

© 2007 г. Ю.В. ПЕТРОВ

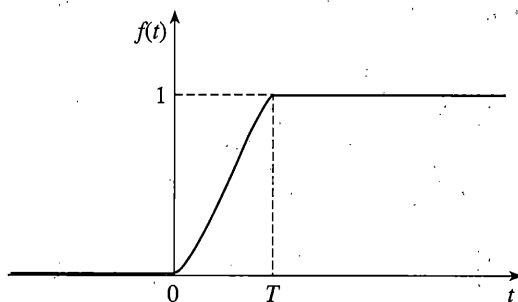
**ОБ ИНКУБАЦИОННОЙ СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ  
И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ  
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВВОДЕ ЭНЕРГИИ**

Эксперименты по разрушению и структурным превращениям в твердых и жидких средах, а также проводниках и диэлектриках в результате интенсивного импульсного воздействия внешней среды или направленных потоков энергии выявляют целый ряд эффектов, которые показывают принципиальное отличие быстрого динамического разрыва (пробоя) материалов от аналогичного процесса при медленных квазистатических воздействиях. Так, например, одна из основных проблем моделирования динамических прочностных свойств материалов связана с зависимостью предельных характеристик от истории и способа приложения нагрузки. Зависимость от способа приложения воздействия проявляется как многократное (от сотен до тысяч процентов) изменение предельных величин при изменении продолжительности действия, амплитуды, скорости нарастания внешнего воздействия, а также целого ряда других факторов. В то время как в статике критическую величину можно считать константой материала (или меняющейся относительно несильно, по крайней мере, в пределах десятков процентов), в динамике экспериментально определенные значения критических характеристик характеризуются очень сильной неустойчивостью и могут отличаться на порядки. В итоге динамическое поведение системы, описываемой на основе этих характеристик, оказывается непредсказуемым.

Указанная, а также некоторые другие особенности поведения материалов, подвергаемых импульсным воздействиям, являются общими для ряда, казалось бы, совершенно различных физических процессов, таких как импульсное разрушение твердых тел, кавитация в жидкости, электрический разряд и пробой в диэлектриках, а также фазовые превращения при температурном и механическом воздействии ударными волнами.

В данной работе рассматриваются примеры, иллюстрирующие характерные динамические эффекты в указанных процессах. Дается единая интерпретация разрушения твердых тел и жидкостей, электрического пробоя в диэлектриках, а также динамических фазовых превращений на основе структурно-временного подхода [1–3], основанного на понятии инкубационного времени разрушения.

**1. Критерий инкубационного времени разрушения.** Основная причина затруднений при модулировании вышеупомянутых эффектов механической и электрической прочности состоит в отсутствии адекватного предельного условия, определяющего момент образования разрыва или пробоя. Данная проблема может быть разрешена на основе структурной макромеханики разрушения и понятия инкубационного времени разрушения, учитывающего кинетические процессы формирования макроразрывов [1, 2]. Вышеприведенные эффекты становятся существенными тогда, когда осуществляется



Фиг. 1

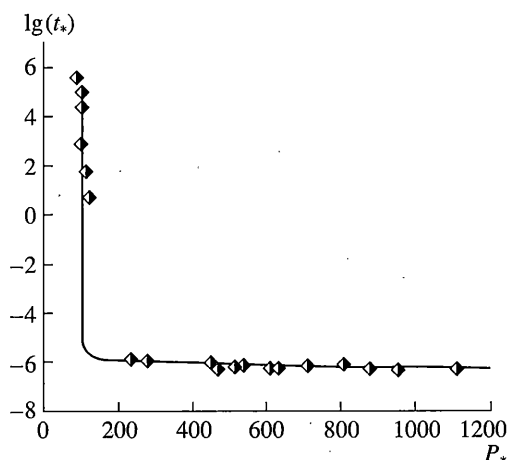
переход от медленных воздействий к воздействиям с периодами, сравнимыми по величине с масштабом, определяемым инкубационным временем разрушения, природа которого обусловлена подготовительными релаксационными процессами развития микродефектов в структуре материала.

Предложенный в [1, 2] критерий инкубационного времени разрушения позволяет рассчитывать наблюдаемые в экспериментах по разрушению твердых тел эффекты неустойчивого поведения динамических прочностных характеристик. В обобщенном виде данный критерий может быть представлен условием:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \left( \frac{F(t')}{F_c} \right)^\alpha dt' \leq 1. \quad (1)$$

где  $F(t)$  – интенсивность локального силового поля, вызывающего разрушение среды;  $F_c$  – статический предел локального силового поля;  $\tau$  – инкубационное время, связанное с динамикой подготавливающего разрыв релаксационного процесса. Время разрушения определяется как момент выполнения в условии (1) знака равенства. Параметр  $\alpha$  характеризует чувствительность к уровню напряженности силового поля, вызывающего разрушение.

Рассмотрим один из возможных способов интерпретации и определения параметра  $\tau$  на примере механического разрыва материала. Предположим, что растягиваемый стандартный образец из данного материала разрывается на две части при напряжении  $P$ , которое возникает в некоторый момент времени  $t = 0$ :  $F(t) = PH(t)$ , где  $H(t)$  – функция Хевисайда. При квазихрупком разрушении происходит разгрузка материала и локальное напряжение в месте возникновения разрыва быстро (но не мгновенно) падает от значения  $P$  до нуля. При этом порождается соответствующая волна разгрузки, которая распространяется по образцу и может быть зарегистрирована известными (например, интерферометрическими или поляризационно-оптическими) методами. История изменения напряжения в месте разрыва условно может быть представлена зависимостью  $\sigma(t) = P - Pf(t)$ , где функция  $f(t)$  в течение некоторого временного промежутка  $T$  меняется от 0 до 1. Классической теории прочности отвечает случай  $f(t) = H(t)$ , т.е. согласно классическому подходу разрыв происходит мгновенно ( $T = 0$ ). В действительности же, разрыв материала (образца) представляет собой процесс, протекающий во времени, а функция  $f(t)$  описывает микрокинетику перехода от условно “бездефектного”  $f(0) = 0$  к полностью разрушенному  $f(T) = 1$  состоянию, совпадающему с макроразрушением в данной точке (фиг. 1). Применяя в данной ситуации на макроскопическом уровне ( $F(t) = PH(t)$ ) критерий разрушения (1), получим  $T = \tau$  при  $P = F_c$ , т.е. введенное инкубационное время равно временному периоду разрушения после достижения напряжением в материале статической прочности на разрыв на дан-



Фиг. 2

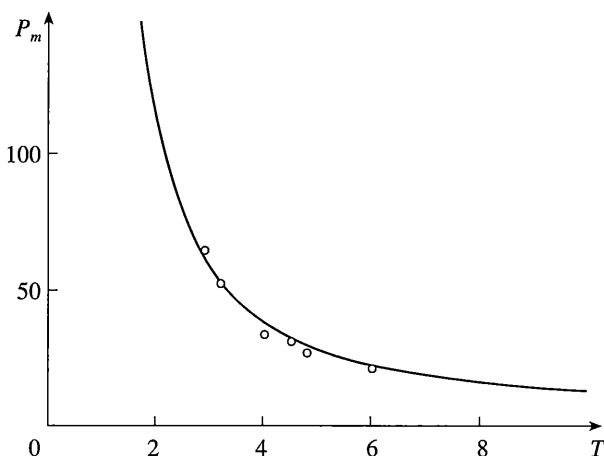
ном масштабном уровне. Этот период может быть измерен в опытах по статическому разрушению образцов различными способами. Таким способом может быть измерение времени нарастания давления на фронте волны разгрузки, снятой интерферометрическим или поляризационно-оптическим методом по профилю скорости точек поверхности образцов. Далее рассмотрены примеры конкретной реализации критерияльного условия (1) в различных физико-механических задачах.

**2. Откольное разрушение твердых тел.** Типичным примером, иллюстрирующим сложное поведение динамической прочности твердых тел, является временная зависимость прочности, наблюдаемая в условиях откола (фиг. 2) [4]. Данная зависимость времени разрушения  $t_*$  ( $c$ ) от критической амплитуды импульса  $P_*$  (МПа) при различных его длительностях показывает, что динамическая прочность не является постоянной материала, но зависит от времени до разрушения (“времени жизни” образца). Критерий критического напряжения  $\sigma(t) \leq \sigma_c$ , где  $\sigma_c$  – статическая прочность, хорошо описывает квазистатическое разрушение на больших временах, вызываемое длительными волновыми импульсами  $\sigma(t) = P\varphi(t)$ , где  $P$  – амплитуда,  $\varphi(t)$  – функция временного профиля. Однако в случае кратковременных импульсов появляется слабая зависимость времени разрушения от пороговой амплитуды с некоторой асимптотой. Этот эффект получил название явления динамической ветви временной зависимости прочности. Явление динамической ветви не имеет объяснения ни в рамках традиционных теорий прочности, ни в рамках известных временных критериев.

Полная временная зависимость прочности может быть получена на основе критерия инкубационного времени (1), который в рассматриваемом случае откольного разрушения принимает вид ранее предложенного в [3] предельного условия

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(t') dt' \leq \sigma_c \quad (2)$$

где  $\sigma(t)$  – временная зависимость локального напряжения в месте разрыва. Схема применения критерия (2) к задачам откола приведена в [2, 3]. Пример расчета по критерию (2) временной зависимости прочности алюминия ( $\tau = 0.75$  мкс,  $\sigma_c = 103$  МПа) для импульсов треугольной формы, реализованных в экспериментах [4], показан на фиг. 2 сплошной кривой.



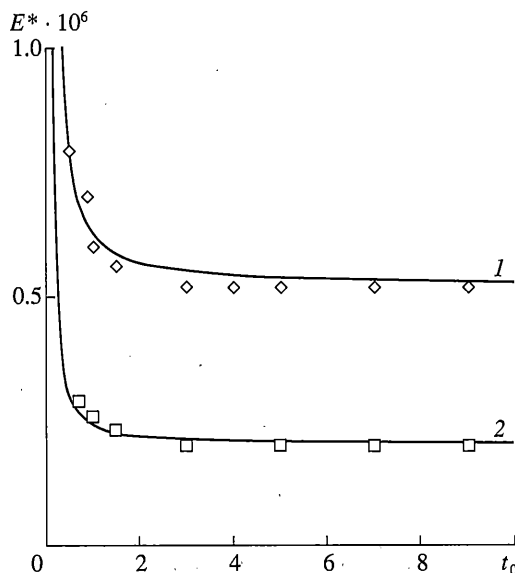
Фиг. 3

Аналогично могут быть проанализированы эффекты поведения динамической вязкости разрушения [2]. Наблюдаемые в экспериментах скоростные зависимости динамической вязкости разрушения  $K_{Id}$  характеризуются сильной неустойчивостью и могут кардинально изменяться при вариациях длительности стадии нарастания нагрузки, формы временного профиля нагружающего импульса, геометрии образцов, способа приложения нагрузки [5–7]. Соответствующие условиям различных экспериментов расчеты на основе критерия инкубационного времени представлены в [1, 2, 8]. Результаты показывают, что динамическая вязкость разрушения не является характеристикой материала и применение критерия критического коэффициента интенсивности  $K_I(t) \leq K_{Id}$  и характеристики  $K_{Id}$  в качестве определяющего динамическое разрушение материального параметра (по аналогии со статическим  $K_{Ic}$ ) не является корректным.

**3. Кавитация в жидких средах.** Кавитация – это нарушение сплошности (начальная стадия разрушения) жидкости в поле растягивающих напряжений, сопровождающееся ростом парогазовых пузырьков на ядрах кавитации, которые практически всегда присутствуют в жидких средах в виде микропузырьков свободного газа, микрочастиц или их комбинаций [9, 10]. Одним из параметров, характеризующих кавитационную прочность воды, является порог кавитации, под которым подразумевается отрицательное давление, превышение которого вызывает интенсивный рост кавитационных ядер и, как следствие, резкое изменение в динамике свободной поверхности жидкости, интенсивности светорассеяния и так далее.

На фиг. 3 приведены экспериментальные данные [11], полученные на основе емкостной методики регистрации кавитационного порога по динамике свободной поверхности жидкости при отражении от нее ударной волны, согласно которой ударная волна создается в ударной трубе давлением импульсного магнитного поля на проводящую мембрану, передающую импульс давления в жидкость. Реализуемый в эксперименте на воде импульс давления, вызывающий кавитацию у свободной поверхности, представлялся выражением  $\sigma(t) = -P_A \sin(\pi t/T) e^{-t/T_1}$ ,  $T_1 = 2.85 \cdot 10^{-6}$  с. Максимальное абсолютное значение амплитуды в импульсе  $P_m$  достигалось в момент  $t = T/\pi \arctg(\pi T_1/T)$  и определялось по формуле

$$P_m = \frac{\pi T_1 P_A}{\sqrt{T^2 + \pi^2 T_1^2}} \exp\left(-\frac{T}{\pi T_1} \arctg\left(\frac{\pi T_1}{T}\right)\right)$$



Фиг. 4

Для анализа начальной стадии кавитационного разрушения воспользуемся критерием инкубационного времени (1). При этом учтем, что растягивающие напряжения в механике деформируемого твердого тела положительны, а растягивающие давления в жидкости отрицательны. Кроме этого необходимо также учесть вклад сжимающего давления. Следовательно, для жидкости (1) примет вид:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \text{sign}(\sigma(t')) \left( \text{abs} \left( \frac{\sigma(t')}{\sigma_c} \right) \right)^\alpha dt' \leq 1 \quad (3)$$

На фиг. 3 сплошной линией показана рассчитанная по критерию (3) кривая зависимости прочности воды  $P_m$  (атм) от длительности импульса  $T$  (мкс) при  $\sigma_c = 1$  атм,  $\alpha = 0.5$  и  $\tau = 19$  мкс [11].

Таким образом, эксперименты показывают, что кавитационная прочность жидкостей растет при уменьшении длительности нагружающего импульса, причем соответствующая зависимость имеет нелинейный характер. Применение критерия инкубационного времени позволяет рассчитать наблюдаемое в экспериментах увеличение порога кавитации при уменьшении длительности импульса.

**4. Электрический пробой в диэлектриках.** Импульсный электрический пробой в диэлектриках, являющийся актуальной проблемой при разработке и эксплуатации высоковольтных установок и других электротехнических устройств, также представляет собой типичный пример явления, где наблюдаются эффекты, аналогичные описанным выше. Так, типичной особенностью импульсного пробоя является увеличение пробивного напряжения с уменьшением длительности импульса. Канал пробоя в целочно-галлоидных кристаллах, вызываемый электрическим полем длительности порядка 10 нс, возникает при напряжениях в несколько раз превышающих квазистатические (т.е. с длительностями порядка 1 мкс и более) [12]. Такой же эффект характерен и для ионных соединений. В качестве примера на фиг. 4 представлена полученная в [13] зависимость пробивного электрического поля  $E^*$  (В/см) монокристаллов перхлората аммония от длительности  $t_0$  (мкс) переднего фронта импульса, которая также характеризует зависимость электрической прочности от величины скорости подъема элек-

трического напряжения в образце. Представленная таким образом зависимость также может быть названа временной зависимостью прочности, аналогичной той, что наблюдается в вышеописанных случаях откола, старта трещин и кавитации. В эксперименте [13] тонкие пластинки из монокристаллов перхлората аммония помещались в импульсное электрическое поле. Электрический пробой образцов приводил к их выгоранию с образованием сквозного канала. Приведенные на фиг. 4 экспериментальные данные соответствуют двум расстояниям между электродами: 0.01 см и 0.03 см. Видно, что при значениях  $t_0 \leq 1.5$  мкс электрическая прочность  $E^*$  материала возрастает с уменьшением длительности переднего фронта импульса напряжения (с увеличением скорости роста напряжения в образце). При  $t_0 > 1.5$  мкс пробивное поле практически перестает зависеть от  $t_0$ .

Соответствующий соотношению (1) критерий электрического пробоя в рассматриваемом случае может быть записан в виде

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t E(t') dt' \leq E_c \tag{4}$$

где  $E_c$  – статическая электрическая прочность материала, которая может зависеть от межэлектродного расстояния,  $\tau$  – инкубационное время электрического пробоя материала, определяемое кинетикой размножения электронов при электрическом разряде. Рассчитанные по критерию (4) временные зависимости электрической прочности  $E^*$  перхлората аммония показаны на фиг. 4 сплошными линиями. При расчете принималось  $\tau = 0.33$  мкс;  $E_c = 0.52 \times 10^6$  В/см при  $L = 0.01$  см;  $E_c = 0.2 \times 10^6$  В/см при  $L = 0.03$  см. Время начала нарастания пробивного поля на представленной зависимости полностью определяется величиной  $\tau$ . В [13] показано, что это время практически не зависит от межэлектродного расстояния. Это указывает на то, что инкубационное время в рассматриваемом случае можно считать характеристикой материала.

**5. Аномальные температуры плавления при ударных воздействиях.** В работе [14] описано экспериментальное исследование откольного разрушения образцов из поликристаллов и монокристаллов алюминия при различных температурах. Анализ экспериментальных данных для поликристаллического алюминия показал, что сопротивление разрыву мало изменяется с ростом температуры от комнатной до значения, составляющего 90% температуры плавления, и резко падает до нуля с дальнейшим повышением температуры. Для монокристаллов алюминия в эксперименте наблюдался эффект аномально высоких температур, т.е. наблюдалось сохранение высокой прочности в состоянии, где ожидалось плавление при растяжении. Покажем, что на основе понятия инкубационного времени может быть введен новый критерий плавления, связывающий момент фазового перехода с соответствующим инкубационным периодом, что позволяет дать естественное объяснение эффекту аномальных температур плавления при импульсном воздействии [15].

В [14] для оценки растягивающих напряжений, при которых начинается плавление материала, было применено соотношение следующего вида:

$$p\alpha \frac{dT_m}{dp} - \frac{p}{K_T} = \alpha(T_0 - T_{m0}) - \frac{p}{K_S} \tag{5}$$

где производная  $dT_m/dp$  отражает зависимость температуры плавления  $T_m$  от давления  $p$ ,  $\alpha = 1.12 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  – объемный коэффициент теплового расширения,  $T_{m0} = 933.2 \text{ K}$  – температура плавления при нулевом давлении,  $T_0$  – начальная температура испытания,  $K_T = 56.7 \text{ ГПа}$  и  $K_S = 71.1 \text{ ГПа}$  – изотермический и изэнтропический модули объемной упругости материала. Данная зависимость представляет собой одно из соотношений, применяемых в физике плавления для определения связи между температурами и давлениями, соответствующими началу плавления. Она отвечает достаточно

плавному (квазистатическому) воздействию, а прямое применение этой зависимости означало бы, что плавление тела рассматривается как мгновенный процесс.

В [14] растягивающие напряжения, при которых начинается плавление материала, оцениваются по этой формуле для обоих материалов. И если для поликристаллического алюминия экспериментальные данные сосредоточены ниже этой оценки, то эксперименты для монокристаллического алюминия показали, что при пересечении расчетной границы области плавления сохранялись высокие значения прочности. Для объяснения этого эффекта введем новый критерий разрушения, соответствующий плавлению. Будем считать, что плавление есть не мгновенный процесс, но процесс, характеризующийся своим инкубационным периодом  $\tau_m$ . Рассмотрим критерий плавления в следующем виде:

$$\int_{t-\tau_m}^t \sigma(s) ds \leq P_m \tau_m \quad (6)$$

где  $P_m$  – среднее (“равновесное”) напряжение, которое должно реализоваться в течение инкубационного периода  $\tau_m$  для того, чтобы произошло плавление материала. Оно соответствует давлению, определяемому из соответствующей равновесной “ $p - T$  диаграммы”

$$\varphi(P_m, T) = 0 \quad (7)$$

задаваемой в случае экспериментов [14] конкретным соотношением (5).

При выполнении равенства в соответствии (6) происходит плавление материала и соответствующая температура в этом случае определяется как температура плавления  $T = T_m$ . Решая соответствующую задачу об отражении треугольных волновых импульсов напряжения от свободной границы и применяя к этому решению критерий плавления (5), можно получить зависимость вызывающих плавление пороговых амплитуд напряжения  $P_{*melt}$  от длительности  $t_i$ , инкубационного периода плавления  $\tau_m$  и температуры  $T$  [15]:  $P_{*melt} = P_{*melt}(T, t_i, P_m, \tau_m)$ .

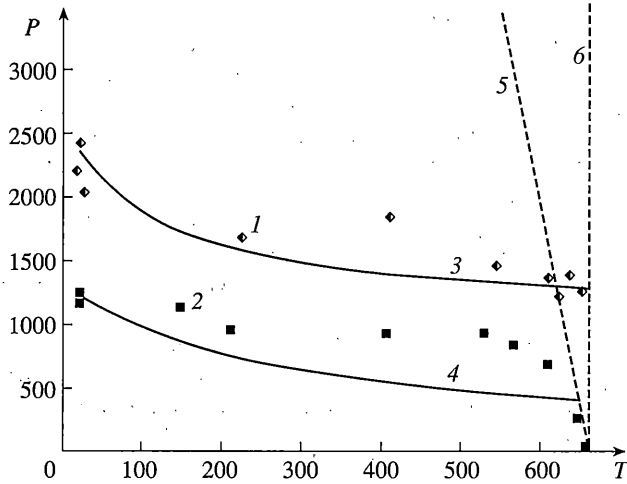
В частном случае классического подхода (или медленного воздействия, когда плавление можно рассматривать как “мгновенное” событие), т.е. при  $\tau_m/t_i \rightarrow 0$ , имеем:

$$P_{*melt}(T) = P_m \quad (8)$$

Рассчитанные таким образом по формулам (6) и (7) графики температурных зависимостей динамических пороговых амплитуд  $P_{*melt}$ , вызывающих плавление, а также соответствующие зависимости откольной прочности приведены в [15, 16]. Результаты расчетов приведены на фиг. 5, где показана температурная ( $^{\circ}\text{C}$ ) зависимость разрушающей пороговой амплитуды импульса (МПа) длительностью 0.12 мкс для монокристаллов алюминия (1 – экспериментальные данные [1], 3 – расчет по формуле (1)) и поликристаллического алюминия (2 – экспериментальные данные [1], 4 – расчет по формуле (1)). Показаны также растягивающие напряжения, соответствующие началу плавления: 5 – расчет по “классическому” критерию (8); 6 – расчет по критерию инкубационного времени плавления (6, 7) с  $\tau_m = 0.7$  мкс.

Для определения условий, когда происходит начало плавления, в [14] был использован классический критерий плавления в виде (8). Однако высокотемпературные данные по пороговым амплитудам для монокристаллов алюминия заметно превысили этот предел (см. фиг. 5). Применение модели инкубационного времени (6)–(7) для определения напряжений и температур, соответствующих началу плавления монокристаллов алюминия, в комбинации с критерием разрушения типа (1) позволяет обосновать наблюдаемую “аномалию”: рассчитанные по (6)–(7) пороговые амплитуды плавления оказываются заметно выше значений, предсказываемых по классическому критерию плавления (8).

Для определения условий, когда происходит начало плавления для поликристаллического алюминия, может быть использован классический критерий плавления в виде (8),



Фиг. 5

поскольку, как это можно видеть, экспериментальные данные для поликристаллов лежат ниже значений давлений, получаемым по данному критерию. Высокотемпературные же данные для монокристаллов превышают этот предел, и для определения давлений и температур, соответствующих началу плавления монокристаллов алюминия, следует применять модель инкубационного времени (6)–(7).

Инкубационное время плавления  $\tau_m$  для монокристаллов алюминия оценивали, зная величину перегрева монокристаллов алюминия относительно оценки, полученной по классическому критерию, т.е. предполагая, что в эксперименте было выяснено значение температуры, при достижении которого значения откольной прочности для монокристаллов резко начинают падать в связи с началом плавления. Разница между этим значением температуры и ее значением, соответствующим началу плавления согласно классическому критерию, и есть величина перегрева для монокристаллов алюминия. В [14] указана величина перегрева, равная  $30^\circ\text{C}$ , и выбранное инкубационное время плавления  $\tau_m = 0.7$  мкс соответствует данному перегреву.

Таким образом, построенная модель объясняет эффект резкого падения прочности при температурах, близких к температурам плавления, тем, что происходит конкуренция двух процессов: разрушения и плавления, каждый из которых характеризуется соответствующим инкубационным временем. Можно оценить при каких значениях давления и температуры происходит данный переход – он определяется как точка пересечения графиков, соответствующих каждому из этих процессов. Рассмотренная модель инкубационного времени плавления позволяет объяснить эффект аномально высоких температур плавления, наблюдающихся в эксперименте [14] для монокристаллов алюминия.

Использование равновесных “ $p - T$  диаграмм” типа (7) в комбинации с критерием структурного перехода типа (6) может служить эффективным средством анализа быстрых неравновесных процессов структурных и фазовых превращений в физике сплошных сред и естественного объяснения ряда “парадоксальных” (аномальных) эффектов, не требующего введения специальных физических понятий (о “мгновенных” температурах и т.п.).

**Заключение.** Рассмотренные примеры различных физических процессов указывают на принципиальную важность изучения инкубационных процессов, подготавливающих резкие структурные изменения (разрушение и фазовые переходы) в сплошных средах при интенсивных импульсных воздействиях. Очевиден универсальный характер инкуба-



ционного времени разрушения, которое представляет собой основную характеристику динамической прочности и должно стать одним из основных экспериментально определяемых (измеряемых) материальных параметров. Представленные результаты свидетельствуют о фундаментальности структурно-временного подхода, позволяющего адекватно отражать как динамику разрушения твердых тел и жидкостей, так и динамику фазовых превращений при интенсивном импульсном воздействии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-01-01068), программы ОЭММПУ РАН (Развитие механики многомасштабного деформирования и разрушения как основы проектирования новых материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками) и программы Президиума РАН (Физика и механика сильно сжатого вещества).

Автор также пользуется случаем, чтобы поздравить с 75-ти летним юбилеем и поблагодарить своего учителя академика Н.Ф. Морозова, при поддержке которого развивались идеи, лежащие в основе применяемого в данной работе подхода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров Ю.В.* О “квантовой” природе динамического разрушения твердых тел // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 66–68.
2. *Morozov N., Petrov Y.* Dynamics of Fracture. Springer: Berlin-Heidelberg-New York, 2000. 101 P.
3. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А.* Об анализе откола с позиций структурной механики разрушения // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 2. С. 276–279.
4. *Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С., Брагов А.М.* Временные закономерности процесса разрушения при интенсивных нагрузках // Физика твердого тела. 1974. Т. 16. Вып. 6. С. 1752–1755.
5. *Ravi-Chandar K., Knauss W.G.* An experimental investigation into dynamic fracture. 1. Crack initiation and arrest // Int. J. Fract. 1984. V. 25. P. 247–262.
6. *Kalthoff J.F.* Fracture behavior under high rates of loading // Engng. Fract. Mechanics. 1986. V. 23. P. 289–298.
7. *Dally J.W., Barker D.B.* Dynamic measurements of initiation toughness at high loading rates // Experimental Mechanics. 1988. V. 28. P. 298–303.
8. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В.* О структурно-временном описании скоростной зависимости динамической вязкости разрушения хрупких материалов // Изв. АН СССР. МТТ. 1993. № 6. С. 100–104.
9. *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва. Эксперимент и модели. Новосибирск: Высш. шк., 2000. 434 с.
10. *Корнфельд М.* Упругость и прочность жидкостей. М.: ГИТТЛ, 1951. 200 с.
11. *Бесов А.С., Кедринский В.К., Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А.* Об аналогии начальной стадии разрушения твердых тел и жидкостей при импульсном нагружении // Докл. АН. 2001. Т. 378. № 3. С. 235–238.
12. *Воробьев А.А., Воробьев Г.А.* Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высш. шк., 1966. 221 с.
13. *Ханефт И.Г., Ханефт А.В.* Влияние длительности переднего фронта импульса напряжения на электрический пробой монокристаллов перхлората аммония // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 4. С. 42–45.
14. *Канель Г.И., Разоренов С.В.* Аномалии температурных зависимостей объемной и сдвиговой прочности монокристаллов алюминия в субмикросекундном диапазоне // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. Вып. 5. С. 839–845.
15. *Петров Ю.В., Ситникова Е.В.* Эффект аномальных температур плавления при ударно-волновом нагружении // Докл. АН. 2005. Т. 400. № 4. С. 480–482.
16. *Петров Ю.В., Ситникова Е.В.* Температурная зависимость откольной прочности и эффект аномальных температур плавления при ударно-волновом нагружении // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 8. С. 71–74.