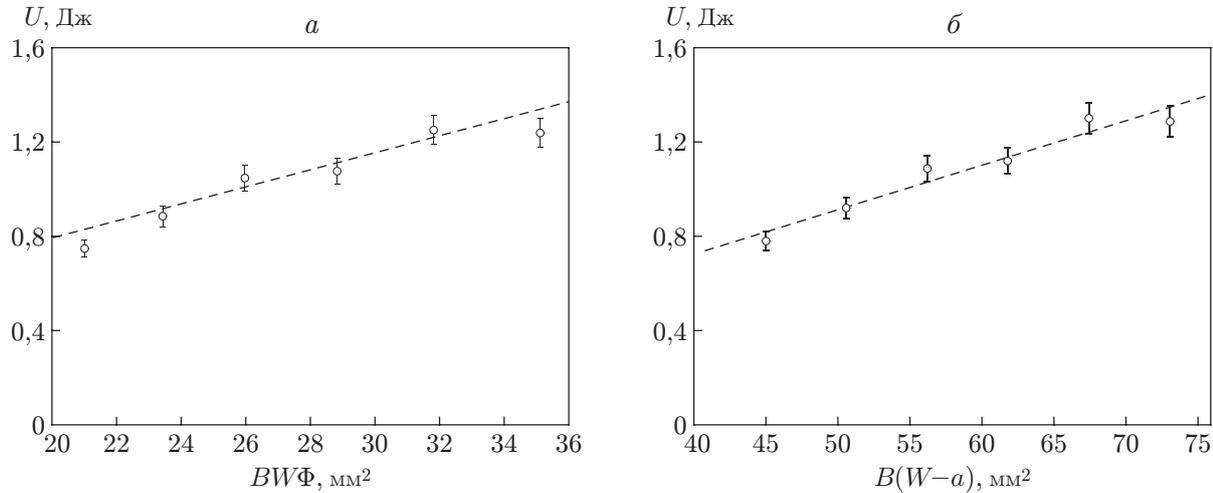


Рис. 6. Зависимости энергии, затрачиваемой на разрушение, от величины  $BW\Phi$  при хрупком разрушении (а) и от величины  $B(W-a)$  при вязком разрушении (б): точки — эксперимент, линии — аппроксимации (а — выражением  $U = 0,03BW\Phi + 0,08$ , б — выражением  $U = 0,02B(W-a) - 0,03$ )

зависимости, приведенные на рис. 6,б, — выражением

$$U = 0,02B(W-a) - 0,03. \quad (5)$$

Согласно работе [3] величина  $\Phi$  вычисляется по формуле

$$\Phi = \frac{1}{Y^2(a/W)} \int Y^2\left(\frac{a}{W}\right) d\frac{a}{W} + \frac{\beta}{2\alpha^2} \frac{1}{Y^2(a/W)} \quad (6)$$

( $\beta = EBC_0$ ;  $C_0 = u/P = S^3/(48EI) = S^3/(4EBW^3)$ ). В случае трехточечного изгиба имеем

$$\alpha = \frac{\sigma}{P} BW,$$

где

$$\sigma = \frac{3PS}{2BW^2}.$$

Таким образом, уравнение (6) принимает вид

$$\Phi = \frac{1}{Y^2(a/W)} \left( \frac{S}{18W} + \int_0^{a/W} Y^2\left(\frac{a}{W}\right) d\frac{a}{W} \right).$$

Поскольку в эксперименте расстояние между опорами равно  $S = 4W$ , получаем

$$\Phi = \frac{1}{Y^2(a/W)} \left( \frac{2}{9} + \int_0^{a/W} Y^2\left(\frac{a}{W}\right) d\frac{a}{W} \right). \quad (7)$$

В [15] предложено следующее выражение для функции  $Y$ :

$$Y = 1,93 - 3,07 \frac{a}{W} + 14,53 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25,11 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25,8 \left(\frac{a}{W}\right)^4.$$

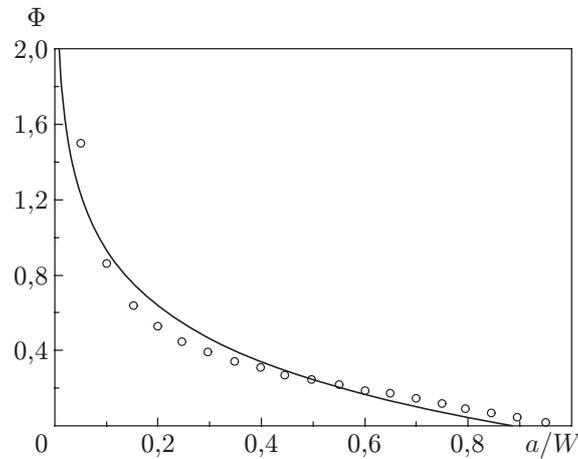


Рис. 7. Зависимость  $\Phi$  от  $a/W$  для дугообразных образцов: точки — эксперимент, линия — аппроксимация выражением  $\Phi = -0,4 \ln(a/W) - 0,05$

Используя формулы (7), можно определить зависимость  $\Phi$  от  $a/W$  (рис. 7). Окончательно получаем следующее выражение:

$$\Phi = 1,6 - 7 \frac{a}{W} + 11,5 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 6,3 \left(\frac{a}{W}\right)^3. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (4), получаем зависимость полной энергии от параметра  $a/W$ :

$$U = BW \left[ 0,048 - 0,21 \frac{a}{W} + 0,345 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 0,189 \left(\frac{a}{W}\right)^3 \right] + 0,08.$$

Уравнение (5) запишем в виде

$$U = BW(0,02 - 0,02a/W) - 0,03.$$

Тогда выражение для полной энергии принимает вид

$$U = BW \left[ 0,068 - 0,23 \frac{a}{W} + 0,345 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 0,189 \left(\frac{a}{W}\right)^3 \right] + 0,05.$$

Пренебрегая величиной  $0,05/(BW)$ , получаем

$$\frac{U}{BW} = \left[ 0,068 - 0,23 \frac{a}{W} + 0,345 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 0,189 \left(\frac{a}{W}\right)^3 \right].$$

Длина надреза должна удовлетворять условию  $0,35 \leq a/W \leq 0,60$ .

Для определения зависимости энергии при ударном разрушении  $U/(BW)$ , приходящейся на единицу площади, от безразмерной глубины надреза  $a/W$  проводились испытания образцов при статическом и динамическом нагружениях.

Для того чтобы описать стадии неустойчивого и устойчивого разрушения (см. рис. 6), в данной работе используется зависимость, являющаяся обобщением зависимостей, предложенных в работе [3] (рис. 8).

На рис. 9 приведены зависимости поглощаемой энергии от длины  $a/W$  трещины при статическом (трехточечный изгиб) и динамическом (по методике Шарпи) нагружениях. Как при статическом, так и при динамическом нагружении поглощаемая энергия уменьшается с увеличением длины надреза в образцах из ПВП. Согласно [16] преобладающим типом разрушения ПВП при испытаниях по методике Шарпи является расслаивание. Основной причиной уменьшения поглощаемой энергии является быстрый рост трещины. При любой длине надреза поглощаемая энергия, приходящаяся на единицу площади, при

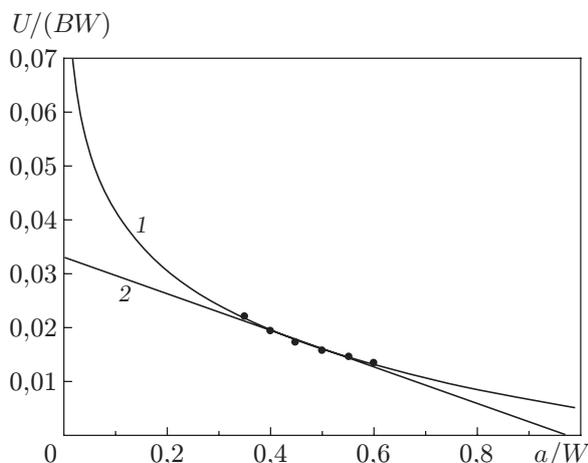


Рис. 8

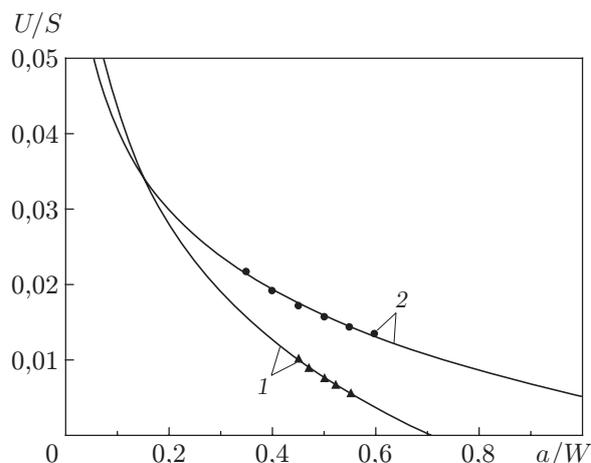


Рис. 9

Рис. 8. Зависимость энергии от параметра  $a/W$  при динамических испытаниях: точки — эксперимент, линии — аппроксимации (1 — выражением  $U/(BW) = -0,01 \ln(a/W) + 0,005$ , 2 — выражением  $U/(BW) = -0,03 \ln(a/W) + 0,03$ )

Рис. 9. Зависимости поглощаемой энергии от длины трещины при статическом (трехточечный изгиб) (1) и динамическом (по методике Шарпи) (2) нагружениях: точки — эксперимент, линии — аппроксимации (1 — выражением  $U/S = -0,02 \ln(a/W) - 0,007$ , 2 — выражением  $U/S = -0,01 \ln(a/W) + 0,005$ )

динамическом нагружении больше, чем при статическом, что обусловлено нелинейным характером жесткости в зоне контакта ударника с образцом Шарпи [17]. Согласно [18, 19] при большой скорости соударения наблюдаются побочные эффекты (колебания экспериментальной установки, к силам удара молота добавляются инерционные силы), которые уменьшаются с уменьшением скорости удара, при этом инерционные силы можно регулировать демпфированием в системе передачи нагрузки от молота к образцу.

**Заключение.** В работе экспериментально и аналитически исследовано поведение материала из ПВП при больших пластических деформациях статического и динамического нагружения. В экспериментах использовались образцы с односторонним надрезом. Статические нагружения проводились по схеме трехточечного изгиба, динамические — по методике Шарпи. Исследовалось хрупкое и вязкое разрушение трещин.

Для аналитического исследования прочности на разрушение предложена смешанная модель, позволяющая описать как хрупкое, так и вязкое разрушение. На основе проведенного исследования сделаны следующие выводы.

Как при статическом, так и при динамическом нагружении поглощаемая энергия, приходящаяся на единицу площади, в образцах из ПВП уменьшается при увеличении длины надреза. Преобладающим типом разрушения ПВП является расслаивание. При любой длине надреза поглощаемая энергия, приходящаяся на единицу площади, при динамическом нагружении больше, чем при статическом.

Основной причиной уменьшения поглощаемой энергии является быстрое распространение трещин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. El-Bagory T. M. A. A., Sallam H. E. M., Younan M. Y. A. Effect of strain rate, thickness, welding on the J-R curve for polyethylene pipe materials // Theoret. Appl. Fracture Mech. 2014. V. 74. P. 164–180.

2. **Eskandari J. J., Nekoomanesh M., Ahmadi M., Arabi H.** From molecular weight distribution to linear viscoelastic properties and back again: application to some commercial high-density polyethylenes // *Iran Polymer J.* 2012. V. 21. P. 403–413.
3. **Chan M. K. V., Williams J. G.** Slow stable crack growth in high density polyethylenes // *Polymer.* 1983. V. 24. P. 234–244.
4. **Hertzberg R. W.** *Fatigue of engineering plastics* / R. W. Hertzberg, J. A. Manson. L.: Acad. Press, 1980.
5. **Sandilands G. J., Bowman J.** An examination of the role of flaw size and material toughness in the brittle fracture of polyethylene pipes // *J. Materials Sci.* 1986. V. 21. P. 2881–2888.
6. **Plati E., Williams J. G.** The determination of the fracture parameters for polymers in impact // *Polymer Engng Sci.* 1975. V. 15, iss. 6. P. 470–477.
7. **Vu-Khanh T., Charentenay F. X.** Mechanics and mechanisms of impact fracture in semi-ductile polymers // *Polymer Engng Sci.* 1985. V. 25. P. 841–850.
8. **Vu-Khanh T., Fisa B.** Effects of fillers on fracture performance of thermoplastics: Strain energy density criterion // *Theoret. Appl. Fracture Mech.* 1990. V. 13. P. 11–19.
9. **Vu-Khanh T.** Impact fracture characterization of polymer with ductile behavior // *Theoret. Appl. Fracture Mech.* 1994. V. 21. P. 83–90.
10. **Elmajdoubi M., Vu-Khanh T.** Effect of cooling rate on fracture behavior of polypropylene // *Theoret. Appl. Fracture Mech.* 2003. V. 39. P. 117–126.
11. **Mamat A., Vu-Khanh T., Cigana P., Favis B. D.** Impact fracture behavior of nylon-6/ABS blends // *J. Polymer Sci. Pt B. Polymer Phys.* 1997. V. 35. P. 2583–2592.
12. **Elmequenni M., Naït-Abdelaziz M., Zaïri F., Gloaguen J. M.** Fracture characterization of high-density polyethylene pipe materials using the J-integral and the essential work of fracture // *Intern. J. Fracture.* 2013. V. 183. P. 119–133.
13. **Bohning M., Niebergall U., Adam A., et al.** Influence of biodiesel sorption on temperature-dependent impact properties of polyethylene // *Polymer Testing.* 2014. V. 40. P. 133–142.
14. **Bohning M., Niebergall U., Adam A., Stark W.** Impact of biodiesel sorption on mechanical properties of polyethylene // *Polymer Testing.* 2014. V. 34. P. 17–24.
15. **Brown J. W. F., Srawley J. E.** Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials // *ASTM STP.* 1966. V. 410. Amer. Soc. Testing Materials. P. 1–65.
16. **Demirci M. T., Tarakçioğlu N., Avci A., Erkendirci O. F.** Fracture toughness of filament wound BFR and GFR arc shaped specimens with Charpy impact test method // *Composites. Pt B. Engineering.* 2014. V. 66. P. 7–14.
17. **Rager A., Williams J. G., Ivankovic A.** Numerical determination of the energy calibration function  $g_d$  for high rate charpy impact tests // *Europ. Structural Integrity Soc.* 2003. V. 32. P. 199–205.
18. **Martínez A. B., Arencón D., Rodríguez J., Salazar A.** Influence of the notch sharpening on the impact fracture toughness of ethylene-propylene block copolymers // *Polymer Testing.* 2014. V. 36. P. 75–81.
19. **Major Z., Lang R. W.** Determination of rate dependent fracture toughness of plastics using precracked charpy specimens // *Europ. Structural Integrity Soc.* 2002. V. 30. P. 137–144.