

05 Нагружение, деформирование и разрушение цилиндрических образцов из полиметилметакрилата и фторопласта с использованием электрического взрыва проводников

© В.А. Морозов, В.И. Богатко, С.А. Атрошенко, В.М. Кац, А.Р. Газизуллина

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: v.morozov@spbu.ru

Поступило в Редакцию 21 июня 2019 г.
В окончательной редакции 21 июня 2019 г.
Принято к публикации 7 сентября 2019 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований нагружения, деформирования и разрушения цилиндрических образцов из полиметилметакрилата и фторопласта с помощью электрического взрыва проводников при различных скоростях нагружения. Проведен анализ распространения цилиндрических волн напряжения в образцах, который увязан с образованием и эволюцией трещин. На основе фрактографического анализа поверхностей разрушения проведено сравнение механизмов разрушения и выявлены особенности главных деформационных процессов.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, разрушение, волны.

DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48815.246-19

Введение

В настоящее время большой интерес вызывают процессы высокоскоростного нагружения, деформирования и разрушения различных материалов. Несмотря на большое многообразие методов высокоскоростного деформирования материалов, особое внимание привлекают электрофизические методы, в частности, основанные на электрическом взрыве проводников (ЭВП) [1,2]. Экспериментальные исследования с помощью данного метода позволяют получить надежные данные о напряженно-деформированном состоянии материалов при высоких скоростях деформирования. Это дает возможность лучшего понимания механизмов высокоскоростного деформирования и разрушения материалов и их моделирования. На сегодняшний день опубликован ряд работ [3–6], в которых представлен анализ характеристик разрушения материалов из полиметилметакрилата (ПММА) и фторопласта при различных скоростях нагружения. Однако для детального понимания процессов высокоскоростного разрушения таких материалов необходимо более подробно исследовать процесс образования трещин, а также микроскопический рельеф разрушенной поверхности материала, связав процессы разрушения с прохождением ударной волны внутри образца.

Целью настоящей работы является выявление и анализ механизмов разрушения полимерных материалов из ПММА и фторопласта, нагружаемых с помощью электрического взрыва проводников, начиная с момента взрыва проводника. Также исследуется формирование трещин под воздействием цилиндрических ударных волн и распространение волн и трещин по материалу при разных скоростях нагружения.

Материалы и методика экспериментов

В качестве материалов исследования использовались цилиндрические образцы разного диаметра из ПММА и фторопласта. Нагружение образцов производилось посредством электрического взрыва проводника, размещенного внутри образца вдоль его оси, при скоростях деформации $(10^4 - 10^5) \text{ s}^{-1}$. Эксперименты проводились на генераторе коротких высоковольтных импульсов, формирующем электрические напряжения с амплитудами $(10 - 300) \text{ kV}$ с использованием двух электрических схем: низковольтной $(10 - 24) \text{ kV}$ (рис. 1, *a*) и высоковольтной $(100 - 300) \text{ kV}$ (рис. 1, *b*).

Отметим, что при низковольтной (традиционной) схеме нагружения конденсатор разряжался непосредственно на взрываемый проводник. В электрической цепи возникали затухающие колебания тока с периодом $\sim 7.5 \mu\text{s}$ или реализовывался апериодический режим затухания. При высоковольтной схеме нагружения, принципиально отличной от низковольтной схемы, на взрываемый проводник подавался уже сформированный высоковольтный импульс напряжения длительностью $\sim 100 \text{ ns}$. В этом случае в электрической цепи возникали затухающие колебания тока с периодом $\sim 1 \mu\text{s}$.

Во всех экспериментах при низковольтной схеме нагружения конденсатор заряжался до напряжения 20 kV , а при высоковольтной схеме нагружения амплитуда высоковольтного импульса составляла 170 kV .

В методике взрыва проводника в центр образца цилиндрической формы помещается проводник, который после прохождения по нему электрического тока от зарядного устройства взрывается и испаряется. При этом энергия расширяющейся плазмы передается образцу, в котором

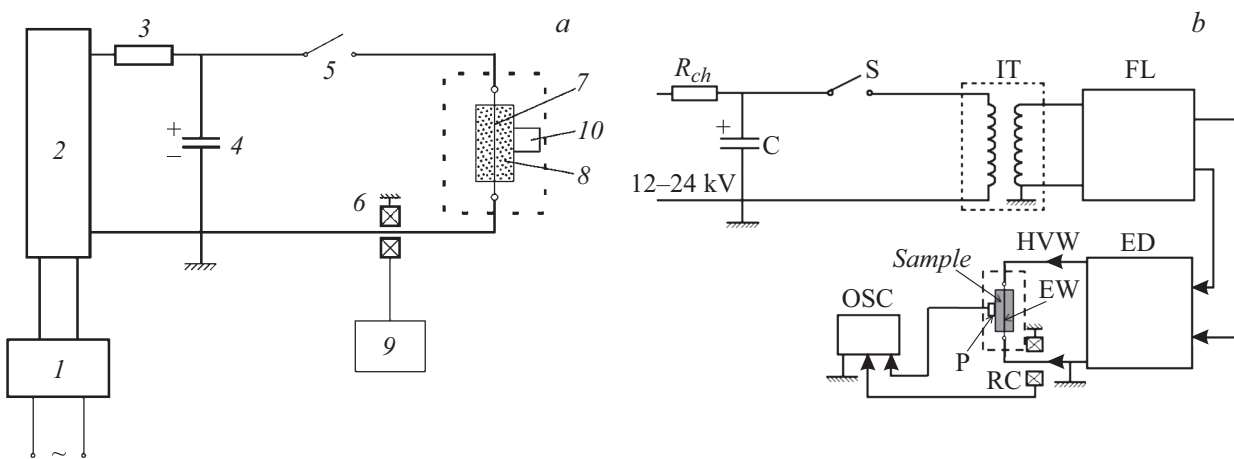


Рис. 1. *a* — низковольтная схема нагружения: 1 — автотрансформатор, 2 — выпрямитель, 3 — зарядное сопротивление, 4 — конденсатор, 5 — разрядник, 6 — пояс Роговского, 7 — взрываемый проводник, 8 — образец, 9 — осциллограф, 10 — пьезодатчик; *b* — высоковольтная схема нагружения: R_{ch} — зарядное сопротивление, C — конденсатор, S — разрядник, ИТ — импульсный трансформатор, FL — формирующая линия, ED — выходное устройство, HVW — высоковольтный электрод, EW — взрываемый проводник, Sample — образец, P — пьезодатчик, RC — пояс Роговского, OSC — осциллограф.

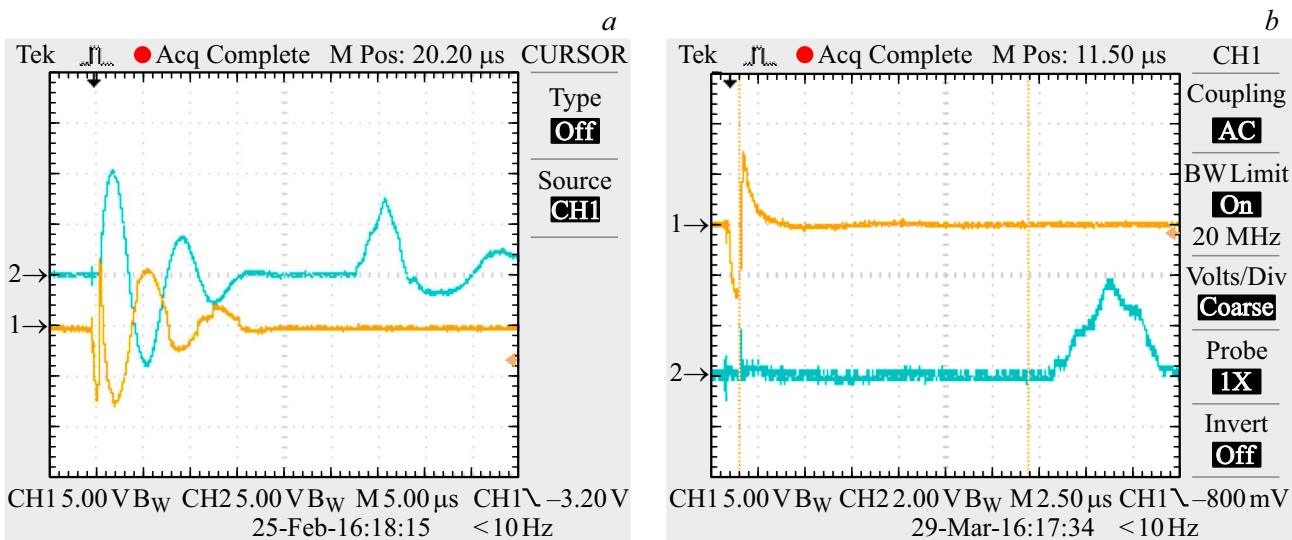


Рис. 2. Осциллограммы тока, протекающего по взрываемому проводнику (1), и радиального давления (2) при низковольтной схеме нагружения образцов из фторопласта (*a*) и ПММА (*b*).

формируется цилиндрическая ударная волна. В испытуемых образцах генерировались импульсы давления, распространяющиеся от взрываемого проводника по радиусу до поверхности образца. Их длительность определяется как периодом возбуждаемого тока в проводнике, так и материалом образца. На низковольтной установке в образцах из ПММА генерировались импульсы давления длительностью $\sim 3 \mu s$, в образцах из фторопласта — $2.5-3 \mu s$. На высоковольтной установке наблюдались импульсы давления длительностью $1-1.5 \mu s$ в ПММА и $3-5 \mu s$ — во фторопласте. Характерные осциллограммы импульсов приведены на рис. 2 и 3.

В качестве взрываемого проводника использовалась медная проволочка диаметром $75 \mu m$, которая вставля-

лась в осевое отверстие диаметром (1–2) mm цилиндрического образца. При низковольтной схеме нагружения диаметр образца из фторопласта составлял 10–68 mm, а при высоковольтной — 12–20 mm. Диаметры образцов из ПММА были соответственно: 14–103 mm при низковольтной схеме нагружения и 32.5–52 mm при высоковольтной схеме нагружения. Длина цилиндрических образцов определялась длиной взрываемого проводника и составляла ~ 30 mm.

Результаты экспериментов и их анализ

В экспериментах проводилось измерение профилей импульсов радиального давления в цилиндрических об-

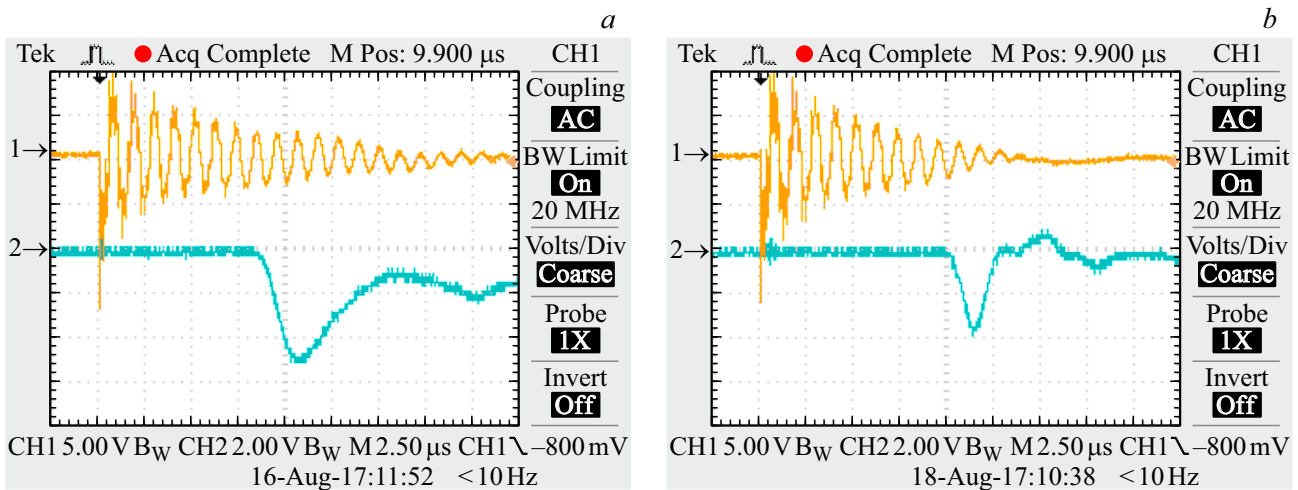


Рис. 3. Осциллограммы тока, протекающего по взрываемому проводнику (1), и радиального давления (2) при высоковольтной схеме нагружения образцов из фторопласта (a) и ПММА (b).

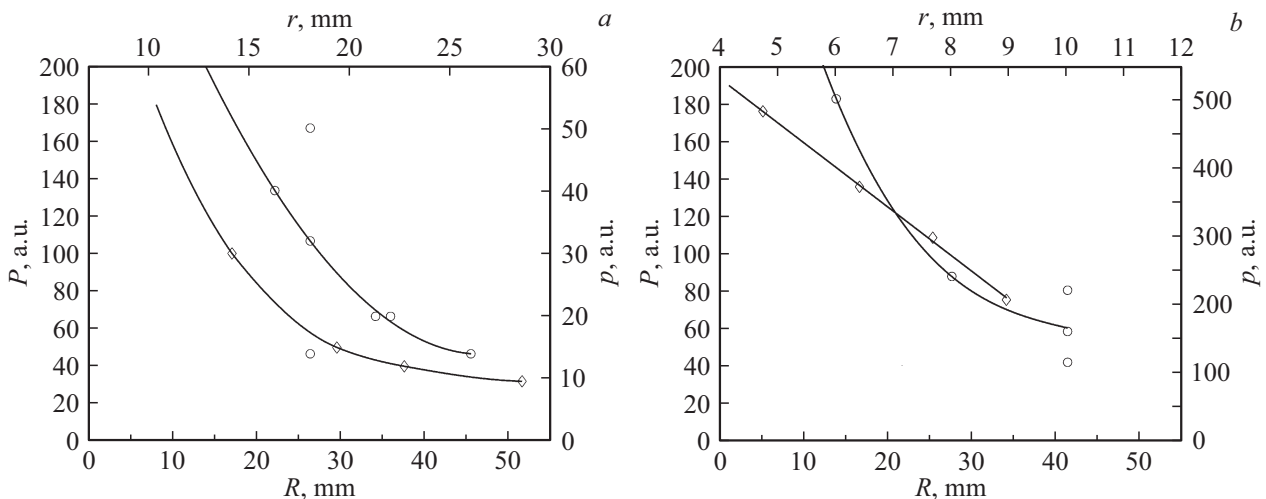


Рис. 4. Зависимость амплитуды радиального давления от радиуса в образцах ПММА (a) и фторопласта (b); $P(R)$, \diamond — для низковольтной и $p(r)$, \circ — для высоковольтной схем нагружения.

разцах различных диаметров с помощью специально разработанного широкополосного пьезодатчика на основе пьезокерамики из иодата лития. На рис. 4 представлены графики зависимости амплитуды импульсов радиального давления от радиуса образца.

В образцах из ПММА затухание амплитуды импульса радиального давления с увеличением радиуса образца идет более быстро при кратковременном нагружении по сравнению с более длительным нагружением. Во фторопласте существенно медленно затухает амплитуда давления с увеличением радиуса образца по сравнению с ПММА при более длительном нагружении и более быстро при кратковременном нагружении, но примерно одинаково в сравнении с затуханием в ПММА. Отмеченные факты можно объяснить разными физико-механическими характеристиками исследуемых матери-

алов, а также разницей в длительностях возбуждаемых импульсов давления в материалах образцов.

На образцах из ПММА хорошо видна система трещин (рис. 5, a), радиально расходящихся от канала взрыва проводника, причем сразу по всей длине канала по плоскостям, перпендикулярным торцевым поверхностям образцов. При этом в зависимости от диаметра образцы могут разрушаться на два фрагмента и более. Раскалыванию на части подвержены образцы малого диаметра по той причине, что по мере увеличения диаметра образца радиальное давление уменьшается, и образцы большего диаметра не разделяется на части.

Совершенно иначе развиваются трещины во фторопласте. Вначале образуется сетка коротких трещин, начинающихся на поверхности канала взрыва проводника и направленных вдоль канала. Затем эти трещины

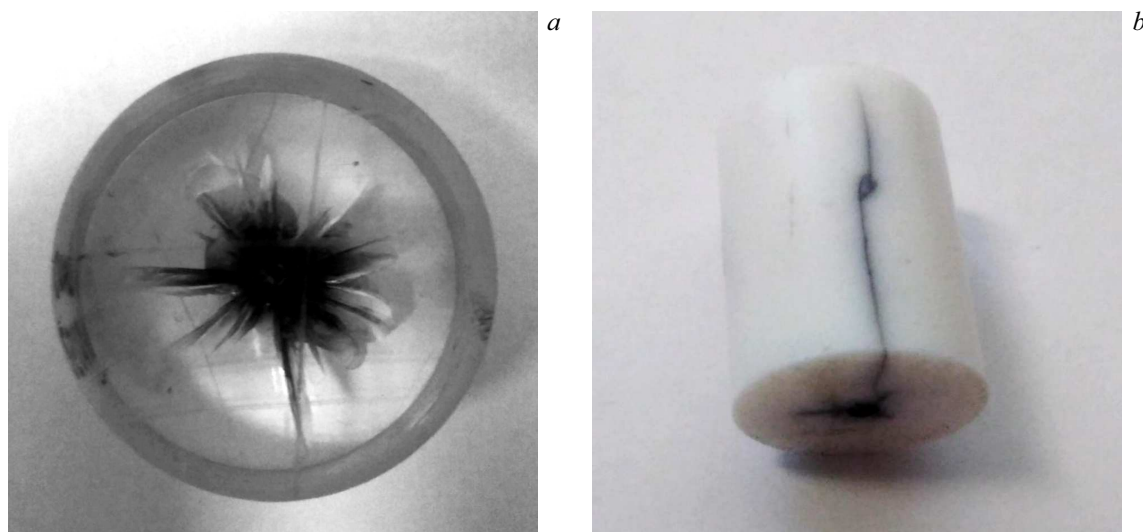


Рис. 5. Фотографии разрушения образцов из ПММА (а) и фторопласта (b).

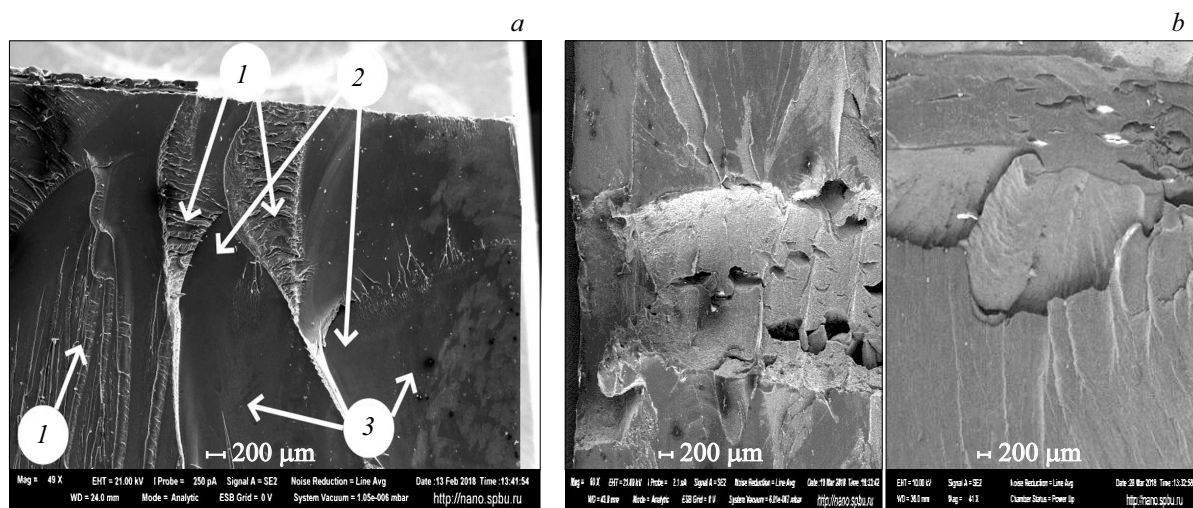


Рис. 6. а — области разрушения образцов из ПММА от канала плавления до свободной поверхности вдоль радиуса: 1 — области повышенной шероховатости, 2 — зеркальные области, 3 — области геометрических фигур; б — области разрушения образцов из фторопласта вдоль диаметра.

прорастают до поверхности образца. Трещины могут сливаться, образуя магистральные трещины (рис. 5, б), которые приводят к разрушению образца на части. Данные наблюдения подтверждаются представленными ниже результатами проведенного нами фрактографического анализа (рис. 6).

В образующиеся трещины как в образцах из ПММА, так и из фторопласта устремляется горячий газ от взорванного проводника. Так как ПММА менее термостоек по сравнению с фторопластом, на поверхностях его разрушения наблюдаются следы оплавления.

Отмеченные факты говорят о том, что рассматриваемая задача является достаточно сложной. Она включает в себя при полном рассмотрении как элементы теории

упругости, так и термодинамики, гидродинамики и электродинамики.

Был проведен фрактографический анализ разрушенных образцов, на основе которого проведено сравнение механизмов разрушения. Особенности поверхностей разрушения отражают главные деформационные процессы, на которые расходуется энергия разрушения. Поверхности разрушенных материалов исследовались на сканирующем электронном микроскопе Междисциплинарного Ресурсного Центра „Нанотехнологии“ СПбГУ.

При распространении трещины в ПММА от поверхности нагружения до свободной поверхности наблюдаются наличие участков повышенной шероховатости и зеркальных областей (рис. 6, а). Процесс продвижения трещины в

зеркальной зоне, соответствующей медленной скорости продвижения, требует относительно небольшой энергии, чем более шероховата поверхность разрушения, тем более высокая энергия затрачивается на распространение трещин. За этими двумя областями наблюдается небольшой участок, содержащий ряд геометрических фигур, похожих главным образом на параболы и гиперболы, которые активируются распространяющейся волной напряжения, что обуславливает значительное поглощение энергии в этой области.

На рис. 6, *b* представлена область разрушения образца из фторопласта вдоль диаметра (слева направо). На поверхности канала взрыва наблюдается сетка коротких трещин, которые прорастают до поверхности образца. Видно, что фрактограммы разрушения образцов из фторопласта отличаются от вида разрушения в ПММА. На поверхности разрушения имеются зеркальная и шероховатая области, однако в отличие от образцов из ПММА отсутствуют области, напоминающие параболы, что свидетельствует о том, что на разрушение фторопласта расходуется меньшая энергия, чем на разрушение образца из ПММА. Данное обстоятельство подтверждается более медленным затуханием амплитуды радиального давления во фторопласте по сравнению с ПММА.

Заключение

По результатам проделанных экспериментов и анализа полученных данных могут быть сделаны следующие выводы.

1. В образцах из ПММА затухание амплитуды импульса радиального давления с увеличением радиуса образца идет более быстро при кратковременном нагружении по сравнению с более длительным нагружением. Во фторопласте существенно медленнее затухает амплитуда давления с увеличением радиуса образца по сравнению с ПММА при более длительном нагружении и более быстро при кратковременном нагружении, но примерно одинаково в сравнении с затуханием в ПММА.

2. На образцах из ПММА трещины радиально расходятся от канала взрыва проводника, причем сразу по всей длине канала по плоскостям, перпендикулярным торцевым поверхностям образцов. При этом в зависимости от диаметра образца они могут разрушаться на два и более фрагментов. Раскалыванию на части подвержены образцы малого диаметра по той причине, что по мере увеличения диаметра образца радиальное давление уменьшается, и образцы большего диаметра не разделяются на части.

3. Во фторопласте трещины развиваются совершенно иначе по сравнению с ПММА. Вначале образуется сетка коротких трещин, начинающихся на поверхности канала взрыва проводника и направленных вдоль канала. Затем эти трещины прорастают до поверхности образца. Трещины могут сливаться, образуя магистральные

трещины, которые приводят к разрушению образца на части.

4. Порог хрупкого разрушения ПММА возрастает при уменьшении длительности импульса от 3.5 до 1.5 μs , что подтверждается более успешным разрушением образцов одного и того же диаметра при низковольтной схеме взрыва (длительность импульса 3.5 μs), чем при высоковольтной (1.5 μs).

5. При укорочении импульса нагрузки доля вязкой составляющей в изломе уменьшается, и образцы разрушаются более хрупко.

Благодарности

Микроскопические исследования были выполнены на оборудовании Междисциплинарного ресурсного центра по направлению „Нанотехнологии“ СПбГУ (<http://nano.spbu.ru/>), проект № 115-9004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Imbert J., Rahmaan T., Worswick M.* // 11th Intern. Conf. on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, DYMAT 2015. Lugano, Switzerland, September 7–11, 2015. EPJ Web of Conferences. Vol. 94. 2015. P. 01048.
- [2] *Morozov V.A., Lukin A.A.* et al. // 21st European Conference on Fracture, ECF21. Catania, Italy, June 20–24, 2016. Procedia Structural Integrity. Vol. 2. 2016. P. 1002–1006.
- [3] *Fracture Processes in Polymeric Solids: Phenomena and Theory* / ed. B. Rosen. NY.: Interscience Publishers, 1964. 835 p.
- [4] *Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров А.Ю.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 2. С. 52–58. [*Atroshenko S.A., Krivosheev S.I., Petrov A.Yu.* // Tech. Phys. 2002. Vol. 47. N 2. P. 194–199.]
- [5] *Morozov V.A., Atroshenko S., Kats V.M.* // XXVII International Conference „Mathematical and Computer Simulations in Mechanics of Solids and Structures“. Fundamentals of Static and Dynamic Fracture (MCM 2017). Procedia Structural Integrity 2017. N 6. P. 154–160.
- [6] *Атрошенко С.А., Морозов В.А., Кац В.М.* // Физико-химические аспекты предельных состояний и структурных превращений в сплошных средах, материалах и технических системах: Вып.2 / Под общ. ред. чл.-корр. РАН Ю.В. Петрова СПб.: Политехника, 2018. С. 58–65.