
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Материаловедение

УДК 539.4.01; 678.019

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-116-122>

Физическая модель роста хрупкой трещины при динамическом воздействии на статически нагруженный образец с надрезом

В.Н. Петров, В.В. Лепов*

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия
**wisecold@mail.ru*

Аннотация. Предложена модифицированная модель роста динамической трещины в вязкоупругом материале на основе структурного подхода, включающего термокинетическую концепцию С.Н. Журкова и критерий хрупкого разрушения Нейбера–Новожилова. Подход учитывает неоднородную микроструктуру материала и позволяет моделировать стадийность развития трещины, выявляемую фрактографическими исследованиями. Дан анализ основных параметров физически обоснованной модели, апробированной на данных эксперимента по импульсному расклиниванию образцов из полиметилметакрилата с острым боковым надрезом, нагружаемых статическим растяжением в широком диапазоне климатических температур.

Ключевые слова: хрупкое разрушение, вязкоупругость, ударное нагружение, растяжение, бегущая трещина, полиметилметакрилат, модель роста, трещиностойкость, высокоскоростная фоторегистрация.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-48-140015) и Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект III.28.1.1.) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Станция натурных испытаний» ИФТПС СО РАН.

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-116-122>

Physical Modeling of Brittle Crack Growth for dynamic impact on one-edge tension specimen

V.N. Petrov, V.V. Lepov*

Larionov Institute of the Physical-Technical problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia
**wisecold@mail.ru*

Abstract. The modified model for dynamic crack growth in viscoelastic material has been proposed. The model based on the structural approach that includes Zhurkov thermokinetic concept and Neiber-Novozhilov criterion of brittle fracture. The structural approach describes the microstructure inhomogeneity of material and staging of crack propagation revealing by fractography as changing the scale of damage accumulation and fracture. The main parameters of the physical model approved on experimental data on pulse hit action of the striker to a notch of the previously hardly loaded single edge-notched specimen in wide range of environment temperatures has been analyzed in the paper.

Key words: brittle fracture, viscoelasticity, shock loading, tension, crazing, polymethylmethacrylate, crack growth model, crack resistance, high-speed photo registration.

Acknowledgments. *This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project 18-48-140015) and the Program for Basic Research of State Academies of Science (Project III.28.1.1.) Using the equipment of the Center for Collective Use «Field Test Station» IPTPS SB RAS.*

Введение

Во всём мире в настоящее время усиливается интерес к моделированию сложных процессов динамического разрушения в широком диапазоне скоростей нагружения и в различных условиях окружающей среды, поскольку прогресс в развитии скоростного транспорта, включая автомобильный, железнодорожный и авиационно-космическую технику, столкнулся с рядом проблем, связанных с необходимостью учета температурных и динамических нагрузок, а также влияния накопленной энергии материала на процесс разрушения. Современная наука располагает средствами фрактографического анализа, экспериментального и численного моделирования, которые позволяют в полной мере понять механизмы, лежащие в основе процессов динамического разрушения материалов [1, 2]. Однако в большинстве случаев численный расчет не заменяет аналитических решений, а последние могут пролить свет на истинную физическую природу разрушения, что позволяет учитывать структуру материала на различных масштабных уровнях с гораздо меньшими затратами времени и сил [3, 4].

Кроме того, полимерные материалы сами по себе представляют значительный практический интерес. В частности, органическое стекло полиметилметакрилат (ПММА) находит широкое применение в электротехнике в качестве изоляционного материала при изготовлении электрической и физической аппаратуры, а также в оборонной технике, поскольку является радиопрозрачным в широком диапазоне частот. До широкого распространения металлических стекол и керамики его применяли и в качестве конструкционного материала. Поэтому исследования характеристик его динамического разрушения представляются достаточно актуальными [5, 6].

Материалы и оборудование

Поскольку полимерные материалы являются вязкоупругими твердыми телами, при высоких скоростях нагружения и низких температурах испытаний их способность к неупругому и пластическому деформированию резко падает за счет образования межмолекулярных «мостиков». Но для ПММА движения отдельных боковых групп макромолекул на начальных стадиях деформации сменяются движением хребтовых звеньев макромолекулы – на завершающих [7], поэтому ПММА

незначительно меняет свои свойства с понижением температуры в пределах от -183° до 60° С (в частности, ударную вязкость). Вкупе с оптической прозрачностью, чувствительной к внутренним напряжениям, он является идеальным материалом для моделирования сложных процессов динамики трещин в условиях концентрации напряжений и импульсного нагружения. Это позволило разработать ряд теоретических моделей и энергетических критериев [8] на основе экспериментальных данных, полученных в ходе исследований по статико-динамическому нагружению образцов с применением высокоскоростной фотокамеры СФР -1 [9] (рис. 1).

В эксперименте образец, находящийся в условиях статического растяжения, подвергается расклинивающему удару по боковому надрезу. Схема нагружения приведена на рис.2. В испытаниях использовались образцы с одним боковым надрезом (ОБН) при фиксированных нагрузках в области упругой пропорциональности модельного материала полиметилметакрилата (ПММА) при следующих температурах испытаний: -90° , -40° и 20° С.

Исследование фрактограмм поверхностей разрушения образцов показало наличие трех видов последовательных зон (1 – зеркальная; 2 – матовая; 3 – перьевая). Первая зона характеризуется следами в виде бороздок на гладкой поверхности, которые ортогональны фронту продвижения трещины. Данная зона соответствует начальной, медленной, стадии распространения трещины. Экспериментальные данные показали, что с увеличением энергии удара бойка протяженность данной зоны уменьшается.

Обоснование и построение модели

Особенностью полимеров является значительная релаксация динамических процессов за счет процессов переориентации макромолекул и разрушения аминов в цепочках. Поэтому для первой зоны характерен разрыв связей вследствие высоких перенапряжений, независимо от того, через какие элементы молекулярной или надмолекулярной структуры проходит вершина трещины. Вероятность разрыва полимера в этой области больше вследствие значительной концентрации напряжений в вершине ускоряющейся трещины [10]. Достижение скорости, когда время разрыва макромолекулы значительно меньше времени

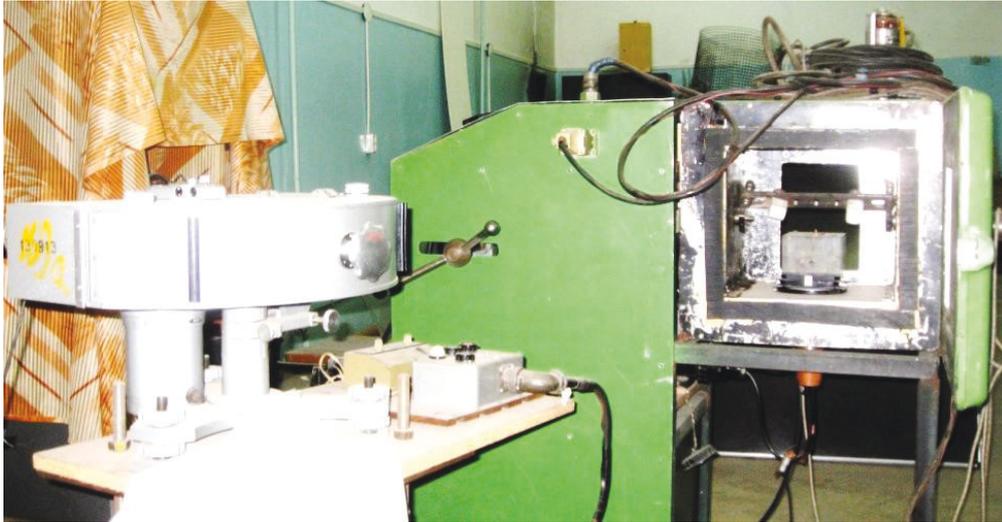


Рис. 1. Магнитоимпульсная установка «МИУ-1» для испытаний материала
Fig. 1. Magnet impulse test set «MIU-1» for material research

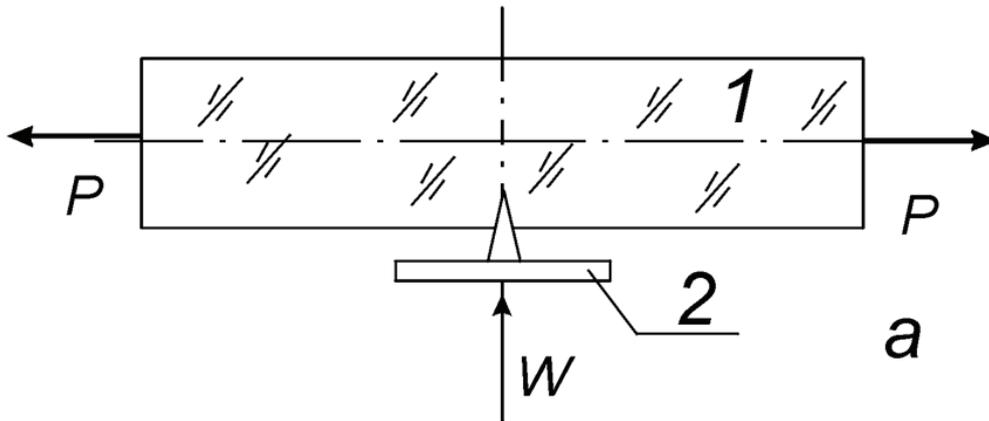


Рис. 2 Схема нагружения образца: 1 – образец с ОБН; 2 – боек «МИУ-1»
Fig. 2 Specimen loading scheme: 1 – edge-notch tension specimen; 2 – striker of «MIU-1»

релаксации её связей, соответствует началу хрупкого разрушения полимеров [11]. Вторая область (соответствует матовой зоне) характеризуется достижением предельной скорости трещины, когда разрушаются межкластерные границы, что может приводить к выбросам энергии в виде вторичных трещин и ветвления. В третьей области (перьевая зона) наблюдается некое «плато», ввиду постоянства средней скорости продвижения трещины. Существует также четвертая область, не четко отражаемая, но которая, в сущности, является зоной «долома». Таким образом, ввиду вязкоупругого характера деформирования, при отрицательных температурах динамика трещины соответствует механизму хрупкого разрушения по всей ширине образца, а область долома существенно мала.

Далее, исходя из положений термофлуктуационной теории, когда разрушение рассматривается

не как предельное состояние материала, наступающее при достижении критических значений напряжения или деформации, а как кинетический процесс накопления повреждений, развивающийся в теле с момента приложения нагрузки, предполагается, что механические напряжения снижают барьер активации, облегчая разрыв когезионных связей в полимере. Непосредственное разрушение полимера объясняется образованием трещин в местах концентрации напряжений, а зарождение и развитие трещин рассматриваются как следствие кинетического процесса термофлуктуационного разрыва связей [10] согласно активационной зависимости (закона долговечности) Журкова:

$$\tau = \tau_0 \exp(U_0 - \gamma\sigma/kT), \quad (1)$$

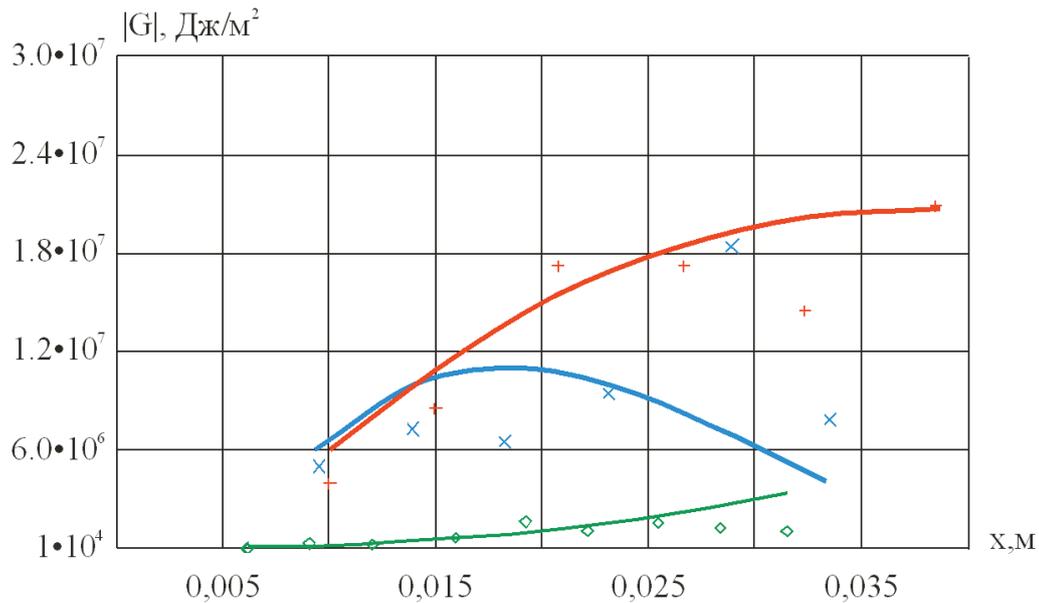


Рис. 3. Зависимость модуля потока энергии в вершину трещины от длины трещины при различных температурах испытаний (линиями показаны рассчитанные по модели зависимости, а точками – экспериментальные данные): зеленым цветом – –90°C, красным – –40°C, синим – 20°C

Fig. 3. The crack tip energy flow modulus dependence versus crack length at different environment temperatures (calculated by model shown by curves and experimental results by points): green – –90°C, red – –40°C, blue – 20°C

где τ – долговечность при заданном напряжении растяжения σ ; τ_0 – период тепловых колебаний, примерно равный $10^{-13} - 10^{-14}$ с для классических твердых тел и 10^{-13} с для твердых полимеров; U_0 – энергия активации самопроизвольного разрыва полимерных цепей при $\sigma = 0$; γ – структурно-чувствительный коэффициент Журкова; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Величина U_0 в отличие от коэффициента γ не зависит от физического состояния и надмолекулярной структуры полимера, а определяется его типом и структурой полимерных цепей. В рамках термофлуктуационной теории предэкспонента τ_0 в (1) трактуется как период тепловых колебаний атомов в полимерной цепи. Основной вывод о природе процесса разрушения твердых тел, который следует из уравнения (1), заключается в том, что причиной разрушения твердых тел при температурах выше 0 К является тепловое движение, а напряжение лишь увеличивает вероятность разрыва связей и уменьшает вероятность их рекомбинации.

Также следует учитывать трактовку структурного размера в механике разрушения, предложенную Г. Нейбером и В.В. Новожиловым в одноименном критерии следующего вида:

$$\frac{1}{d} \int_0^d \sigma dr \leq \sigma_c, \quad (2)$$

где σ – главное растягивающее напряжение в окрестности вершины трещины ($r = 0$); σ_c – предел прочности «бездефектного» материала. Главной особенностью является введение некоторого структурного размера d . Согласно работам Р.В. Гольдштейна и Н.М. Осипенко, его рассматривают как линейный размер, характеризующий элементарную ячейку разрушения на данном масштабном уровне [12, 13].

Обобщенный структурный подход трактует изменение структурного размера d в процессе развития процессов накопления повреждений как различие механизмов разрушения на различных масштабах [14]. На макроскопическом уровне d определяется по данным квазистатических испытаний образцов с трещинами и в соответствии с критерием Нейбера–Новожилова (2) может быть выражен через статическую вязкость разрушения и прочность по простой формуле:

$$d = \frac{2K_{Ic}^2}{\pi\sigma_c^2}. \quad (3)$$

где K_{Ic} – коэффициент интенсивности напряжений при разрушении.

Таким образом, предлагается следующая модель роста хрупкой трещины при комбинированном статико-динамическом нагружении:

$$X = \frac{A}{d} \exp\left(\frac{B\sigma_{\text{пр}} + W_b}{kT}\right), \quad (4)$$

где X – длина трещины; T – температура; k – постоянная Больцмана; d – структурный размер; $\sigma_{\text{пр}}$ – приведенное напряжение (отношение приложенной нагрузки P к площади сечения образца); W_b – энергия удара бойка; A и B – поправочные коэффициенты размерностью м^2 и м^3 соответственно. Физический смысл коэффициентов, таким образом, состоит в нагружаемой площади и объеме материала, вовлеченного в процесс деформации.

Однако данная модель дает хорошее совпадение с экспериментальными данными только на протяжении первой и второй зон разрушения и имеет расхождение в третьей зоне – на этапе распространения трещины с постоянной средней скоростью ввиду превалирования механизмов долома в условиях снижения напряжений и релаксации деформаций молекулярной структурой полимера. По сравнению с известными численными решениями [15] модель отличается простотой, сохраняя в то же время глубокий физический смысл.

В дальнейшем полученная на основе энергетического подхода модель была использована для оценки трещиностойкости в условиях нагружения расклинивающим ударом по предварительно статически нагруженному образцу [8]. В качестве основного параметра использовано критическое значение потока энергии, соответствующее критической длине трещины:

$$G_{cr} \leq G(l_{\text{тр}}^*). \quad (5)$$

На рис. 3 сплошными линиями показаны расчетные значения модуля потока энергии при различных температурах окружающей среды (-90° , -40° и 20°C), вычисленные на основе предложенной модели (5), а точками – данные, полученные из эксперимента. Условия нагружения образца соответствуют энергии бойка $W_b = 135$ Дж и растягивающей нагрузке $P = 981$ Н.

Выводы

Таким образом, разработанная модель роста хрупкой трещины, основанная на физических представлениях о флуктуационном характере процесса разрушения, позволяет произвести переход от дискретных экспериментальных данных при комбинированном нагружении образца из вязкоупругого материала с неоднородной иерархией молекулярных структур к набору непрерывных численных данных, необходимых для расчета значений потока энергии, поступающего в вершину трещины, в широком диапазоне внешних

воздействий, включая низкие температуры.

Литература

1. Братов В.А. Численные модели динамики разрушения // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. 3(2). С. 5–16. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2009.2.3.18>.
2. Ha Y.D., Bobaru F. Studies of dynamic crack propagation and crack branching with peridynamics // International Journal of Fracture. 2010. 162. P. 229–244. <https://doi.org/10.1007/s10704-010-9442-4>.
3. Valeriy Lepov, Albert Grigoriev, Mbelle Samuel Bisong, Kyunna Lepova. Brittle Fracture Modeling for Steel Structures operated in the Extreme // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 5. P. 777–784.
4. Лепов В.В., Григорьев А.В., Мбелле С.Б., Сивцев П.В., Голиков Н.И., Махарова С.Н., Ачкасова В.С., Лепова К.Я. Повреждения и ресурс стальных конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. С. 50–58.
5. Md Raziun Bin Mamtaz. Measurement of Fracture Toughness of Polymethyl Methacrylate (PMMA). Technical Report. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, 2016. 20 p.
6. Стухляк П.Д., Букетов А.В., Панин С.В., Марущак П.О., Мороз К.М., Полтаранин М.А., Вухерер Т., Корниенко Л.А., Люшкин Б.А. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17(2). С.65–83. doi: 10.24411/1683-805X-2014-00057.
7. Головин Ю.И., Турин А.И., Бойцов Э.А., Хлебников В.В. Кинетика формирования отпечатка и микромеханизмы пластической деформации при динамическом микро- и наноиндентировании ступенчатонарастающей нагрузкой // XV Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12–14 апреля 2005 г.: Сборник тезисов. СПб., 2005. С.54.
8. Петров В.Н., Лепов В.В. Критерии оценки трещиностойкости конструкционных материалов // Металлургия машиностроения. 2011. 6. С.12–14.
9. Петров В.Н., Лепов В.В., Семенов Х.Н., Ларионов В.П. Энергетический критерий разрушения полимерных материалов для случая комбинированного статико-динамического нагружения // Физическая мезомеханика. 2002. 4(5). С.67–72.
10. Бартнев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
11. Киреенко О.Ф., Лексовский А.М., Регель В.Р. Фрактографический метод определения условий

перехода к хрупкому разрушению в полимерах // Проблемы прочности. 1972. 7. С.60–63.

12. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Разрушение и формирование структуры // Докл. АН СССР. 1978. 4(240). С.829–832.

13. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Структуры и процессы разрушения горных пород // Построение моделей развития сейсмического процесса и предвестников землетрясений. Вып. 1. М., 1993. С. 21–37.

14. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Лепова К.Я. Структурный подход к многомасштабному моделированию эволюционных процессов в материалах с внутренней микроструктурой // Наука и образование. 2015. №4. С. 82–87.

15. Ayatollahi M.R., Razavi S.M.J., Moghaddam M. Rashidi, Berto F. Mode I fracture analysis of polymethylmethacrylate using modified energy-based models // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18, № 5. С. 53–62. doi: 10.24411/1683-805X-2015-00053.

References

1. Bratov V.A. Chislennye modeli dinamiki razrusheniya // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. 2009. 3(2). S. 5–16. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2009.2.3.18>.

2. Ha Y.D., Bobaru F. Studies of dynamic crack propagation and crack branching with peridynamics // International Journal of Fracture. 2010. 162. P. 229–244. <https://doi.org/10.1007/s10704-010-9442-4>.

3. Valeriy Lepov, Albert Grigoriev, Mbelle Samuel Bisong, Kyunna Lepova. Brittle Fracture Modeling for Steel Structures operated in the Extreme // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 5. P. 777–784.

4. Lepov V.V., Grigor'ev A.V., Mbelle S.B., Sivtsev P.V., Golikov N.I., Makharova S.N., Achikasova V.S., Lepova K.Ya. Povrezhdeniya i resurs stal'nykh konstruktivnykh, ekspluatiruyushchikhsya v ekstremal'nykh usloviyakh // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal). 2017. S. 50–58.

5. Md Raziun Bin Mamtaz. Measurement of Fracture Toughness of Polymethyl Methacrylate (PMMA). Technical Report. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, 2016. 20 p.

6. Stukhlyak P.D., Buketov A.V., Panin S.V., Marushchak P.O., Moroz K.M., Poltaranin M.A., Vukherer T., Kornienko L.A., Lyukshin B.A. Strukturnye urovni razrusheniya epoksidnykh kompozitnykh materialov pri udarnom nagruzhenii // Fizicheskaya mezomekhanika. 2014. Т. 17(2). S.65–83. doi: 10.24411/1683-805X-2014-00057.

7. Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Boytsov E.A., Khlebnikov V.V. Kinetika formirovaniya otpechatka i mikromekhanizmy plasticheskoy deformatsii pri dinamicheskom mikro- i nanoindentirovani stупenchatonarastayushchey nagruzkoj // XV Peterburgskie chteniya po problemam prochnosti. Sankt-Peterburg, 12–14 aprelya 2005 g.: Sbornik tezisov. SPb., 2005. S.54.

8. Petrov V.N., Lepov V.V. Kriterii otsenki treshchinostoykosti konstruktivnykh materialov // Metallurgiya mashinostroeniya. 2011. 6. S.12–14.

9. Petrov V.N., Lepov V.V., Semenov Kh.N., Larionov V.P. Energeticheskiy kriteriy razrusheniya polimernykh materialov dlya sluchaya kombinirovannogo statiko-dinamicheskogo nagruzheniya // Fizicheskaya mezomekhanika. 2002. 4(5). S.67–72.

10. Bartenev G.M. Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov. М.: Khimiya, 1984. 280 с.

11. Kireenko O.F., Leksovskiy A.M., Regel' V.R. Fraktograficheskiy metod opredeleniya usloviy perekhoda k khrupkomu razrusheniyu v polimerakh // Problemy prochnosti. 1972. 7. S.60–63.

12. Gol'dshteyn R.V., Osipenko N.M. Razrushenie i formirovanie struktury // Dokl. AN SSSR. 1978. 4(240). S.829–832.

13. Gol'dshteyn R.V., Osipenko N.M. Struktury i protsessy razrusheniya gornyx porod // Postroenie modeley razvitiya seysmicheskogo protsesssa i predvestnikov zemletryaseniya. Vyp. 1. М., 1993. S. 21–37.

14. Lepov V.V., Achikasova V.S., Ivanova A.A., Lepova K.Ya. Strukturnyy podkhod k mnogomasshtabnomu modelirovaniyu evolyutsionnykh protsessov v materialakh s vnutrenney mikrostrukturoy // Nauka i obrazovanie. 2015. №4. S. 82–87.

15. Ayatollahi M.R., Razavi S.M.J., Moghaddam M. Rashidi, Berto F. Mode I fracture analysis of polymethylmethacrylate using modified energy-based models // Fizicheskaya mezomekhanika. 2015. Т. 18, № 5. P. 53–62. doi: 10.24411/1683-805X-2015-00053.

Поступила в редакцию 09.01.2019

Принята к публикации 27.02.2019

Об авторах

ПЕТРОВ Виктор Николаевич, научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0002-2779-4088>, v_n_petrov@iptpn.ysn.ru;
ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, wisecold@mail.ru.

About the authors

PETROV Viktor Nikolaevich, Researcher, Larionov Institute of the Physical-Technical problems of the North SB RAS, 1, Oktyabrskaya st., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-2779-4088>, v_n_petrov@iptpn.ysn.ru.
LEPOV Valeriy Valer'evich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Larionov Institute of the Physical-Technical problems of the North SB RAS, 1, Oktyabrskaya st., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, wisecold@mail.ru.

Информация для цитирования:

Петров В.Н., Лепов В.В. Физическая модель роста хрупкой трещины при динамическом воздействии на статически нагруженный образец с надрезом // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24, № 1. С. 116–122. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-116-122>.

Citation:

Petrov V.N., Lepov V.V. Physical Modeling of Brittle Crack Growth for dynamic impact on one-edge tension specimen // Arctic and Subarctic natural resources. 2019. V. 24, no. 1. P. 116–122. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-116-122>.