

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-4-60-65

УДК (UDC) 620.191.33:678.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПОЛИМЕРАХ

© **Анисий Анисиевич Алексеев, Константин Николаевич Большев, Василий Алексеевич Иванов, Айталипа Степановна Сыромятникова, Александр Михайлович Большаков, Александр Семенович Андреев**

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия;
e-mail: spinor03@gmail.com

Статья поступила 4 мая 2017 г.

Одной из малоизученных проблем современной механики и физики разрушения является ветвление трещины, которое наблюдается в материалах различной природы. Для его исследования выполнен анализ критериев и механизмов ветвления трещины. Рассмотрены работы по исследованию ветвления трещины в полимерах и стали, фрактрографическому исследованию поверхности разрушения. Установлено, что трещина при ветвлении в хрупких пластиках достигает предельной скорости распространения $V^* = 500 - 800$ м/с. Проведены испытания на растяжение плоских образцов из полиметилметакрилата (ПММА) при температурах $+20$ и -60 °С с измерением скорости трещины методом разрыва токопроводящих полос. Создана измерительная установка на основе прецизионного преобразователя сигналов термометров сопротивления и термопар «Теркон», соединенного с компьютером. Проведены измерения скорости трещины при прямолинейном распространении трещины в зеркальной, матовой и перьевой зонах поверхности разрушения ПММА; при одиночном ветвлении трещины; при множественном ветвлении трещин с параллельным движением фронта нескольких трещин. Предложена гипотеза физического механизма ветвления трещины.

Ключевые слова: трещина; ветвление; скорость; полимер; сталь.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE CRACK BRANCHING SPEED IN POLYMERS

© **Anisiy A. Alexeev, Konstantin N. Bolshev, Vasiliy A. Ivanov, Aytalina S. Syromyatnikova, Alexander M. Bolshakov, Alexander S. Andreev**

V. P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; e-mail: spinor03@gmail.com

Submitted May 4, 2017.

One of the little-studied problems of modern mechanics and the physics of fracture is the branching of the crack, which is observed in materials of a different nature. For his research, an analysis of the criteria and mechanisms for crack branching. The investigations of crack branching in polymers and steel, fractographic investigation of the fracture surface are considered; criteria for crack branching as a dynamic stress intensity factor, crack speed. It is established that the crack at branching in brittle plastics reaches the limiting propagation speed $V^* = 500 - 800$ m/sec. Tensile tests of flat samples from polymethylmethacrylate (PMMA) at temperatures of $+20$ and -60 °C were carried out, with measurement of crack speed by the method of rupture of conducting strips. A measuring device based on a precision converter of signals of resistance thermometers and thermocouples "TERCON", connected to a computer, was created. Measured crack speed for rectilinear crack propagation in the mirror, matte, and feather zones of fracture surface of the PMMA; with single branching of the crack; with multiple branching of cracks with parallel movement of the front of several cracks. A hypothesis is proposed for the physical mechanism of fracture branching.

Keywords: crack; branching; velocity; polymer; steel.

Одна из малоизученных проблем современной механики и физики разрушения твердого тела — ветвление трещины, которое наблюдается в таких кристаллических и аморфных материалах, как стекло, сталь, алюминий, полимеры и скальные породы.

Анализ теоретических и экспериментальных работ [1 – 10] по исследованию ветвления трещин в материалах различной природы показывает, что параметром, контролирующим переход процесса прямолинейного распространения трещины к режиму ветвления, является критиче-

ское значение скорости распространения трещины V^* (предельная скорость), причем $V^* < V_R$ (V_R — скорость волны Рэлея), которое зависит от материала. По результатам экспериментальных исследований установлено, что трещина при ветвлении в номинально хрупких материалах — хрупких пластиках достигает предельной скорости распространения $V^* = 500 - 800$ м/с [2, 4 – 9] (рис. 1).

Существует два фундаментально различных подхода для объяснения механизма ветвления трещины при достижении V^* . Ветвление трещины согласно работам [1, 3, 6, 7 – 9] происходит в основном при инерционной перестройке поля напряжения и, следовательно, зависит от достижения трещиной определенной скорости, связанной с характерными скоростями волн в материале. Однако экспериментальные данные свидетельствуют о том, что между V^* и характерными скоростями волн в материале корреляция отсутствует, V^* сильно зависит от состава материала, экспериментально измеренные значения V^* значительно ниже порога Yoffe [1].

В моделях авторов работ [4, 5, 10], основанных на эволюции зоны процесса трещинообразования, ветвление трещины связано с изменением поведения материала около вершины трещины при достижении V^* , которая зависит от свойств материала в пределах рассматриваемой зоны. В соответствии с этими моделями ветвление трещины происходит в результате волнового взаимодействия между микроветвями и магистральной трещиной и является процессом, скорее всего, стохастическим, тогда как экспериментально наблюдается его детерминированность.

Таким образом, в настоящее время можно считать до конца не установленным физический механизм перехода трещины от прямолинейного распространения к ветвлению, объясняющий существование экспериментально наблюдающейся предельной скорости распространения трещины V^* . Следует отметить, что ветвление трещины изучалось в основном на модельных материалах — полиметилметакрилате, эпоксидной смоле, полиэфирной смоле — Nomalite-100 [2, 4 – 9, 12, 15]. Из-за технических сложностей в получении ветвления трещины при разрушении образца в некоторых работах исследовалось ветвление трещины в конструкционном материале — стали [3, 11, 13 – 15].

Как показывает практика, катастрофические аварии крупногабаритных тонкостенных металлоконструкций (газонефтепроводов большого диаметра, резервуаров, сосудов давления и др.) происходят не только при протяженном распространении хрупкой или вязкой трещины, но и при ее ветвлении. Последнее приводит к оско-

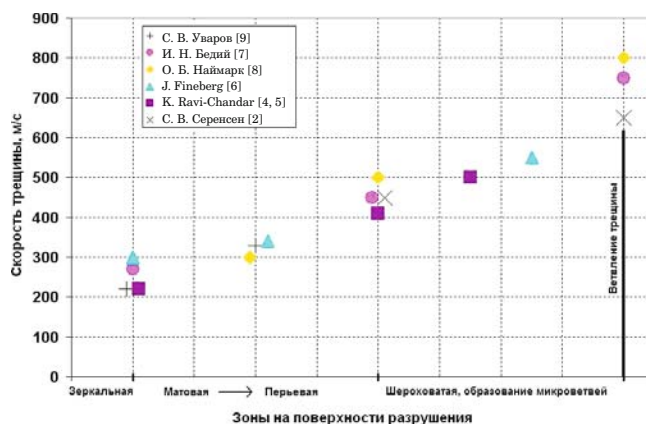


Рис. 1. Экспериментально измеренные значения скорости распространения трещины в хрупких материалах на различных этапах

лочному характеру разрушения тела конструкции и наносит наибольший материальный ущерб. Примером такого вида разрушения являются осколочные разрушения трубы магистрального газопровода, вертикального цилиндрического резервуара после длительной эксплуатации, когда возникшая от усталостного дефекта трещина распространилась вдоль трубопровода и в стенке резервуара с многочисленными ветвлениями [15].

Таким образом, экспериментальное исследование закономерностей разрушения при распространении трещин с ветвлением в материалах различной природы имеет важное значение как в фундаментальном, так и прикладном аспектах и является актуальной задачей разработки методов прогнозирования прочности и долговечности твердых тел.

Для экспериментального исследования перехода от прямолинейного распространения трещины к режиму ветвления проведена серия испытаний на растяжение плоских образцов из полиметилметакрилата (ПММА) размерами $150 \times 75 \times 4$ мм с одним боковым надрезом глубиной 3 мм на универсальной разрывной машине Instron. Образцы охлаждали азотом до температуры -60°C в температурной камере разрывной машины. При достижении заданной температуры их нагружали со скоростью 1 мм/мин до разрушения. Всего было испытано по пять образцов при температурах $+20$ и -60°C .

Скорость распространения трещины измеряли методом разрыва токопроводящих полос, регистрируя время разрыва и ее продвижение от инициирующего дефекта до разрушения образца (рис. 2). Принцип действия метода состоит в том, чтобы каждое последующее сопротивление, установленное последовательно с токопроводящими линиями, было больше предыдущего на 10 Ом;

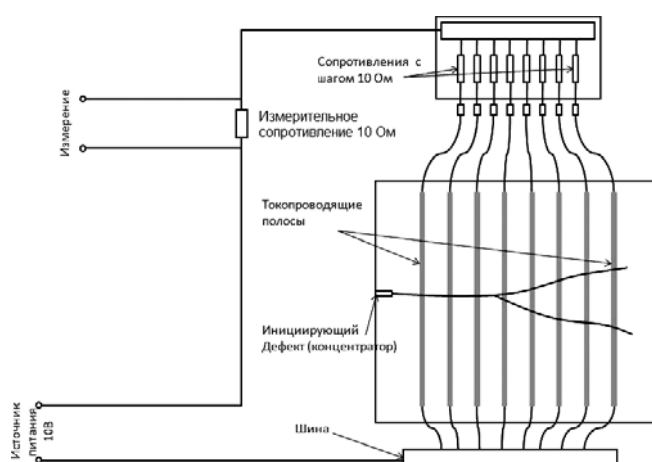


Рис. 2. Схема определения скорости трещины

$R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$, ..., $R_N = N \cdot 10 \text{ Ом}$. При выполнении этого условия изменение напряжения на измеряемом сопротивлении при разрыве очередной линии будет равномерным, что существенно упростит его регистрацию при движении трещины и последующем разрыве токопроводящих линий. На образец постепенно подают увеличивающуюся нагрузку. После начала разрушения по мере продвижения трещины от иницирующего дефекта токопроводящие линии размыкаются, уменьшая общее сопротивление батареи.

При этом напряжение на образцовом сопротивлении R_0 изменяется ступенчато с шагом $0,3 \text{ В}$; при прохождении трещиной последней токопроводящей линии и размыкании цепи оно падает с трех до нуля вольт (рис. 3). Эти изменения должна уловить быстродействующая плата, настроенная на запись сигнала, при колебании напряжения на $0,12 \text{ В}$. Получив ступенчатый сигнал, мы можем судить о времени прохождения трещиной очередной полосы. Зная время и расстояние, получаем скорость трещины на данном участке.

Создана измерительная установка на основе прецизионного преобразователя сигналов термометров сопротивления и термопар «Теркон», соединенного с компьютером через плату Ла-н10м8-100 (рис. 4). В установку входят:

- 1) быстродействующая плата АЦП для шины PCI Ла-н10м8-100 производства ЗАО «Руднев-Шилев», Москва;
- 2) кабельные термопары ТХА производства ПК «Тесей», г. Обнинск;
- 3) токопроводящий клей КОНТАКТОЛ, Россия;
- 4) блок питания DAZHENG PS-1302D, КНР;
- 5) образцы из ПММА;
- 6) универсальная разрывная машина Instron 1195, Англия (охлаждающий агент — жидкий азот);

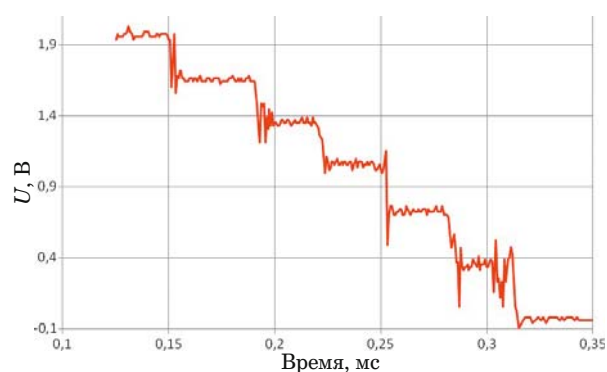


Рис. 3. Изменения напряжения при движении трещины

7) прецизионный преобразователь сигналов термометров сопротивления и термопар «Теркон» производства ООО «Термэкс», г. Томск.

На образце в средней части торца наносили боковой надрез глубиной 3 и шириной 1,5 мм фрезерным инструментом. На верхнюю и нижнюю поверхности образца наклеивали медные контактные площадки, затем наносили регистрирующие полосы. К верхней медной площадке подключали источник питания, к нижней контактной площадке — измерительную схему, составленную из батареи сопротивлений номиналом от 10 до 60 Ом, каждое из которых последовательно увеличивалось на 10 Ом. В средней части обратной стороны пластины фиксировали хромель-алюмелевую термопару для регистрации температуры.

В ходе разработки методики эксперимента были опробованы следующие токопроводящие регистрирующие линии:

- 1) полосы алюминиевой фольги толщиной $0,01 \text{ мм}$;
- 2) полосы из медной фольги толщиной $0,04 \text{ мм}$;
- 3) отрезки медной проволоки диаметром $0,15 \text{ мм}$;
- 4) дорожки из токопроводящего клея.

Алюминиевая фольга тонка, легко клеится на поверхность образца. Однако пайка алюминия возможна лишь при применении специальных средств и высокой температуре, что затрудняет эксперимент. Медная фольга толще, клеится хуже, но проще паяется. При этом медь более пластична, чем ПММА, поэтому при разрушении растягивается и рвется с задержкой. Аналогичные недостатки возникают при применении медной проволоки. Наилучший вариант — дорожки из токопроводящего клея. В застывшем состоянии токопроводящий клей отличается малой пластичностью и тонкостью слоя. К недостаткам такой технологии можно отнести высокую стоимость клея, а также его большое удельное сопро-

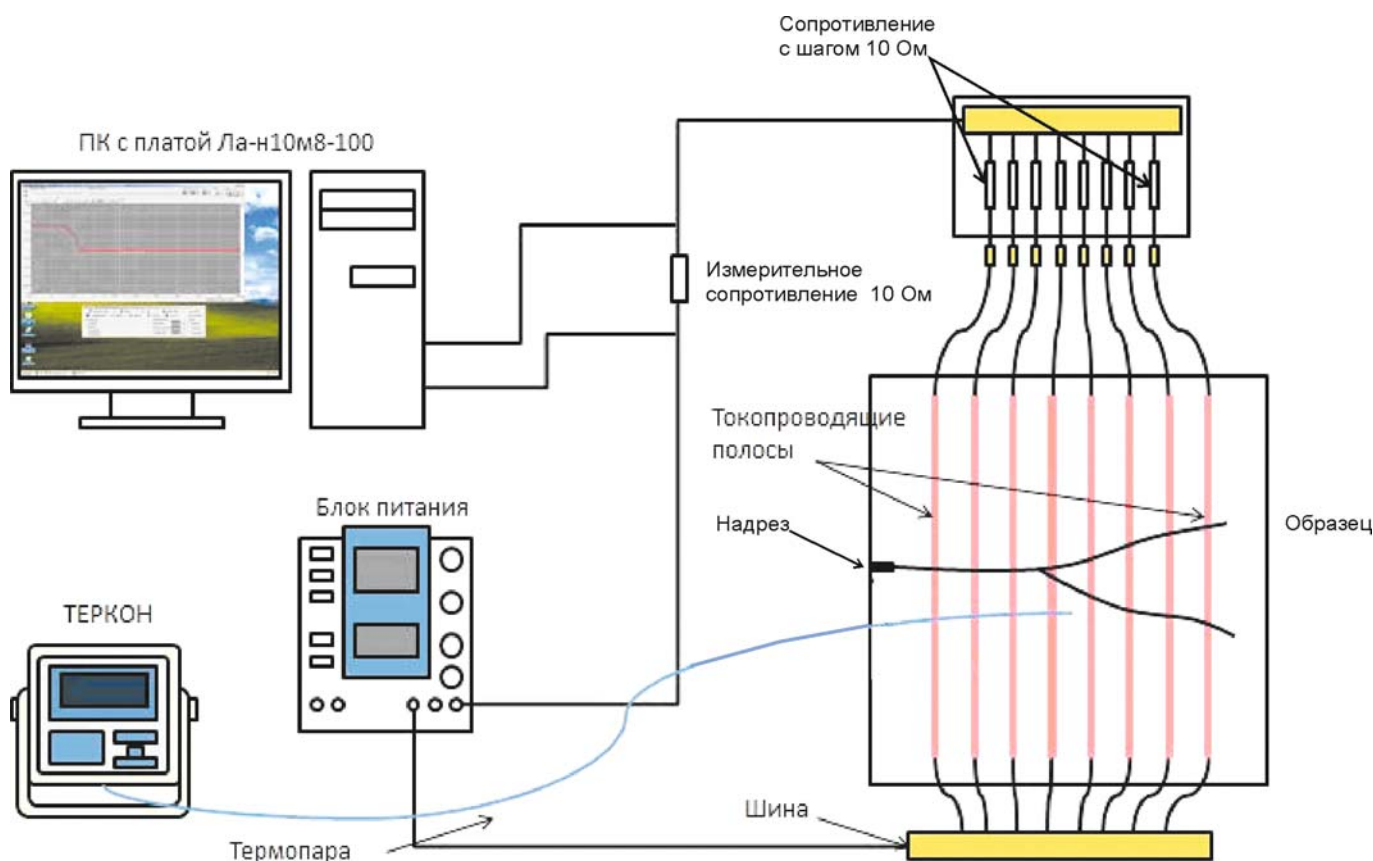


Рис. 4. Схема измерительной установки с исследуемым образцом

тивление (сопротивление полосы длиной 6 – 7 см и шириной 3 мм составляет примерно 3 Ом).

Для примерной оценки относительной погрешности измерения времени данным методом взята погрешность определения половины временного интервала регистрации данных, а за погрешность определения расстояния — половина ширины токопроводящей линии:

$$dt = \Delta t/2 = 0,32 \text{ мкс}, dx = \Delta x/2 = 1,5 \text{ мм}.$$

Среднее время прохождения трещиной очередного участка от линии до линии $\bar{t} \approx 0,03 \text{ мс}$; среднее расстояние, пройденное трещиной от линии до линии, $\bar{S} \approx 13 \text{ мм}$. Суммарная погрешность измерений

$$\varepsilon_0 = \frac{dx}{\bar{S}} + \frac{dt}{\bar{t}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{13 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,32 \cdot 10^{-6}}{0,03 \cdot 10^{-3}} = 12\%.$$

Обработку данных производили в программной среде Mathcad Express.

Результаты эксперимента. При +20 °С трещина распространяется прямолинейно в плоскости, перпендикулярной направлению максимальных растягивающих напряжений; разрушающие напряжения $\sigma_p = 10 \text{ МПа}$. Было испытано пять образцов, получено ветвление

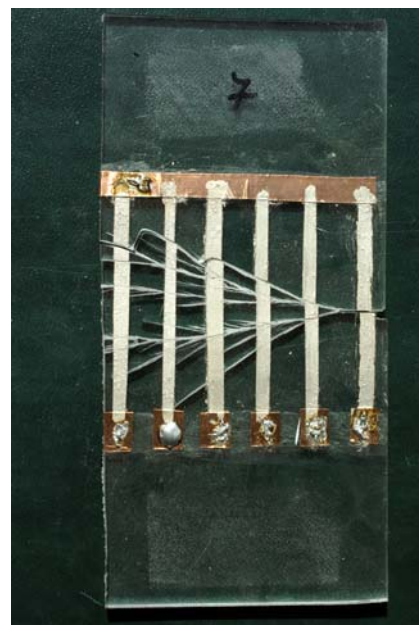


Рис. 5. Образец из ПММА с регистрирующими полосами для измерения скорости (множественное ветвление трещины)

трещины на одном образце. На поверхности разрушения образцов без ветвления трещины обнаружены зеркальная и матовая зоны, которые соответствуют режиму стабильного прямолиней-

ного распространения основной трещины. У образца с ветвлением трещины дополнительно имеется перьевая зона, в которой происходило ветвление трещины. Измерения скорости трещины показали следующее: зеркальная и матовая зоны соответствуют невысоким значениям скорости трещины — 144 – 373 м/с, перьевая зона — 418 – 454 м/с; ветвление трещины произошло при скорости около 500 м/с.

При $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ разрушение происходит при более высоких разрушающих напряжениях $\sigma_p = 20 - 30$ МПа, при которых получено множественное ветвление трещин. Во всех пяти образцах трещина распространялась от надреза прямолинейно на расстояние 12 – 15 мм до точки ветвления, после которой разрушение происходило путем множественного ветвления и параллельного движения фронта нескольких трещин (рис. 5).

На участке прямолинейного движения трещины зеркальная и матовая зоны имеют очень маленький размер, далее идет перьевая зона, после которой в шероховатой зоне поверхности разрушения находится точка первоначального ветвления трещины и последующих множественных ветвлений. Микроветви, занимающие часть толщины образца и имеющие клиновидную форму, имеются до и после точек ветвления основной трещины, механизм образования микроветвей и ветвления главной трещины одинаков.

Измерение скорости в зеркальной, матовой и перьевой зонах не удалось провести из-за их малой протяженности (0,5 – 1 мм) по сравнению с расстоянием между токопроводящими регистрирующими полосами (12 мм). Первоначальное ветвление трещины произошло при скорости около 750 м/с, а последующие множественные ветвления при параллельном движении фронта нескольких трещин — при скоростях 750 – 920 м/с. Большой разброс измеренных скоростей на этапе множественного ветвления объясняется тем, что при движении фронтов множества трещин, движущихся под различными углами к горизонту, путь каждой из них различен и невозможно установить, какая трещина первой пересекла контрольную линию измерения скорости.

Множественное ветвление с параллельным движением фронтов нескольких трещин (4 – 6 основных трещин без учета микроветвей) при скорости ветвления трещины в данных экспериментах 750 – 920 м/с, согласующейся с литературными данными (500 – 800 м/с) о ветвлении одиночной трещины, служит подтверждением тому, что избыточная энергия, поступающая в вершину трещины, расходуется на создание новых трещин, а не на увеличение скорости. Данные результаты подтверждают предложенную ранее авторами гипотезу физического меха-

низма ветвления трещины, где достижение критической скорости V^* для ветвления трещины является достаточным условием, а необходимым условием является превышение потока энергии, поступающей в вершину движущейся трещины, над энергией сопротивления материала росту одиночной трещины G^* .

Разработанная методика экспериментального определения скорости распространения, ветвления трещины показала неплохие результаты на полимерных материалах и должна быть адаптирована для использования на образцах (конструкциях) из стали. Требуется также решение для устранения эффекта «дребезга» контактов при прохождении трещины через токопроводящую линию, что позволит повысить точность измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yoffe E. The moving Griffith crack / *Philosophical Magazine*. 1951. N 42. P. 739 – 750.
2. Немец Я., Серенсен С. В., Стреляев В. С. Прочность пластмасс. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
3. Финкель В. М. Физика разрушения. — М.: Металлургия, 1970. — 376 с.
4. Ravi-Chandar K. Dynamic fracture of nominally brittle materials / *International Journal of Fracture*. 1998. N 90. P. 83 – 102.
5. Ravi-Chandar K., Knauss W. G. An experimental investigation into dynamic fracture. III. On steady-state crack propagation and crack branching / *International Journal of Fracture*. 1984. N 26. P. 141 – 154.
6. Sharon E., Fineberg J. Microbranching instability and the dynamic fracture of brittle materials / *Physical Review B*. 1996. Vol. 54. N 10. P. 7128 – 7139.
7. Бедий И. Н. Кинетика быстрых трещин и их ветвление: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1990. — 17 с.
8. Наймарк О. Б., Баранников В. А., Давыдова М. М. и др. Динамическая стохастичность и скейлинг при распространении трещины / *Письма в ЖТФ*. 2000. Т. 26. Вып. 6. С. 67 – 77.
9. Уваров С. В. Экспериментальное исследование эффектов нелинейной динамики распространения трещин: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Пермь, 2000. — 16 с.
10. Kobayashi A. S., Ramulu M. Mechanics of crack curving and branching — a dynamic fracture analysis / *International Journal of Fracture*. 1985. N 27. P. 187 – 201.
11. Даффи А. Р., МакКлур Дж. М., Айбер Р. Дж., Мэсси У. А. Практические примеры расчета на сопротивление хрупкому разрушению трубопроводов под давлением / *Разрушение*. В 7-ми т., Т. 5. — М.: Машиностроение, 1977. С. 146 – 209.
12. Сыромятникова А. С., Алексеев А. А., Левин А. И. и др. Механизмы разрушения полимерного материала при распространении и ветвлении трещины / *Деформация и разрушение материалов*. 2008. № 2. С. 33 – 39.
13. Алексеев А. А., Левин А. И., Сыромятникова А. С. и др. Ветвление трещины при разрушении цилиндрических оболочек из углеродистой стали внутренним давлением / *Деформация и разрушение материалов*. 2008. № 12. С. 33 – 39.
14. Сыромятникова А. С., Алексеев А. А., Левин А. И., Лыглаев А. В. Ветвление трещины в углеродистой стали. Механизмы разрушения / *Деформация и разрушение материалов*. 2009. № 2. С. 25 – 30.
15. Алексеев А. А., Сыромятникова А. С., Большев К. Н. Разрушение твердых тел при быстром распространении и ветвлении трещин. — Lambert Academic Publishing, 2013. — 128 с.

REFERENCES

1. **Yoffe E.** The moving Griffith crack / *Philosophical Magazine*. 1951. N 42. P. 739 – 750.
2. **Nemets Ya., Serensen S. V., Strelyaev V. S.** The strength of plastics. — Moscow: Mashinostroenie, 1970. — 335 p. [in Russian].
3. **Finkel' V. M.** Fracture physics. — Moscow: Metallurgiya, 1970. — 376 p. [in Russian].
4. **Ravi-Chandar K.** Dynamic fracture of nominally brittle materials / *International Journal of Fracture*. 1998. N 90. P. 83 – 102.
5. **Ravi-Chandar K., Knauss W. G.** An experimental investigation into dynamic fracture. III. On steady-state crack propagation and crack branching / *International Journal of Fracture*. 1984. N 26. P. 141 – 154.
6. **Sharon E., Fineberg J.** Microbranching instability and the dynamic fracture of brittle materials / *Physical Review B*. 1996. Vol. 54. N 10. P. 7128 – 7139.
7. **Bedii I. N.** Kinetics of fast cracks and branching: Author's abstract of candidate's thesis. — Kiev, 1990. — 17 p. [in Russian].
8. **Naimark O. B., Barannikov V. A., Davydova M. M., et al.** Dynamic stochasticity and scaling on the propagation of cracks / *Pis'ma Zh. Teor. Fiz.* 2000. Vol. 26. Issue 6. P. 67 – 77 [in Russian].
9. **Uvarov S. V.** Experimental study of the effects of the nonlinear dynamics of crack propagation: Author's abstract of candidate's thesis. — Perm, 2000. — 16 p. [in Russian].
10. **Kobayashi A. S., Ramulu M.** Mechanics of crack curving and branching — a dynamic fracture analysis / *International Journal of Fracture*. 1985. N 27. P. 187 – 201.
11. **Duffy A. R., McClure G. M., Eiber R. J., Massey W. A.** / *Fracture*. Vol. 5 // Edited by H. Liebowitz. — New York: Acad. Press, 1969. P. 159.
12. **Syromyatnikova A. S., Alekseev A. A., Levin A. I., et al.** Mechanisms of fracture of the polymer material in the propagation and branching cracks / *Deform. Razrush. Mater.* 2008. N 2. P. 33 – 39 [in Russian].
13. **Alekseev A. A., Levin A. I., Syromyatnikova A. S., et al.** Cracks branching in the fracture of cylindrical shells made of carbon steel internal pressure / *Deform. Razrush. Mater.* 2008. N 12. P. 33 – 39 [in Russian].
14. **Syromyatnikova A. S., Alekseev A. A., Levin A. I., Lyglaev A. V.** Cracks branching in carbon steel. Mechanisms of fracture / *Deform. Razrush. Mater.* 2009. N 2. P. 25 – 30 [in Russian].
15. **Alekseev A. A., Syromyatnikova A. S., Bol'shev K. N.** Fracture of solids by rapid propagation and branching cracks. — Lambert Academic Publishing, 2013. — 128 p. [in Russian].