



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2015

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.03

УДК 539.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМОДЕЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИК ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

И.А. Банникова, С.В. Уваров, О.Б. Наймарк

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 12 мая 2015 г.

Принята: 17 июля 2015 г.

Опубликована: 30 сентября 2015 г.

Ключевые слова:

электровзрыв проводника, керамика, фрагментация, автомодельные закономерности, экспоненциальный и степенной законы распределения, VISAR

АННОТАЦИЯ

Исследуются статистические закономерности фрагментации керамических трубчатых образцов при динамическом нагружении, инициированном электрическим взрывом проводника (ЭВП), расположенным вдоль оси образца, погруженного в жидкость (дистиллированная вода). Амплитуда импульсного нагружения образцов в установке ЭВП регулировалась изменением энергии на емкостной батарее. Длительность разряда составляла 0,3–0,8 мкс. Фрагменты разрушенного образца собирались для дальнейшего анализа. Масса собранных фрагментов в среднем составляла 98 % от массы исходного образца. Размеры (масса) фрагментов разрушенного образца определялись двумя методами: «взвешивания» и «фотографии». Результаты, полученные обоими методами, хорошо согласуются. Фрагменты можно разделить на два класса: квазидвумерные (2D), для которых характерный размер фрагмента d^* больше или равен толщине стенки трубки d , и трехмерные (3D), для которых характерный размер меньше толщины стенки. Обнаружено, что статистика распределения 3D-фрагментов описывается степенным законом распределения, где значение степени оставалось постоянным и не зависело от удельной энергии разрушения. В то же время распределение 2D-фрагментов описывалось экспоненциальной функцией. Показано, что точка излома в распределениях фрагментов смещается в сторону меньших масштабов с увеличением удельной энергии. Обосновывается предположение о существовании двух типов распределений: для фрагментов различных масштабов (экспоненциального и степенного) и характерного значения удельной энергии для образцов с отношением толщины трубки к внутреннему радиусу, меньшему единицы.

© ПНИПУ

© Банникова Ирина Анатольевна – инженер-исследователь, e-mail: malgacheva@icmm.ru
Уваров Сергей Витальевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: usv@icmm.ru
Наймарк Олег Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: naimark@icmm.ru

Irina A. Bannikova – Research Engineer, e-mail: malgacheva@icmm.ru
Sergey V. Uvarov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, e-mail: usv@icmm.ru
Oleg B. Naimark – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: naimark@icmm.ru

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SELF-REGULARITIES OF CERAMICS FRACTURE UNDER SHOCK WAVE LOADING

I.A. Bannikova, S.V. Uvarov, O.B. Naimark

Institute of Continuous Media Mechanics of the Russian Academy of Sciences of Ural Branch,
Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 May 2015
Accepted: 17 July 2015
Published: 30 September 2015

Keywords:

electrical wire explosion,
alumina tube, fragmentation,
self-similarity, exponential
and power law distribution,
VISAR

ABSTRACT

A series of UEWE (underwater electrical wire explosion) experiments were carried out to study the fragmentation of ceramic tubes under shock wave (SW) loading caused by explosion of the axial conductor. The amplitude of shock wave loading of the samples in the UEWE setup was regulated by varying the energy of the battery of capacitors charged by high voltage source. Duration of the discharge was 0,3–0,8 μ s. The statistical distribution of the tube fragments was determined by gathering fragments from the bottom of the explosion chamber. The mass of the collected fragments was about 98 % of the mass of the original sample. The size of fragments estimated by two methods is “weighing” and “photography”. The “photography” method was based on the form factor of fragments, which was calculated separately. The distributions obtained by both techniques were in good agreement. Since the mass of the tubes was varied, the parameter of the specific energy of the loading pulse was introduced in order to correlate the data. The collected fragments can be divided into two classes: quasi-two dimensional objects (2D) with characteristic fragment size d^* is greater or equal to the thickness d of the tube wall and three-dimensional (3D) with characteristic size less than the wall thickness. It was found that the distribution of the 3D objects could be described by a power law, in which the value of the power remains constant and does not depend on the specific energy. Distribution of the 2D fragments obeys an exponential law. It is shown that the inflection point of the fragment distribution curve is shifted toward smaller scales with increasing of the specific energy. The existence of different distributions for the different scale of the fragments is explained.

© PNRPU

Введение

Статистические закономерности процесса фрагментации являются предметом устойчивого интереса в связи с изучением фундаментальных аспектов разрушения материалов в широком диапазоне интенсивностей нагружения [1–4]. Известны различные экспериментальные постановки при изучении процесса фрагментации: разрушение оболочек [5, 6], длинных стержней [7], пластин [8].

Считается [3], что исследование фрагментации как отдельное направление механики разрушения сформировалось после работ Мотта [9, 10] по изучению фрагментации оболочек под воздействием ВВ в 40-х годах XX века. Процесс фрагментации рассматривался в одномерной постановке при радиальном растяжении кольца с постоянной скоростью u , обеспечивающей деформацию (u/r) , где r – внутренний радиус кольца (рис. 1). Предполагалось, что разрушение кольца происходило мгновенно и случайным образом в очагах разрушения 1, и, как следствие, возникали волны Мотта 2, которые распространялись в неразрушенные части образца 3, образуя разгруженные области 4. Исходное кольцо разбивалось на N_0^* единичных сегментов, а количество неповрежденных сегментов N^* при заданной деформации ε задавалось соотношением вида

$$N^* = N_0^* \cdot e^{-\int \lambda(\varepsilon) d\varepsilon}.$$

В статистической теории надежности функция $\lambda(\varepsilon)$ известна как функция риска [3].

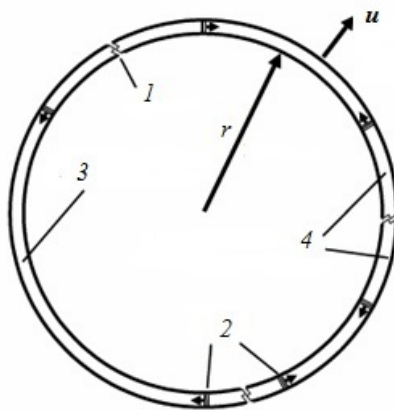


Рис. 1. Модель фрагментации Мотта [3, 10]: 1 – очаг разрушения; 2 – волны Мотта; 3 – область растяжения при постоянной скорости деформации; 4 – разгруженная область после прохождения волны Мотта

В развитие работ по изучению пространственно-временной статистики фрагментации при нагружении цилиндрических образцов из стекла и керамик [2, 4, 11, 12] в настоящей работе проведен анализ статистических закономерностей распределений фрагментов по размерам (массе) для трубчатых образцов из оксида алюминия в режиме быстрого электровзрыва проводника [13, 14], рассмотрено, как влияет удельная энергия на вид распределений фрагментов. Кроме того, с использованием профилей скорости свободной поверхности, полученных интерференционной системой VISAR [15], описан процесс трещинообразования и фрагментации трубчатых образцов в дистиллированной воде.

1. Экспериментальная установка.

Методология экспериментального исследования

Установка по фрагментации трубчатых цилиндрических образцов методом электровзрыва проводника (ЭВП) [15] представляет собой толстостенную цилиндрическую камеру 1 из ПММА, заполненную дистиллированной водой (рис. 2, а), в центре которой вертикально устанавливался полый цилиндрический образец (рис. 2, б) из керамики Al_2O_3 плотностью $2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ с коаксиальным медным проводником. Высота образца h варьировалась $\sim 12,7\text{--}16,7$ мм, внешний d_1 и внутренний диаметр d_2 трубки равнялись 11,8 и 7,8 мм, соответственно. Толщина трубки d вычислялась как $d = (r_1 - r_2) = 2$ мм, где r_1 и r_2 – внешний и внутренний радиусы.

Образец нагружался ударной волной, инициируемой электрическим взрывом проводника в результате разряда батареи конденсаторов 3 емкостью 0,022–0,44 мкФ, заряженной до напряжения 5–16 кВ источником «БПЗ-2Л» 4 (рис. 2). Длительность разряда составляла порядка 0,3 мкс. При этом этапы плавления и испарения проводника занимали значительно меньшее время, составляющее 50–100 нс [16]. С помощью осциллографа «АКИП-4113А» 5 регистрировались электрическое напряжение и ток через проводник [17]. Профили скорости свободной поверхности регистрировались системой VISAR (Tektronix DPO 7254 Digital Phosphor Oscilloscope, 8, VISAR Martin Froeschner & Associates Optoelectronics FDVI Mark IV-3000, 9) с использованием оптоволоконного датчика (см. рис. 2, б), на торец которого крепилась тонкая пленка с алюминиевым напылением (зеркало-отражатель), которая частично пропускала ИК-излучение [15].

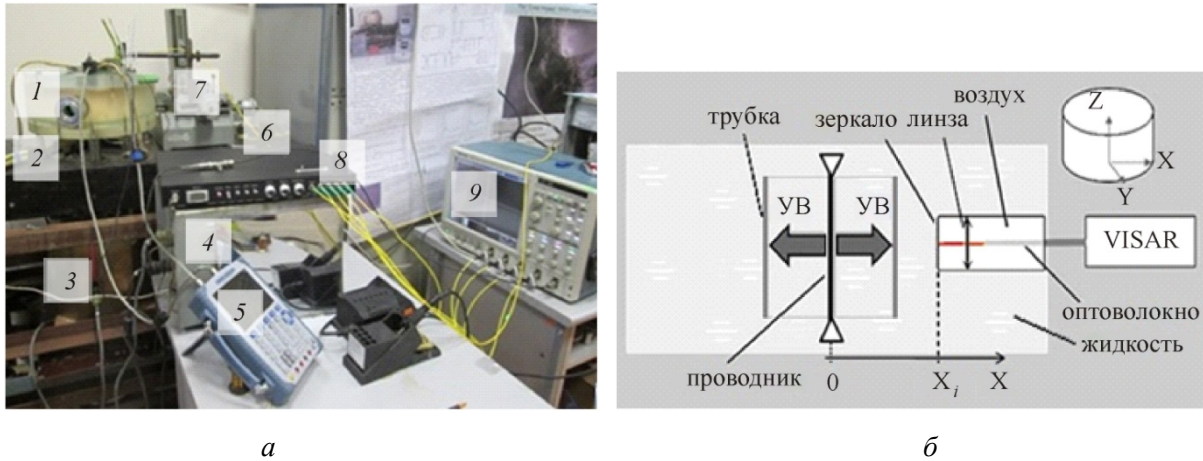


Рис. 2. Экспериментальная установка ЭВП и регистрационная система VISAR (а): 1 – цилиндрическая камера; 2 – заземление; 3 – батарея конденсаторов; 4 – источник высокого напряжения; 5 – двухканальный осциллограф; 6 – оптоволоконно для регистрации сигналов в жидкости; 7 – устройство для определения расстояния между местом инициирования взрыва и «зеркалом»; 8, 9 – интерференционная система VISAR; схема измерения скорости свободной поверхности (б): зеркало-пленка с алюминиевым напылением

Параметры нагружающей волны сжатия, проходящей через керамический образец, определялись по данным измерения скорости свободной поверхности, регистрируемой доплеровским интерферометром VISAR (см. рис. 2) на заданном удалении от места инициирования взрыва коаксиального проводника. На рис. 3 область, отмеченная I, соответствует электромагнитному импульсу, возникающему во время разряда [15]. Вторая часть сигнала II соответствует приходу волны сжатия при электровзрыве в воде без образца 1 и при наличии керамического образца 2. По разнице амплитуд можно оценить диссипацию энергии в образце.

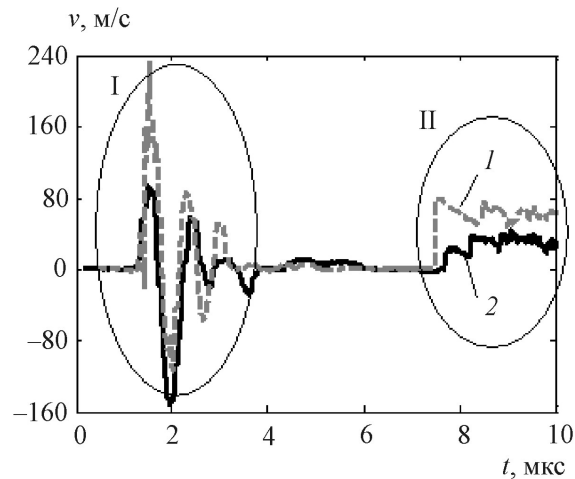


Рис. 3. Профиль скорости свободной поверхности (часть II): 1 – профиль получен в дистиллированной воде [15]: $X = 10$ мм, емкость конденсаторной батареи $C = 0,088$ мкФ, электрическое напряжение на источнике питания $U_{\max} = 15$ кВ, энергия на конденсаторной батарее $W_C = 9,9$ Дж, время между первым (I) и вторым (II) импульсами на профиле скорости: $\Delta t = 6,2$ мкс; 2 – профиль получен в дистиллированной воде при разрушении керамической трубки № 20 электровзрывом коаксиального проводника: $C = 0,44$ мкФ, $U_{\max} = 9$ кВ, $W_C = 17,82$ Дж, $X = 12,45$ мм, $\Delta t = 6,2$ мкс, $D = 1920$ м/с, время между ступенями: $\Delta t_1 = 0,52$ мкс, $\Delta t_2 = 0,59$ мкс

Особенностью сигнала 2 по сравнению с профилем ЭВП в жидкости без керамического образца 1 (см. рис. 3) является увеличение амплитуды сигнала, что объясняется повторным воздействием волны сжатия, отраженной от внутренней поверхности керамического образца либо от откольной поверхности, сформированной в толщине стенки образца. На профилях скорости свободной поверхности, полученных на расстоянии 6,5 мм (см. рис. 3, 2) и 3 мм (рис. 4) от внешней поверхности образца, формирование повторного импульса (хорошо видно на рис. 4, где отмечены (II) и (III)) связано с различием акустического импеданса (более чем на порядок) для воды и керамики:

$$1,45 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \text{ (вода)}, \quad 2,6 \cdot 10^7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \text{ (керамика)}.$$

Волновой импульс, достигнув внутренней стенки трубки, частично отражался и распространялся к месту инициирования, и при повторном отражении приводил к «эффекту догрузки». Данные эксперимента (время прохождения волны $\Delta t_1 = 0,563$ мкс (см. рис. 4), толщина трубки ~ 2 мм и расстояние от места инициирования взрыва до внутренней стенки трубки, равное 3,9 мм) позволили оценить скорость звука в керамике ~ 10480 м/с, которое соответствует значению продольной скорости волны в Al_2O_3 , $\sim 10^4$ м/с, измеренной в [18].

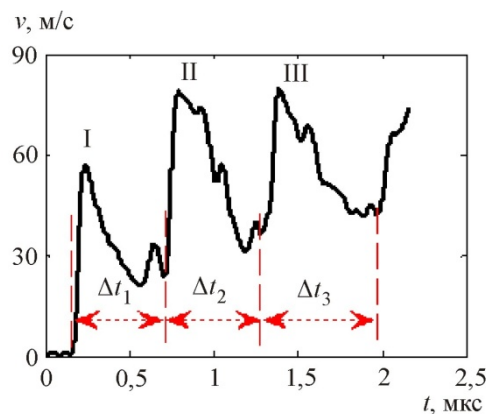


Рис. 4. Профиль скорости свободной поверхности: в дистиллированной воде вблизи керамической трубки № 18: $X = 8,9$ мм, $C_w = 0,44$ мкФ, $U_{\max} = 12$ кВ, $W_C = 31,68$ Дж, $\Delta t = 4,2$ мкс, $D = 2120$ м/с; интервалы времени между ступеньками: $\Delta t_1 = 0,563$ мкс, $\Delta t_2 = 0,558$ мкс, $\Delta t_3 = 0,663$ мкс

Средняя скорость волнового фронта D определялась по методике, описанной в [15], как отношение расстояния между местом инициации волны сжатия (взрыва проводника) к времени пробега волны сжатия Δt (см. рис. 3). Установлено, что с ростом удельной энергии w скорость волнового фронта D растет линейным образом (рис. 5). Скорость D в воде без керамического образца оставалась постоянной (~ 1470) на протяжении всех экспериментов [15]. Эта величина мало (1,4 %) отличалась от величины продольной скорости звука в воде (1450 м/с). Предполагалось, что ударная волна плоская, так как произведение длительности волнового импульса на скорость волнового фронта (0,3 мм) значительно меньше радиуса кривизны волнового фронта (от 4 до 12,5 мм).

В проведенной серии экспериментов удельная энергия определялась как отношение разности энергий, накопленной в конденсаторной батарее W_C и затраченной на плавление и испарение Q_w медного проводника, к значению массы цилиндрического образца M перед разрушением. Сопоставление с данными экспериментов, проводимых с иными усло-

виями нагружения, например, на стержне Гопкинсона-Кольского [4], показывает, что величина удельной энергии может быть завышена. В будущем планируется оценить удельную энергию по данным регистрации профиля падающей и прошедшей волн сжатия.

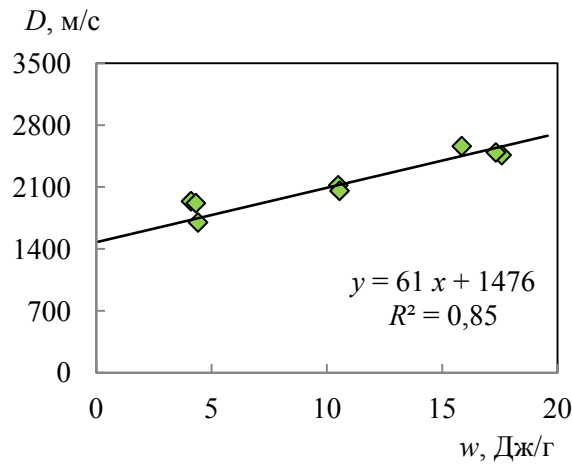


Рис. 5. Зависимость средней скорости волнового фронта от удельной энергии

Особенности фрагментации трубок в выбранном режиме нагружения

Под действием импульсного нагружения образец разрушался на 2D- и 3D-фрагменты. К первым относились фрагменты с характерным размером d^* , совпадающим с толщиной трубки d ; 3D-фрагменты имели размеры $d^* < d$. Осевшие на дно камеры фрагменты собирались для последующего анализа. Масса собранных фрагментов M_f составляла не менее 98 % массы исходного образца M , что обеспечивало по сравнению с известными экспериментальными постановками представительную статистическую выборку и качество анализа статистики фрагментации.

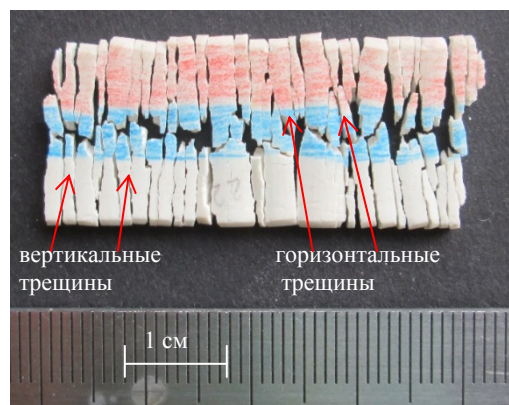


Рис. 6. Изображение восстановленной по фрагментам трубки в развернутом виде (образец № 22: высота $h = 15,8$ мм, масса $M = 2,5908$ г; общая масса фрагментов $M_f = 2,5853$ г, удельная энергия разрушения $w = 18,6$ Дж/г)

При малой удельной энергии w преобладали 2D-фрагменты, что позволило реконструировать картину фрагментации (рис. 6). Первыми зародились вертикальные трещины в результате радиального растяжения трубчатого образца. Затем образовались горизонтальные трещины (см. рис. 6, рис. 7, а). В ряде случаев наблюдались трещины, параллельные

лельные поверхности, в толще образца, которые связаны, по-видимому, с формированием откола внутри стенки образца (рис. 7, б). Подобное явление, в частности, отмечалось в работе [19] при исследовании морфологии разрушения металлических оболочек на волновой стадии. Тем не менее даже в этом случае видно, что поверхность трещин имеет развитый характер и предположение Мотта о том, что детализация механизма разрушения не важна для описания статистики фрагментации, нуждается в уточнении, так как механизм формирования и распространения трещин [20] оказывает существенное влияние на статистические особенности процесса фрагментации.

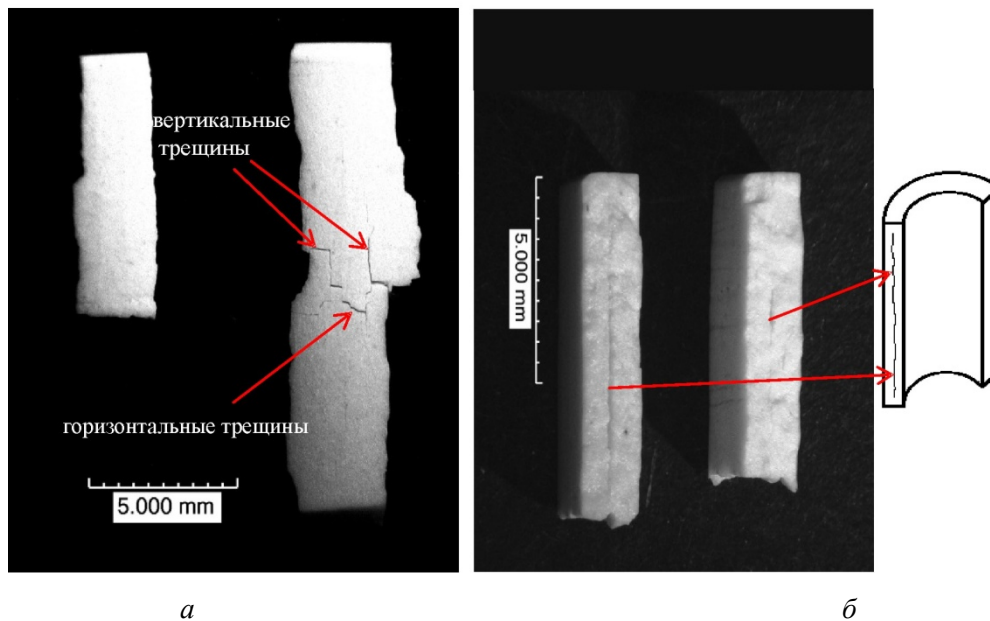


Рис. 7. Иллюстрации поверхности фрагментов, полученных на электронном оптическом микроскопе HIROX KH-7700: *а* – фрагменты образца № 20: высота $h = 15,4$ мм, массой $M = 2,5326$ г, масса фрагментов $M_f = 2,5309$ г; энергия на конденсаторной батарее $W_c = 18$ Дж; *б* – откол в толщине трубки № 21: высота $h = 16,1$ мм, масса $M = 2,6638$ г, масса фрагментов $M_f = 2,6605$ г; энергия на конденсаторной батарее $W_c = 18$ Дж

2. Анализ статистики распределений фрагментов

Исследование особенностей фрагментации включало анализ поведения материала в зависимости от величины энергетического воздействия вблизи так называемой «критической точки» [8, 21, 22], соответствующей переходу от дефектного материала к фрагментированному, и исследование статистики фрагментации вдали от «критической точки» в условиях значительных энергетических воздействий на материал. Задачи фрагментации представляют значительный фундаментальный и прикладной интерес, так как имеют отношение к поведению неравновесных «критических» систем, способность к диссипации энергии в которых определяется многомасштабными взаимодействиями, что характеризуется также качественными изменениями статистических закономерностей, обусловленных нелинейной динамикой системы [1, 4, 6, 7, 12, 23–25].

Исследование статистических закономерностей фрагментации основано на анализе распределения фрагментов по размерам (массе). Вид распределения зависит от ряда факторов и в первую очередь от величины энергии, затраченной на разрушение [22, 26, 27]; свойств материала (хрупкий или пластичный) [1, 5, 6]; размерности объекта (2-мерные –

пластина, стержень; 3-мерные) [23]. Обобщая экспериментальные результаты, можно выделить две группы распределений. Первая характеризуется функцией распределения, в выражение которой входит экспонента [5, 6, 7, 27, 28]; вторая – функцией распределения, описываемой на основе степенной зависимости [2, 3, 11, 23–27].

В настоящей работе масса фрагментов определялась двумя способами: методом «взвешивания» [4, 12] и методом «фотографии» [29, 30]. Во втором методе учитывался фактор формы [31], который вычислялся дополнительно для 3D-фрагментов [30]. Данные, полученные обоими методами, обнаружили хорошее согласование [29, 30].

Для сопоставления результатов статистики фрагментации керамических образцов при различных интенсивностях воздействия выбран параметр удельной энергии w . При анализе распределений $N(m)$ установлено существование точки излома, отражающей качественные изменения в статистике фрагментации. При увеличении удельной энергии w (рис. 8, а, направление стрелки 1) точка излома смещалась в сторону меньших масштабов (рис. 8, а, направление стрелки 2).

На рис. 8, б приведены результаты распределений фрагментов трубчатых образцов в безразмерных координатах в логарифмических осях. По оси ординат отложена величина, равная отношению количества фрагментов массой m , N_m к общему числу фрагментов N_f ; по оси абсцисс – приведенная масса, определяемая как отношение массы фрагмента m к массе всех фрагментов M_f . Зависимость в нормированных координатах соответствует степенному закону с коэффициентом смешанной корреляции $R^2 = 0,82$ (прерывистая линия):

$$\frac{N_m}{N_f} = 10^{-5} \left(\frac{m}{M_f} \right)^{-0,68}$$

Область распределения 2D-фрагментов ($d^* = d$) обведена эллипсом (I), область 3D-фрагментов ($d^* < d$) обозначена (II) (см. рис. 8, б).

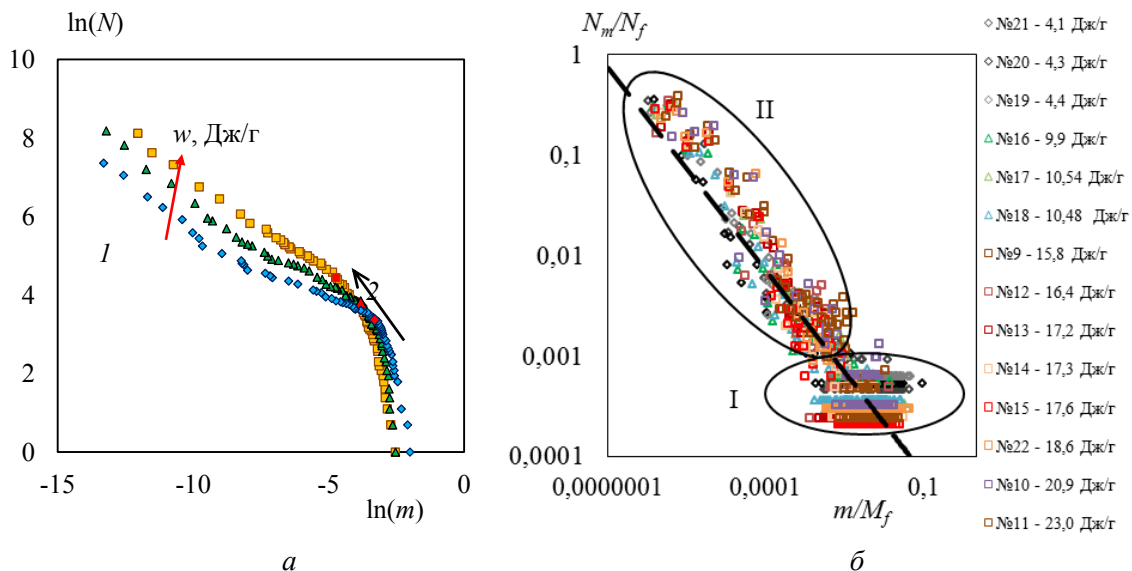


Рис. 8. Распределение количества фрагментов по размерам (массе) больше некоторого заданного в логарифмических координатах (а): \blacksquare – № 9: $w = 15,8$ Дж/г; \blacktriangle – № 16: $w = 9,9$ Дж/г; \blacklozenge – № 19: $w = 4,4$ Дж/г; интерпретация результатов в координатах «удельное количество фрагментов – безразмерная масса фрагмента» (б)

3. Обсуждение результатов

Анализ статистических закономерностей фрагментации в широком диапазоне интенсивностей импульсных воздействий показал, что распределение фрагментов оксид алюминиевых трубок с параметром $k < 1$, где k – отношение толщины трубки к внутреннему радиусу [29], описывается двумя законами распределения (см. рис. 9, кривая 1). Для распределения 3D-объектов с $d^* < d$ (рис. 9, кривая I, II) установлена степенная зависимость вида

$$N(m) = B' \cdot m^A,$$

где $A = -0,47 \pm 0,02$ – постоянная величина и не зависит от изменения удельной энергии w в отличие от величины B' , которая растет с увеличением w (см. рис. 8, а, стрелка 2), коэффициент смешанной корреляции $R^2 = 0,98$ [29]. Распределение 2D-фрагментов ($d^* = d$, рис. 9, кривая I, I) подчиняется экспоненциальному закону ($R^2 = 0,99$):

$$N(m) = B \cdot \exp(A' \cdot m),$$

где B увеличивается, а A' уменьшается с увеличением удельной энергии [29]. Анализ распределения числа фрагментов массой m , $N_m(m)$ при аппроксимации его функцией Вейбулла показал преобладание степенного множителя над экспоненциальным множителем [30]. Наблюдается тенденция распределения фрагментов $N(m)$ к степенному распределению при увеличении энергии разрушения образцов с $k < 1$ или к экспоненциальному распределению при разрушении толстостенных трубок с $k > 1$ [32]. Распределения для характерных экспериментов представлены на рис. 9 (кривые 2 и 3).

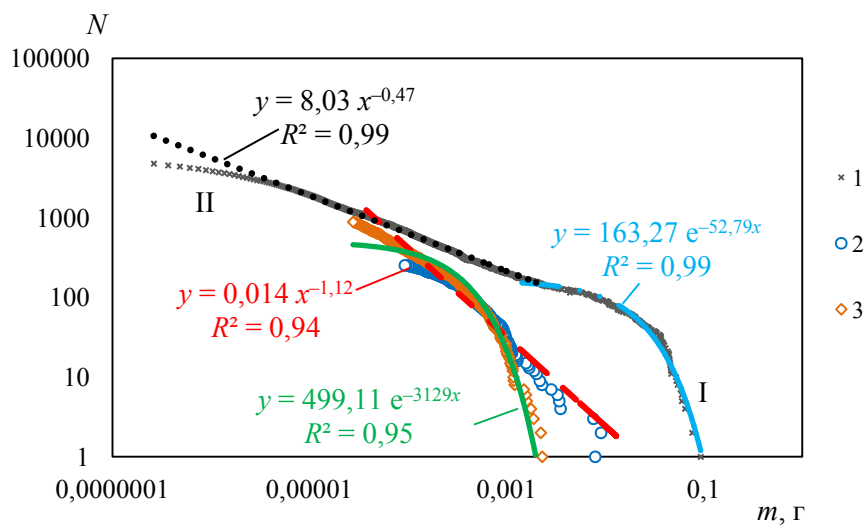


Рис. 9. Распределение фрагментов по массе в двойных логарифмических осях (таблица)

Параметры образцов с различными значениями k в условиях эксперимента

	w , Дж/г	d , мм	r_2 , мм	$k = d/r_2$
1	~ 18	2,0	3,9	~ 0,5 < 1
2	~ 200 [32]	0,5	1,0	0,5 < 1
3	~ 180 [32]	0,6	0,4	1,5 > 1

Заключение

Представлены результаты экспериментального исследования распределений фрагментов по размерам (массе) для трубчатых керамических образцов при различных значениях интенсивности импульсного нагружения, реализуемого в воде аксиальным электровзрывом проводника.

Можно выделить три механизма разрушения: образование откольной трещины в объеме образца, зарождение и распространение магистральных трещин, приводящие к образованию крупных 2D-фрагментов, а также ветвление трещин, приводящее к образованию 3D-фрагментов, распределение которых по массе описывается степенным законом. Установлено, что показатель степени не зависит от удельной энергии нагружения, при этом наблюдается увеличение количества фрагментов в целом и смещение точки излома в сторону меньших масштабов с ростом удельной энергии. Это хорошо согласуется с результатами исследования статистических закономерностей разрушения при динамическом распространении трещин [20].

Установленные закономерности изменения статистики фрагментации (объекты с $k < 1$) при увеличении интенсивности импульсного нагружения с преобладанием статистических распределений степенного типа позволяют предположить универсальный сценарий развития локализации поврежденности при зарождении областей разрушения, связанный с формированием многомасштабных автомодельных коллективных мод ансамблей дефектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01173).

Библиографический список

1. Meibom A., Balslev I. Composite power laws in shock fragmentation // *Physical Review Letters*. – 1996. – Vol. 76. – No. 14. – P. 2492–2494.
2. Katsuragi H., Ihara S., Honjo H. Explosive fragmentation of a thin ceramic tube using pulsed power // *Physical Review Letters*. – 2005. – Vol. 95(9), 095503. – P. 095503(1-4). DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.095503
3. Grady D. Fragmentation of rings and shells. – Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2006. Printed in Germany. – 374 p.
4. Давыдова М.М., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Пространственно-временная масштабная инвариантность при динамической фрагментации квазихрупких материалов // *Физ. мезомех.* – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 100–107.
5. Статистика осколков, образующихся при разрушении твердых тел взрывом / Э.А. Кошелев, В.М. Кузнецов, С.Т. Софронов, А.Г. Черников // *ПМТФ*. – 1971. – № 2. – С. 87–100.
6. Fragmentation of shells / F.K. Wittel, F. Kun, H.J. Herrmann, B.H. Kröplin // *Physical Review Letters*. – 2004. – Vol. 93. – No. 3. – P. 035504(1-4).
7. Ching Emily S.C., Lui S.L., Xia Ke-Qing. Energy dependence of impact fragmentation of long. Glass rods // *Physica A*. – 2000. – Vol. 287 – P. 83–90.
8. Katsuragi H., Sugino D., Honjo H. Crossover of weighted mean fragment mass scaling in two-dimensional brittle fragmentation // *Physical Review E*. – 2004. – Vol. 70(62), 065103. – P. 065103/1-065103/4. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.065103

9. Mott N.F. A theory of the fragmentation of shells and Bombs // Ministry of Supply. – 1943. – No. A.C.4035.
10. Mott N.F. Fragmentation of Shell Cases // Proc. Royal Soc. – 1947. – Vol. 189. – No. 1018. – P. 300–308. DOI: 10.1098/rspa.1947.0042
11. Davydova M., Uvarov S. Fractal laws for spatial and temporal variables of brittle fragmentation // Proceeding of the 19th European Conference on Fracture “Fracture Mechanics for Durability reliability and Safety”, Kazan, Russia, 26–31 August 2012. – Kazan, 2012. – (119). – (CD-ROM).
12. Davydova M., Uvarov S. Fractal statistics of brittle fragmentation // Fracture and Structural Integrity. – 2013. – Vol. 24. – P. 60–68. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.05.
13. Chace W.C. Exploding wires // Physics Today. – 1964. – Vol. 17. – No.8. – P. 19–24.
14. Образование страт при быстром электрическом взрыве цилиндрических проводников / В.И. Орешкин, К.В. Хищенко, П.Р. Левашов, А.Г. Русских, С.А. Чайковский // Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т. 50, № 5. – С. 625–637. DOI: 10.1134/S0018151X12050148
15. Экспериментальное исследование неньютоновских свойств воды в условиях электровзрывного нагружения / И.А. Банникова, С.В. Уваров, Ю.В. Баяндин, О.Б. Наймарк // ПЖТФ. – 2014. – Т. 40. – Вып.17. – С. 87–93. DOI: 10.1134/S1063785014090041
16. Simulation of electric explosion of metal wires / V.I. Oreshkin, R.B. Baksht, A.G. Roussikh, A.V. Shishlov, P.R. Levashov, I.V. Lomonosov, K.V. Khishchenko, I.V. Glazyrin // AIP Conf. Proc. – 2002. – Vol. 651. – P. 384–387. DOI: 10.1063/1.1531356
17. Банникова И.А., Наймарк О.Б., Уваров С.В. Разработка методики по исследованию релаксационных свойств жидкостей с использованием электровзрывной установки // XV Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: тр. междунар. конф. – Саров, 2013. – С. 745–750.
18. Долгобородов А.Ю., Воскобойников И.М. Скорость звука в ударно-сжатых корунде, карбиде бора и карбиде кремния // Журнал технической физики. – 1993. – Т. 63. – Вып. 2. – С. 203–208.
19. Морфология разрушения цилиндрических оболочек на волновой стадии / Е.Ф. Грязнов, Е.В. Карманов, В.В. Селиванов, С.В. Хахалин // Проблемы прочности. – 1984. – № 8. – С. 89–92.
20. Динамическая стохастичность и скейлинг при распространении трещины / О.Б. Наймарк, В.А. Баранников, М.М. Давыдова, О.А. Плехов, С.В. Уваров // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – № 6. – С. 67–77. DOI: 10.1134/1.1262809
21. Exponential and power-law mass distributions in brittle fragmentation / J.A. Åström, R.P. Linna, J. Timonen, P.F. Moøller, L. Oddershede // Physical Review E. – 2004. – Vol. 70(22), 026104. – P. 026104-1-026104-7. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.026104.
22. Katsuragi H., Sugino D., Honjo H. Scaling of impact fragmentation near the critical point // Physical Review E. – 2003. – Vol. 68(42), 046105. – P. 0461051–0461056.
23. Grady D.E., Kipp M.E. Geometric statistics and dynamic fragmentation // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 58. – No. 3. – P. 1210–1222. DOI: 10.1063/1.336139
24. Oddershede L., Dimon P., Bohr J. Self-organized criticality in fragmenting // Physical Review Letters. – 1993. – Vol. 71. – No. 19. – P. 3107–3110.
25. Kadono T. Fragment mass distribution of platelike objects // Physical Review Letters. – 1997. – Vol. 78. – No. 8. – P. 1444–1447.
26. Kadono T., Arakawa M. Crack propagation in thin glass plates caused by high velocity impact // Physical review E. – 2002. – Vol. 65(3), 035107. – P. 035107/1–035107/4. DOI: 10.1103/PhysRevE.65.035107.
27. Сильвестров В.В. Применение распределения Гилварри для описания статистики фрагментации твердых тел при динамическом нагружении // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 2. – С. 111–124.
28. Experimental analysis of lateral impact on planar brittle material / F.P.M. Dos Santos, V.C. Barbosa, R. Donangelo, S.R. Souza // Physical Review E. – 2010. – Vol. 81(4). – P. 046108(1–9). DOI: 10.1103/PhysRevE.81.046108.

29. Study of ceramic tube fragmentation under shock wave loading / I. Bannikova, S. Uvarov, M. Davydova, O. Naimark // *Procedia Materials Science*, ECF 20, Norway. – 2014. – Vol. 3. – P. 592–597. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.098

30. Bannikova I., Uvarov S., Naimark O. Analysis of fragmentation statistics of alumina tubular specimens // AIP Publishing LLC. – 2014. – Vol. 1623. – P. 59–62. DOI: 10.1063/1.4898882.

31. Brodskii R.Ye., Konevskiy P.V., Safronov R.I. Size distribution of sapphire fragments in shock fragmentation // *Functional Materials*. – 2011. – Vol. 18. – No. 2. – P. 200–205.

32. Банникова И.А., Наймарк О.Б., Уваров С.В. Исследование фрагментации трубчатых керамических образцов с использованием электровзрывной установки // Иерархически организованные системы живой и неживой природы: материалы междунар. конф. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2013. – С. 206–209. (CD диск).

References

1. Meibom A., Balslev I. Composite power laws in shock fragmentation. *Physical Review Letters*, 1996, vol. 76, no. 14, pp. 2492-2494.

2. Katsuragi H., Ihara S., Honjo H. Explosive fragmentation of a thin ceramic tube using pulsed power. *Physical Review Letters*, 2005, vol. 95, pp. 095503(1–4). DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.095503

3. Grady D. Fragmentation of rings and shells. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2006. Printed in Germany. 374 p.

4. Davydova M.M., Uvarov S.V., Naimark O.B. Prostranstvenno-vremennaya masshtabnaya invariantnost' pri dinamicheskoi fragmentatsii kvazikhrupkikh materialov [Spatial-temporal scale invariance of dynamic fragmentation of quasi brittle materials]. *Phys. Mesomechanics*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 100-107.

5. Koshelev E.A., Kuznecov V.M., Sofronov S.T., Chernikov A.G. Statistika oskolokov, obrazuiushchikhsia pri razrushenii tverdykh tel vzrivom [Statistics of fragmentation induced by explosion loading of solids]. *App. Math. and Theor. Phys.*, 1971, no. 2, pp. 87-100.

6. Wittel F.K., Kun F., Herrmann H.J., Kröplin B.H. Fragmentation of shells. *Physical Review Letters*, 2004, vol. 93, no. 3, pp. 035504(1-4).

7. Ching Emily S.C., Lui S.L., Xia Ke-Qing. Energy dependence of impact fragmentation of long. Glass rods. *Physica A.*, 2000, vol. 287. pp. 83-90.

8. Katsuragi H., Sugino D., Honjo H. Crossover of weighted mean fragment mass scaling in two-dimensional brittle fragmentation. *Physical Review E.*, 2004, vol. 70(62), 065103, pp. 065103/1-065103/4. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.065103.

9. Mott N.F. A theory of the fragmentation of shells and Bombs. *Ministry of Supply*, 1943, no. A.C.4035.

10. Mott N.F. Fragmentation of shell cases. *Proc. Royal Soc.*, 1947, A189, pp. 300-308. DOI: 10.1098/rspa.1947.0042

11. Davydova M., Uvarov S. Fractal laws for spatial and temporal variables of brittle fragmentation. *Proceeding of the 19th European Conference on Fracture “Fracture Mechanics for Durability reliability and Safety”, Kazan, Russia, 26-31 August 2012*. 2012, (119). (CD-ROM).

12. Davydova M., Uvarov S. Fractal statistics of brittle fragmentation. *Fracture and Structural Integrity*, 2013, vol. 24, pp. 60-68. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.24.05

13. Chace W.C. Exploding wires. *Physics Today*, 1964, vol. 17, no. 8, pp. 19-24.

14. Oreshkin V.I., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Rousskikh A.G., Chaikovskii S.A. Strata formation at fast electrical explosion of cylindrical conductors. *High Temperature*, 2012, vol. 50(5), pp. 584-595. DOI: 10.1134/S0018151X12050148

15. Bannikova I.A., Uvarov S.V., Bayandin Y.V., Naimark O.B. An experimental study of non-Newtonian properties of water under electroexplosive loading. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40(9), pp. 766-768. DOI: 10.1134/S1063785014090041

16. Oreshkin V.I., Baksht R.B., Rousskikh A.G., Shishlov A.V., Levashov P.R., Lomonosov I.V., Khishchenko K.V., Glazyrin I.V. Simulation of electric explosion of metal wires. *AIP Conf. Proc.*, 2002, vol. 651, pp. 384-387. DOI: 10.1063/1.1531356
17. Bannikova I.A., Naimark O.B., Uvarov S.V. Development of methodology for research the relaxation properties in the fluid using the setup of electrical explosion. *International Conference "XV Khariton's Topical Scientific Readings. Proceedings Extreme state of substance. Detonation. Shock waves"*. Sarov, 2013, pp. 750-755.
18. Dolgoborodov A.Y., Voskoboinikov I.M. Skorost' zvuka v udarno szhatykh korunde, carbide bora i carbide kremniia [Sound speed in shock-compressed corund, boron-carbide and silicon-carbide]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1993, vol. 63(2), pp. 203-208.
19. Gryaznov E.F., Karmanov E.V., Selivanov V.V., Khakhalin S.V. Morfologiya razrusheniia tsilindricheskikh obolochek na volnovoi stadii [Morphology of cylindrical shell failure at the wave stage]. *Problemy Prochnosti*, 1984, no. 8, pp. 89–92.
20. Naimark O.B., Barannikov V.A., Davydova M.M., Plekhov O.A., Uvarov S.V. Crack propagation: dynamic stochasticity and scaling. *Technical Physics Letters*, 2000, vol. 26, no. 3, pp. 254-258. DOI: 10.1134/1.1262809.
21. Åström J.A., Linna R.P., Timonen J., Moøller P.F., Oddershede L. Exponential and power-law mass distributions in brittle fragmentation. *Physical Review E.*, 2004, vol. 70(22), 026104, pp. 026104-1-026104-7. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.026104
22. Katsuragi H., Sugino D., Honjo H. Scaling of impact fragmentation near the critical point. *Physical Review E.*, 2003, vol. 68(42), 046105, pp. 0461051-0461056.
23. Grady D.E., Kipp M.E. Geometric statistics and dynamic fragmentation. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 58, no. 3, pp. 1210-1222. DOI: 10.1063/1.336139
24. Oddershede L., Dimon P., Bohr J. Self-organized criticality in fragmenting. *Physical Review Letters*, 1993, vol. 71, no. 19, pp. 3107-3110.
25. Kadono T. Fragment mass distribution of platelike objects. *Physical Review Letters*, 1997, vol. 78, no. 8, pp. 1444-1447.
26. Kadono T., Arakawa M. Crack propagation in thin glass plates caused by high velocity impact. *Physical Review E.*, 2002, vol. 65(3), 035107, pp. 035107/1-035107/4. DOI: 10.1103/PhysRevE.65.035107
27. Silvestrov V.V. Primenenie raspredeleniia Gilvarri dlia opisaniia statistiki fragmentatsii tverdykh tel pri dinamicheskom nagruzhenii [Application distribution Gilvarri to describe statistics the fragmentation of solids under dynamic loading]. *Fizika gorenii i vzryva*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 111-124.
28. Dos Santos F.P.M., Barbosa V.C., Donangelo R, Souza S.R. Experimental analysis of lateral impact on planar brittle material. *Physical Review E.*, 2010, vol. 81(4), 046108, pp. 046108(1-9). DOI: 10.1103/PhysRevE.81.046108.
29. Bannikova I., Uvarov S., Davydova M., Naimark O. Study of ceramic tube fragmentation under shock wave loading. *Procedia Materials Science*, 2014, ECF 20 Norway, vol. 3, pp. 592-597. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.098.
30. Bannikova I., Uvarov S., Naimark O. Analysis of fragmentation statistics of alumina tubular specimens, *AIP Publishing LLC*, 2014, vol. 1623, pp. 59-62. DOI: 10.1063/1.4898882.
31. Brodskii R.Ye., Konevskiy P.V., Safronov R.I. Size distribution of sapphire fragments in shock fragmentation. *Functional Materials*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 200-205.
32. Bannikova I.A., Naimark O., Uvarov S. Issledovanie fragmentatsii trubchatykh obrazcov s ispol'zovaniem elektrovzryvnoi ustanovki [The study of fragmentation of tubular ceramic samples using electroexplosive setup]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Ierarhicheski organizovannyye sistemy zhivoi i nezivoi prirody"*. Tomsk: Institut fiziki prochnosti i materialovedeniia Sibirskogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2013, pp. 206-209. (CD-disk).