

УДК 539.375

© 1999 г. С.И. КРИВОШЕЕВ, Н.Ф. МОРОЗОВ,
Ю.В. ПЕТРОВ, Г.А. ШНЕЕРСОН

ИНИЦИИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ИНТЕНСИВНОМ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

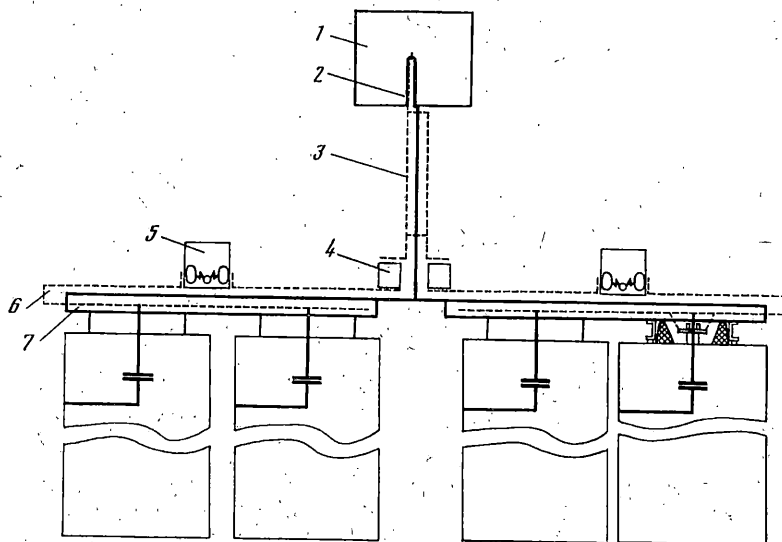
Рассмотрена проблема тестирования динамических прочностных свойств материалов с макротрещинами. Дано описание новой установки на основе генератора импульсных токов для создания ударных нагрузок микросекундной длительности. Изложены результаты экспериментов по изучению порога хрупкого разрушения образцов из ПММА.

1. Введение. Одна из основных проблем тестирования динамических прочностных свойств материалов связана с зависимостью динамической прочности от истории и способа приложения нагрузки. Это проявляется почти во всех ситуациях быстрого разрушения. Здесь под прочностью можно понимать как критический коэффициент интенсивности, соответствующий разрушению в вершине трещины, так и динамическое локальное напряжение разрыва "бездефектного" континуума: и то и другое является пределом для интенсивности локального силового поля, по достижении которого наступает разрушение.

Попытки установить величины критического напряжения и критического коэффициента интенсивности, отвечающие определенным скоростям нагружения, не приводят к однозначному результату. Зависимость от способа приложения нагрузки проявляется как изменение предельных величин при изменении продолжительности действия, амплитуды, скорости нарастания внешнего усилия, а также целого ряда других факторов. Экспериментально определенные значения критических параметров характеризуются очень большим разбросом, и, в итоге, их поведение является плохо предсказуемым. Заметим, что в соответствующей квазистатической ситуации критическая величина оказывается константой материала.

Эти и другие эффекты импульсной прочности материалов подтверждаются многочисленными экспериментальными исследованиями [1–5], однако до сих пор не имеют объяснения с точки зрения используемых в инженерной практике феноменологических моделей. Известные классические принципы, методы испытаний и критерии разрушения оказываются в этих условиях неэффективными. Очевидна необходимость развития новых подходов к проблеме определения динамических прочностных свойств материалов.

В этой связи особое значение приобретает знание пороговых характеристик разрушения, т.е. тех предельных значений параметров внешнего воздействия и геометрии образцов, при которых происходит качественное изменение картины процесса (возникновение макротрещин; резкое изменение скорости их роста, изменение направления разрушения и т.п.). Исследование пороговых ситуаций в динамике является особенно трудной и принципиальной задачей, и в мировой практике имеются лишь очень немногие работы, в которых авторы пытаются эту задачу поставить и решить. Для продвижения в этом направлении необходимо в первую очередь развивать новые методы экспериментального исследования деформационных и проч-



Фиг. 1

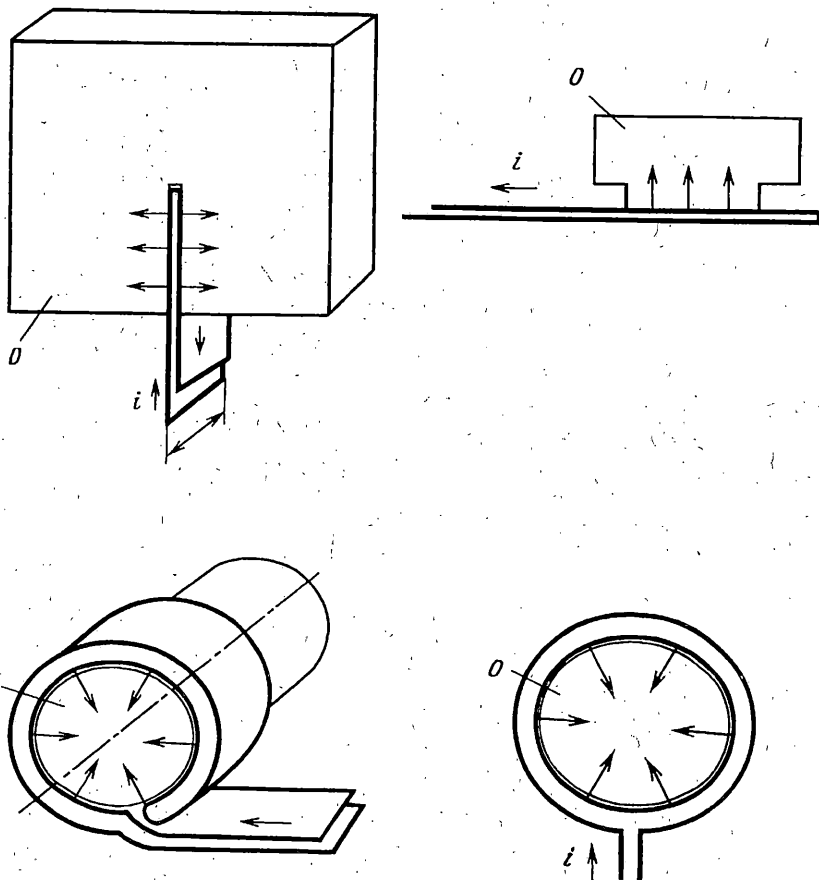
ностных свойств твердых тел при строго управляемых динамических воздействиях, основанные на использовании достижений современной физики и техники высокоинтенсивных импульсных процессов. Ниже на конкретном примере показаны возможности такой "интеграции" механики и физики сверхсильных электромагнитных воздействий.

2. Магнитно-импульсный способ нагружения. Адаптация электрофизических способов создания мощных энергетических потоков к проблемам механики разрушения позволяет резко расширить возможности экспериментального изучения и тестирования материалов в условиях кратковременных интенсивных нагрузок. При резком скин-эффекте [6] магнитное поле оказывает давление на поверхность проводника аналогичное давлению газа – магнитное давление.

Мгновенное значение магнитного давления есть $B^2/(2\mu_0)$, где B – индукция поля [Тл], $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. В поле с индукцией 100 Тл это давление составляет $4 \cdot 10^9$ Па. В настоящее время в лабораторных условиях получены поля с индукцией, превышающей 300 Тл. В таких полях исследованы интенсивные деформации в режимах, когда течение среды становится сходным с течением сжимаемой жидкости [7]. Сжатие металлических тонкостенных цилиндров в импульсном магнитном поле позволяет исследовать динамику развития неустойчивости. Вместе с тем, импульсное поле может быть использовано при изучении порога как пластической деформации, так и хрупкого разрушения. Удобство применения импульсного механического воздействия, создаваемого электромагнитными силами, состоит прежде всего в возможности тщательного контроля амплитуды и формы давления на границе проводника путем измерения индукции поля или тока в цепи и довольно простым управлением этими параметрами.

Опыт работы с мощными электрофизическими установками позволил предложить новую методику тестирования динамических прочностных свойств материалов, основанную на определении инкубационного времени разрушения. Методика соединяет в себе основные принципы испытаний на динамическую вязкость разрушения [1, 2, 8] и на определение пороговых амплитуд импульсных нагрузок [9–11].

3. Магнитно-импульсная установка 50 кВ, 1 МА; 1,2 ГПа. Упомянутые выше исследования принципов магнитно-импульсного нагружения показали перспективность использования генераторов импульсных токов для формирования кратковременных

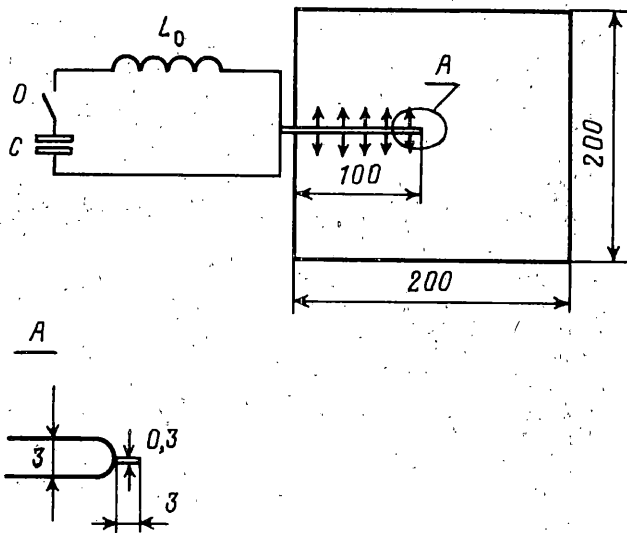


Фиг. 2

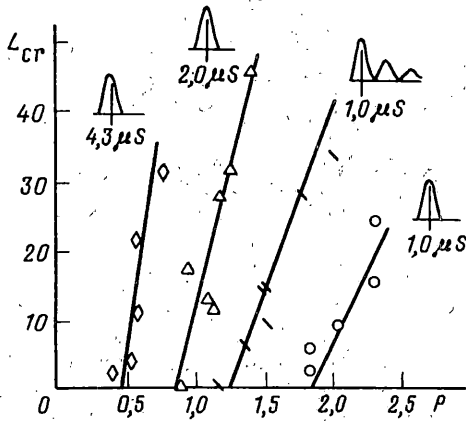
механических нагрузок и явились толчком к разработке и созданию установки "ξ-2", способной генерировать импульс давления с амплитудой порядка 1 ГПа с длительностью от 1 до 10 микросекунд. (ЦКП "Динамика" – СПбГУ, СПбГТУ, ИПМАН РАН).

Конденсаторная батарея установки состоит из двух модулей (фиг. 1), содержащих по два серийно изготавливаемых конденсатора типа ИКМ-50З каждый: 1 – исследуемый образец, 2 – нагрузка установки, 3 – выходной коллектор, 4 – нелинейные сопротивления (вилиты), 5 – многоканальный малоиндуктивный коммутатор, 6 – высоковольтная шина, 7 – земляная шина. Для снижения индуктивности батареи и уменьшения ее габаритов использованы элементы пространственной ошиновки. Переход от коаксиальных выводов конденсаторов к плоским шинам осуществлен путем использования ошиновки типа "трехшинка". Аналогично решена проблема выходного коллектора.

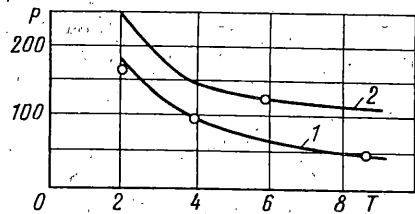
Каждый модуль коммутируется малоиндуктивным многоканальным разрядником под давлением типа описанного в [12]. Последовательное включение поджигающих промежутков на управляющих электродах с помощью специальной формирующей схемы обеспечивает синхронную работу разрядников. При правильно выбранном рабочем давлении разброс в срабатывании не превышает 30 нс. Нелинейные сопротивления установлены в каждом модуле и их параметры могут изменяться в зависимости от требований эксперимента. С использованием данной установки легко могут быть реализованы схемы нагружения, представленные на фиг. 2 (O – исследуемый образец, $\dot{P}(t) = \frac{1}{2} \mu_0 (i(t)/l)^2$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м]).



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

Динамическое разрушение. Эксперимент. Эксперименты по изучению порога хрупкого разрушения проводились на образцах в ПММА. Размеры образцов и схема нагружения (фиг. 3) выбраны таким образом, чтобы для интерпретации результатов было правомерно использование решения динамической начально-краевой задачи для бесконечной плоскости с полубесконечным разрезом. Импульс давления формировался за счет протекания тока по плоским шинам, размещенным в разрезе образца (толщина образца 10 мм) и подключенным к генератору импульсных токов, — нагрузке. Индуктивность нагрузки при выбранных размерах около 50 нГн, минимальное время нарастания тока — 1 мкс. Параметры источника можно оценить и выбрать, воспользовавшись подходом, изложенным, например, в [13, 14]. Энергоемкость источника при рабочем напряжении 50 кВ должна быть около 5 кДж. При этом параметр $LW \approx 5 \cdot 10^{-4}$ Гн · Дж. Для проведения экспериментов была использована конденсаторная батарея [15] со специально разработанным малоиндуктивным многоканальным газовым коммутатором [12] и устройством для формирования моноимпульса тока на основе нелинейных элементов.

В реализованной в экспериментах схеме нагружения, представленной на рис. 3, использовались токопроводящие медные шины, толщина которых минимизировалась по критерию максимального допустимого интеграла действия [16]. Расчет импульса давления производился в допущении идеальной проводимости и равномерного распределения тока по ширине шин по формуле $P = \mu I(t)^2 / (2b^2)$, где $I(t)$ – ток в нагрузке, b – ширина шин.

Под порогом хрупкого разрушения далее понимается минимальная амплитуда разрушающей нагрузки. Определение порога хрупкого разрушения проводилось на образцах из оргстекла, имеющего механические характеристики $c_1 = 1970$ м/с, $c_2 = 1130$ м/с, $K_{Ic} = 1,47$ МПа $\sqrt{м}$, где c_1, c_2 – продольная и поперечная скорости упругих волн, K_{Ic} – предельный коэффициент интенсивности при статическом нагружении.

На фиг. 4 приведены экспериментальные результаты: длина развившейся из вершины разреза трещины L_{cr} [мм] в зависимости от величины амплитуды импульса давления P [Па · 10⁸] для четырех видов нагрузки, полученных с использованием генераторов импульсных токов.

Пороговое значение разрушающей амплитуды импульса определялось путем экстраполяции зависимости $L_{cr}(P)$ в область $L_{cr} \rightarrow 0$. Поскольку процесс развития трещин имеет пороговый характер и чувствителен к величине импульса давления (тока), регистрация величины последнего должна производиться с погрешностью не более 3%.

Представленные на фиг. 4 результаты качественно соответствуют результатам исследований на металлах [11], в которых иными способами были реализованы импульсные нагрузки длительностью от 20 до 40 мкс.

Анализ результатов испытаний. Результаты экспериментов по определению порога разрушения были проанализированы при помощи структурно-временного критерия разрушения, основанного на системе фиксированных определяющих параметров [17, 18]:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{1}{d} \int_0^d (r, \theta, t') dr dt' \leq \sigma_c \quad (1)$$

Здесь d и τ – структурный размер и структурное время разрушения, σ_c – статическая прочность материала, (r, θ) – полярные координаты, (r, θ, t) – растягивающее напряжение у вершины трещины ($r = 0$). Критерий (1) позволяет осуществить обобщение принципов линейной механики разрушения на динамику. При этом используются основополагающие идеи теории разрушения В.В. Новожилова [19]. Структурный размер d определяется по данным квазистатических испытаний образцов с трещинами и в случае плоского напряженного состояния может быть выражен через квазистатическую вязкость (критический коэффициент интенсивности) разрушения и прочность по простой формуле [20, 21] $d = 2K_{Ic}^2 / (\pi\sigma_c^2)$. Физически он может быть интерпретирован как линейный размер, характеризующий элементарную ячейку разрушения на данном масштабном уровне [22]. Параметр структурного времени τ отвечает за динамические особенности процесса хрупкого разрушения и для каждого материала должен быть выбран из дополнительных соображений или определен из экспериментов. В соответствии с данным подходом σ_c, K_{Ic} и τ образуют систему определяющих параметров, описывающих прочностные свойства материала. Введенный критерий позволяет с единой точки зрения исследовать динамическое разрушение как "бездефектных" сред, так и сред с макродефектами типа трещин. Возможны различные физико-механические интерпретации структурно-временного критерия. В частности, в [23, 25] показано, что критерий (1) отражает дискретную природу динамического разрушения твердых тел.

При анализе реализованной в эксперименте схемы нагружения предполагалось, что поле напряжений двумерно (зависит лишь от переменных x, y в плоскости плас-

тины и времени t), удовлетворяет динамической системе уравнений Ламе, а соответствующие граничные условия на берегах трещины могут быть представлены в виде:

$$\sigma_y = -p(t), \quad \sigma_{xy} = 0 \quad (2)$$

Были рассмотрены три униполярных импульса вида $p(t) = PQ(t)$:

$$p(t) = P \sin^2(\pi t / T)[H(t) - H(t - T)] \quad (3)$$

различной продолжительности ($T = 8, 6; 4; 2$ мкс), а также случай экспоненциально убывающего периодического импульса, допускающего аппроксимацию:

$$p(t) = P \sin^2(3\pi t / T) \exp(-2t / T_0)[H(t) - H(t - T)] \quad (4)$$

с длительностью $T = 6$ мкс ($H(t)$ – функция Хевисайда, $T_0 = 4,2$ мкс.).

Из критерия (1) следует, что в случае кратковременных импульсов нагрузки имеет место аналитическая зависимость [26]:

$$P = \frac{\tau K_{Ic}}{\varphi(c_1, c_2) \max \int_{t-\tau}^t f(s) ds}, \quad \varphi(c_1, c_2) = 4c_2 \sqrt{c_1^2 - c_2^2} / (c_1 \sqrt{\pi c_1}) \quad (5)$$

где P – минимальная разрушающая (пороговая) амплитуда импульса, $\varphi(c_1, c_2)$ – функция скоростей продольных и сдвиговых волн, а $f(t)$ находится из решения динамической начально-краевой задачи. Структурное время разрушения в случае инициирования роста макротрещин может рассматриваться как инкубационное время в теории минимального времени [11, 25]:

$$\tau = t_{inc} \quad (6)$$

Развитый подход позволяет существенно упростить процедуру тестирования динамических прочностных свойств квазихрупких материалов.

Решение динамической системы Ламе при нулевых начальных данных и граничных условиях (2) позволяет получить зависимость от времени коэффициента интенсивности напряжений, которая в рассматриваемом случае задается формулами

$$K_I(t) = P\varphi(c_1, c_2)f(t), \quad f(t) = \int_0^t Q(s)f_0(t-s)ds, \quad f_0(t) = \frac{1}{2}t^{-1/2} \quad (7)$$

Формулы (5), (6), (7) дают возможность определения инкубационного времени по известному значению порогового импульса динамической нагрузки и статическим характеристикам прочности и трещиностойкости для данного материала.

На фиг. 5 представлены рассчитанные для рассмотренного материала при $\tau = 32$ мкс зависимости пороговых амплитуд P [МПа] от продолжительности нагружения T [Мкс]. Нижняя кривая соответствует одиночным импульсам нагрузки вида (3), верхняя кривая – периодическим, типа (4). Видно, что теоретические расчеты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными (светлые точки).

6. Выводы. Применение современных электрофизических способов создания мощных энергетических потоков к проблемам механики разрушения позволяет резко расширить возможности экспериментального изучения и тестирования материалов в условиях высокоинтенсивного нестационарного динамического нагружения.

Дано описание построенной в ЦКП "Динамика" (СПбГУ, СПбГТУ, ИГМАШ РАН) новой установки на основе генератора импульсных токов (50 кВ, 1 МА, 15 кДж) для создания управляемых ударных нагрузок микросекундной длительности и амплитудами импульса давления порядка 1 ГПа. Разработана методика испытаний и проведены эксперименты по изучению порога хрупкого разрушения образцов с макротрещинами.

Результаты экспериментов подтверждают эффективность методов магнитно-импульсного нагружения в задачах, направленных на исследование природы разру-

шения, а также применимость использованного для анализа подхода, в котором основным параметром, определяемым из эксперимента, является пороговая разрушающая нагрузка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 99-01-00718, 96-15-96838, проекты ЦКП – 97-01-05009 и "Интеграция" – рег. № 589) и Конкурсного Центра грантов СПбГУ (№ 97-0-4.3-28).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knauss W.G.* Fundamental problems in dynamic fracture // *Advances in Fracture Research: Proc. 6th Intern. Conf. Fracture / Eds S.R. Vallure et al. Oxford, New York: Pergamon Press, 1984. V. 1. P. 625–652.*
2. *Ravi-Chandar K., Knauss W.G.* An experimental investigation into dynamic fracture: 1. Crack initiation and arrest // *Intern. J. Fracture. 1984. V. 25. N 4. P. 247–262.*
3. *Dally J.W., Barker D.B.* Dynamic measurements of initiation toughness at high loading rates // *Exper. Mech. 1988. V. 28. N 3. P. 298–303.*
4. *Dally J.W., Shukla A.* Dynamic crack behavior at initiation // *Mech. Res. Commun. 1979, V. 6. N 4. P. 239–244.*
5. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В.* Проблемы динамики разрушения твердых тел. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1997. 129с.
6. *Шнеерсон Г.А.* Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М.: Энергоатомиздат: 1992. 413с.
7. *Кривошеев С.И., Титко В.В., Шнеерсон Г.А.* Двухмерная диффузия поля и магнитгидродинамическое течение при электрическом взрыве одновитковых соленоидов малого объема в мегагауссном магнитном поле // *Ж. техн. физики. 1997. Т. 67. № 4. С. 32–47.*
8. *Smith G.C.* An experimental investigation of the dynamic fracture of a brittle material // *Ph.D. Thesis. California: California Inst. Technol., 1975.*
9. *Kalthoff J.F., Shockey D.A.* Instability of cracks under impulse loads // *J. Appl. Phys. 1977. V. 48. № 3. P. 986–993.*
10. *Homma H., Shockey D.A., Murayama Y.* Response of cracks in structural materials to short pulse loads // *J. Mech. and Phys. Solids. 1983. V. 31. № 3. P. 261–279.*
11. *Shockey D.A., Erlich D.C., Kalthoff J.F., Homma H.* Short-pulse fracture mechanics // *Eng. Fract. Mech. 1986. V. 23. № 1. P. 311–319.*
12. *Адамьян Ю.Э., Василевский В.М., Кривошеев С.И., Шутов В.Л.* Малоиндуктивный многоканальный газовый коммутатор тока // *Приборы и техн. эксперимента, 1995. № 2. С. 122–125.*
13. *Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П. Велихова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 351с.*
14. *Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Камелькова. М.: Атомиздат, 1970. 472с.*
15. *Кривошеев С.И., Петров Ю.В.* Экспериментальная установка и методика исследования пороговых разрушающих нагрузок для образцов с макротрещинами при кратковременных ударных воздействиях, создаваемых импульсным магнитным полем. Препринт № 142. СПб: ИПМАШ РАН, 1997.
16. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392с.
17. *Morozov N.F., Petrov Y.V.* Macroscopic parameters of brittle fracture // *Arch. Mech. 1996. V. 48. № 5. P. 825–833.*
18. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В.* О концепции структурного времени в теории динамического разрушения хрупких материалов // *Докл. РАН. 1992. Т. 324. № 5. С. 964–967.*
19. *Новожилов В.В.* О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // *ПММ. 1969. Т. 33. Вып. 2. С. 212–222.*
20. *Морозов Н.Ф.* Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984. 255с.
21. *Morozov N.F., Petrov Y.V., Utkin A.A.* New explanation of some effects of brittle fracture by impact loading // *Advances in Fracture Research: Proc. Intern. Conf. Fract. Oxford: Pergamon Press, 1989. V. 6. P. 3703–3711.*
22. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Разрушение и формирование структуры // *Докл. АН СССР. 1978. Т. 240. Т. 4. С. 829–832.*

23. *Петров Ю.В.* О "квантовой" природе динамического разрушения хрупких сред // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 66–68.
24. *Петров Ю.В.* Квантовая аналогия в механике разрушения твердых тел // Физика твердого тела. 1996. Т. 38. №.11. С. 3385–3393.
25. *Петров Ю.В.* "Квантовая" макромеханика динамического разрушения твердых тел. Препринт № 139. СПб: ИПМАШ РАН, 1996. 53с.
26. *Petrov Y.V., Morozov N.F.* On the modeling of fracture of brittle solids // Trans. ASME. J. Appl. Mech. 1994. V. 61. № 3. P. 710–712.

С.-Петербург

Поступила в редакцию
12.02.1999