

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

*На правах рукописи*

Груздков Алексей Андреевич

**КОНЦЕПЦИЯ ИНКУБАЦИОННОГО ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
СПЛОШНЫХ СРЕД**

Специальность 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена на кафедре теории упругости  
математико-механического факультета  
Санкт-Петербургского государственного университета

Научный консультант – член-корреспондент РАН  
доктор физ.-мат. наук Ю.В. Петров

официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор Даль Юрий Михайлович  
(кафедра Вычислительных методов  
механики деформируемого тела СПбГУ)

член-корреспондент РАН,  
доктор физико-математических наук  
профессор Ломакин Евгений Викторович  
(кафедра теории пластичности МГУ)

доктор физико-математических наук,  
профессор Цвелодуб Игорь Юрьевич  
(институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
СО РАН, Новосибирск)

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Защита состоится 22 октября 2009 г. в \_\_\_\_\_ на заседании совета  
Д.212.232.30 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-  
Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-  
Петербург, Петродворец, Университетский пр., дом 28, математико-  
механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького  
Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034,  
Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Зегжда С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Развитие техники требует создания новых материалов способных работать в экстремальных режимах внешнего воздействия. Следует иметь в виду, что улучшение свойств материалов в одном диапазоне значений параметров нагружения может сопровождаться радикальным ухудшением прочностных свойств при других условиях нагружения. Поэтому необходимо проведение испытаний материалов в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия, что требует создания соответствующих моделей и выработки единой системы определяющих параметров материала. Вместе с тем многие используемые в инженерной практике модели не дают адекватного описания поведения материалов в широком диапазоне температурно-скоростных условий нагружения. Микрофизические модели с одной стороны часто оказываются слишком сложными для непосредственного включения в практические расчеты, а с другой стороны часто не могут описать макроскопический уровень разрушения.

Быстрое развитие вычислительной техники приводит к широкому распространению стандартных пакетов прикладных программ, ориентированных на расчеты динамики конструкций и их возможного разрушения. Однако совершенно очевидно, что некорректный учет особенностей динамического поведения материалов может привести к абсолютно неадекватным прогнозам. Таким образом, вопрос о том, какие характеристики материала должны быть признаны стандартными и о том, какие модели должны закладываться в стандартные программные пакеты, выходит на передний край науки о материалах.

**Цель диссертационной работы** состоит в разработке относительно несложных моделей, которые, отражая основные особенности поведения материалов, могли быть непосредственно использованы в практических расчетах. Были поставлены следующие задачи:

- рассмотреть с единых позиций различные по своей физической сути проявления динамической прочности сплошных сред, перейти от

констатации формальной аналогии между процессами к выработке единого формализма, понятийного аппарата и подходов к моделированию;

- проанализировать на основе понятия инкубационного времени текучесть металлов, разрушение твердых тел, кавитацию жидкостей в условиях интенсивного кратковременного воздействия;
- создать модели для учета совместного влияния температуры и скорости нагружения на хрупко-вязкий переход при разрушении твердых тел;
- разработать методики экспериментального определения параметров, описывающих динамические прочностные свойства материала

**Метод исследования.** В работе развивается предложенный Н.Ф. Морозовым и Ю.В. Петровым подход к описанию динамической прочности материалов, основанный на понятии инкубационного времени.

**Научная новизна.** Получены следующие новые результаты.

- предложен критерий текучести металлов справедливый для произвольного закона изменения нагрузки;
- предложены динамический критерий кавитации жидкостей для случая импульсного нагружения и его модификация для анализа акустической кавитации;
- определены значения динамического аналога константы Гриффитса для ПММА и сферопластика;
- обоснован принцип равной мощности при анализе многоуровневого хрупкого разрушения твердых тел;
- предложена модель учета влияния температуры при анализе динамической текучести металлов и сплавов, позволяющая в рамках единого подхода объяснить как температурное разупрочнение, так и темпера-

турные аномалии текучести; произведены количественные оценки температурно-временного соответствия для некоторых материалов;

- предложена модель для определения критической температуры и критической скорости хрупко-вязкого перехода при разрушении твердых тел;
- предложен метод учета многоуровневого характера релаксации, дано возможное объяснение природы физической нелинейности при разрушении и текучести в твердых телах;
- экспериментально определены характерные времена переходных процессов, связанных с мартенситной неупругостью в никелиде титана.

**Практическая ценность.** Результаты, полученные в работе могут быть использованы для анализа прочностных свойств конструкций в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия, в частности для предсказания наиболее опасных режимов с точки зрения возможного охрупчивания материала. Разработанные методики определения характерных длительностей переходных процессов дают возможность при заданных условиях нагружения прогнозировать тип разрушения, обусловленный соревнованием различных механизмов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались автором на всероссийских и международных конференциях, семинарах, симпозиумах: 1-ая Всесоюзная конференция "Технологические проблемы прочности несущих конструкций", Запорожье (1991); EUROMECH, Санкт-Петербург (1992); международная конференция «Нелинейные науки на рубеже тысячелетий», Санкт-Петербург (1999); международная конференция «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов», Санкт-Петербург (2000 и 2005); международная конференция «Поляховские чтения», Санкт-Петербург (2000); международная летняя научная школа «Physical Aspects of Fracture», Cargese, Corsica (2000); VII-ая научно-технической конференции «Актуальные проблемы механики, прочности и теп-

лопроводности при низких температурах» Санкт-Петербург (2001); 8-ой и 9-ый «Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике», Пермь (2001) и Нижний Новгород (2006); 13-ые «Петербургские чтения по проблемам прочности», Санкт-Петербург (2002); 6-th International Congress on Thermal Stresses, Вена (2005); международная летняя научная школа «Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование», Кемерово (2006); The 2-nd International Symposium “Physics and Mechanics of Large Plastic Strains”, Санкт-Петербург (2007); 5-ый и 6-ой Российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах», Новый Афон (2007 и 2008).

Результаты работы представлялись также на международных и российских конференциях: международная молодежная научная конференция XXVII Гагаринские чтения, Москва (2001); международная конференция VI Забабихинские научные чтения, Снежинск (2001); международной научная конференция по механике «Третьи Поляховские чтения», Санкт-Петербург (2003); III-я Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-2006, Москва (2006); 45-ая Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» Белгород (2006); European Symposium on Martensitic Transformations (ESOMAT-2006) Bohum (2006); 7-th International Congress on Thermal Stresses, Tai Pai (2007); конференция «Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва» Новосибирск (2007).

Результаты работы неоднократно докладывались автором на семинарах секции прочности и пластичности им. Н.Н. Давиденкова в Доме Ученых, семинарах кафедры теории упругости и центра «Динамика» Санкт-Петербургского государственного университета.

**Публикации.** По теме работы имеется 31 публикация, в том числе 9 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК [1-9]. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, автор в равной степени участвовал в разработке ос-

новых подходов, которые определяли новизну исследования. Автору принадлежат наиболее важные идеи в работах [8,9,12,23]. Автором выведены основные формулы в работах [3,4,5,6,8,23,28], полностью выполнены численные расчеты для сравнения модели с экспериментальными данными в работах [1,2,16,21,25,27], основная часть численных расчетов в работах [26,29,31] и значительная часть расчетов в работах [7,8,9,22,23]. В работах по исследованию мартенситной неупругости инкеллида титана [18,19,20,30] соавторы участвовали в организации и проведении экспериментов, обсуждении результатов, формулировке выводов; автором полностью выполнено моделирование эксперимента, построены расчетные диаграммы, определены характеристики материала. Критерий кавитации жидкостей, используемый в работах [8,15,23], в равной степени разрабатывался автором, Ю.В. Петровым и А.А Уткиным, модификация этого критерия для анализа акустической кавитации в работах [22,28] предложена автором. Автору в равной степени с Ю.В. Петровым принадлежит формулировка критерия текучести металлов и температурные зависимости параметров, используемые в работах [1,2,7,10,12,13,16,21,25,26,27,29,31].

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 243 наименования. В работе содержится 36 иллюстраций и 4 таблицы. Общий объем работы 225 страниц.

**Поддержка.** Исследования автора на различных этапах работы поддерживались грантами РФФИ (№ 02-01-01035-а, 02-01-81038-Бел2002-а, 03-01-39010-ГФЕН-а, 05-01-01068-а, 07-08-00527-а), программами РАН ("Физика и механика сильно-сжатого вещества и проблемы внутреннего строения Земли и планет", «Структурная механика материалов и элементов конструкций. Взаимодействие нано- микро- мезо- и макромасштабов при деформировании и разрушении»), контрактом «Исследование и прогнозирование динамической прочности горных пород», заказчик – корпорация "Shell".

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы и сформулированы основные задачи исследования. Дается краткий обзор содержания диссертации и перечень основных результатов выносимых на защиту.

Анализ разрушения твердых тел показал необходимость дополнения моделей механики сплошных сред структурным параметром, описывающим характерный линейный размер процесса разрушения. Такой параметр вводился в критерии хрупкого разрушения Г. Нейбером (1937) и В.В. Новожиловым (1969). Последующие работы показали, что данный параметр может не обнаруживать прямой связи с характеристиками структуры материала (межатомным расстоянием, размером зерна и т.д.). Очевидно, что в условиях динамического нагружения наличие пространственной структуры порождает некоторую структуру, т.е. характерный масштаб, по оси времени. Такой параметр получил название «инкубационного времени». Важно подчеркнуть, что в отличие от работ Шоки, Кальтхофа и других исследователей, которые использовали этот термин для обозначения задержки разрушения, зависящей от условий нагружения, в данной работе под инкубационным временем понимается параметр материала, в то время как реальная задержка разрушения может быть как больше, так и меньше инкубационного времени в зависимости от особенностей приложения нагрузки.

Введение характерного масштаба на оси времени, т.е. задание типичной длительности процессов перестройки структуры материала, оказывается гораздо более универсальным, применимым к гораздо более широкому классу явлений, чем введение пространственной структуры. В работах Н.Ф. Морозова, Ю.В. Петрова, А.А. Уткина была показана эффективность данного подхода к анализу хрупкого разрушения твердых тел в условиях кратковременного нагружения. В данной работе основное внимание уделяется применению концепции инкубационного времени к моделированию других процессов.



**В первой главе** обсуждаются общие подходы к построению моделей динамической прочности сплошных сред. Описывается общая схема, которая применяется в последующих главах.

Под прочностью в широком смысле понимается способность материала сохранять качественное состояние несмотря на внешнее воздействие. В случае медленного нагружения обнаруживается пороговый характер разрушения. «Статическая прочность» описывается критериями вида

$$\varphi(t) < A_{CR}, \quad (1.1)$$

где  $\varphi(t)$  задает интенсивность внешнего воздействия, а  $A_{CR}$  - критическое значение, превышение которого приводит к качественному изменению состояния материала («разрушению»). Примерами могут служить предел прочности, предел текучести, порог кавитации и т.д.

В случае быстрого изменения параметров внешнего воздействия на феноменологическом уровне обнаруживается появление «динамической прочности», которая проявляет себя либо в форме существенного возрастания критической амплитуды нагружения («скоростное упрочнение»), либо в форме запаздывания разрушения. Примерами могут служить запаздывание старта трещины, запаздывание текучести в металлах (Wood, Clark 1949 и др.), задержка кавитации (Чебаевский, Петров 1973) и т.д. Для описания подобных явлений рядом авторов предлагались критерии импульсного типа, которые сводятся к учету простого накопления поврежденности: J.D. Campbell для текучести металлов (1953), В.С. Никифоровский и Е.И. Шемякин для разрушения твердых тел (1979), Ш.У. Галиев для кавитации жидкостей (1981). Критерии импульсного типа противоречат критерию (1.1) и неприменимы для медленно меняющейся нагрузки.

Отсутствие «моста» между статическим и динамическим критерием, т.е. единой кривой прочности, создает ряд проблем: во-первых, промежуточный диапазон скоростей нагружения оказывается не охваченным; во-вторых, нет возможности заранее определить, является ли заданная скорость приложения нагрузки быстрой или медленной; в-третьих, нет возможности рассматривать

широкий диапазон скоростей нагружения. Для исправления ситуации многими авторами предлагались модели «силового» типа, суть которых сводится к предложению учитывать вклад только нагрузки, превышающей статическое пороговое значение. Альтернативные («релаксационные») модели базируются на концепции «затухания памяти» (Ю.Н. Работнов 1977 и др.). Текущая величина нагрузки в (1.1) заменяется оператором свертки с функцией «забывания»

$$\int_0^t \varphi(s)K(t-s)ds \leq 1. \quad (1.2)$$

Если предположить, что затухание памяти происходит в течение периода равному инкубационному времени, и использовать в соотношении (1.2) кусочно-постоянное ядро оператора получится критерий вида

$$\frac{1}{\tau} \cdot \int_{t-\tau}^t \varphi(s)ds \leq A_{CR}, \quad (1.3)$$

где  $\tau$  - инкубационное время. Далее в работе доказывається, что при достаточно медленном изменении нагрузки критерий (1.3) переходит в квазистатический критерий (1.1) и, следовательно, определяет кривую прочности во всем диапазоне скоростей нагружения. На примере модельных задач, в которых поведение системы задается простыми дифференциальными уравнениями, показывается применимость критериев вида (1.3) к достаточно непохожим ситуациям.

**Во второй главе** предлагается критерий текучести металлов, применимый для произвольного изменения нагрузки.

Анализ результатов многочисленных экспериментов по динамической текучести металлов показывает (Ю.В. Суворова 1968), что уменьшение длительности нагружения должно компенсироваться увеличением амплитуды приложенной нагрузки, причем имеющиеся данные для случая кратковременного нагружения хорошо описываются степенным законом подобия:

$$\sigma_*^\alpha \cdot t_* = Const, \quad (2.1)$$

где  $t_*$  - время от момента приложения нагрузки до момента перехода в пластическое состояние,  $\sigma_*$  - амплитуда напряжения (предел текучести). В работе рассмотрены различные варианты обобщения (2.1) на случай произвольной истории нагружения. В результате предложен (А.А. Груздков, Ю.В. Петров 1991 [10]) критерий текучести вида

$$\frac{1}{\tau} \cdot \int_{t-\tau}^t \left( \frac{\sigma(s)}{\sigma_Y} \right)^\alpha ds < 1, \quad (2.2)$$

где  $\sigma(t)$  - приложенное напряжение,  $\sigma_Y$  - статический предел текучести,  $\tau$  - инкубационное время,  $\alpha$  - безразмерный параметр, характеризующий влияние истории нагружения. В случае быстрого приложения нагрузки ( $t_* < \tau$ ) оказывается выполненным соотношение (2.1), при медленном приложении нагрузки ( $t_* \gg \tau$ ) переход в пластическое состояние происходит при напряжении близком к  $\sigma_Y$ . В [2] дается обобщение критерия (2.2) на случай неодноосного нагружения

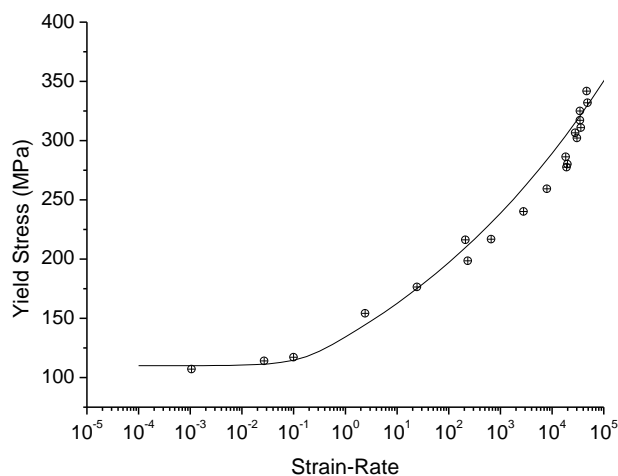
$$\frac{1}{\tau} \cdot \int_{t-\tau}^t \left( \frac{\sqrt{3} \cdot I_k(s)}{\sigma_Y} \right)^\alpha ds \leq 1, \quad (2.3)$$

где  $I_k$  - интенсивность касательных напряжений. На рис. 1 приводится сопоставление расчетов по критерию (2.3) с экспериментальными данными (Campbell J.D., Ferguson W.G. 1970).

В завершение второй главы дается сопоставление критерия (2.2) с некоторыми феноменологическими моделями и рассматриваются различные законы изменения нагрузки.

**В третьей главе** анализируется разрушение твердых тел и жидкостей (кавитация) в волнах растяжения.

a)



б)

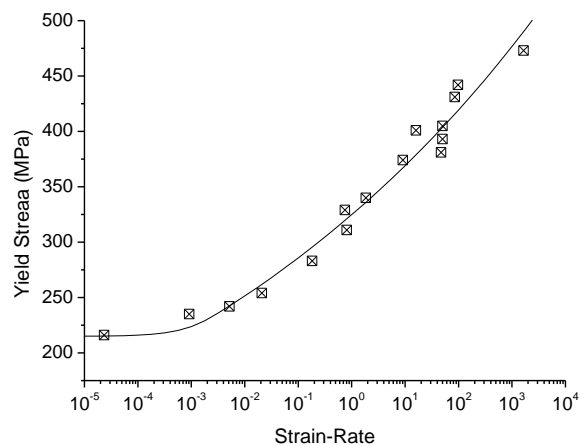


Рис. 1 Зависимость предела текучести при сдвиге (а) и растяжении (б). Сплошные линии – расчет по критерию (2.3) при следующих значениях параметров  $\alpha = 17$ ,  $\tau = 0.1$  с,  $\sigma_Y = 215$  МПа для (а) и  $\alpha = 11$ ,  $\tau = 0.5$  мс,  $\sigma_Y = 110$  МПа для (б)

Экспериментальные данные для дистиллированной воды и глицерина показывают, что минимальная амплитуда импульса растягивающего давления, вызывающего кавитацию, связана с длительностью импульса степенным законом.

$$P_*^\alpha T = Const \quad (3.1)$$

Таким образом, уменьшение длительности импульса должно компенсироваться увеличением амплитуды.

Анализ уравнения динамики полости в жидкости (уравнение Релея-Плессета), проведенный автором в работах [8,23] объяснил природу зависимости (3.1) и показал, что показатель степени для невязкой жидкости, для которой доминирующим фактором является инерционное сопротивление, равен  $1/2$ , а для жидкости с большой вязкостью (т.е. в случае когда вязкое сопротив-

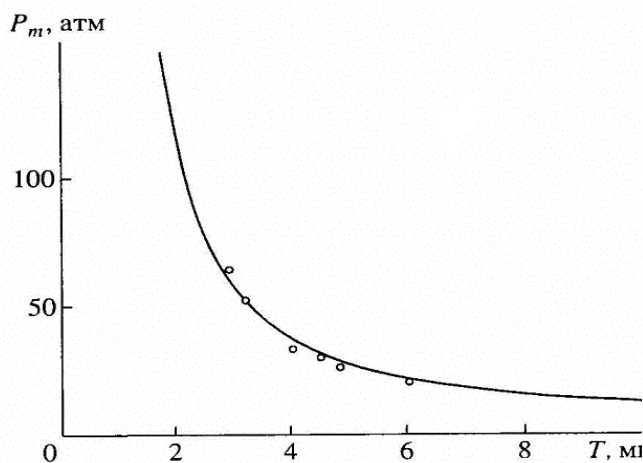
ление оказывается преобладающим) рост полостей оказывается аналогичен росту пор в твердом теле, показатель степени в (3.1) равен 1.

Совместно с Ю.В. Петровым и А.А. Уткиным автором был предложен динамический критерий кавитации жидкостей при импульсном нагружении.

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \text{sign}(P(s)) \cdot \left( \frac{|P(s)|}{P_c} \right)^\alpha ds \geq 1, \quad (3.2)$$

где  $P_c$  - порог кавитации при медленном нагружении. На рис. 2 дается сопоставление расчетов по критерию (3.2) с экспериментальными данными для дистиллированной воды (Кедринский и др. 2001) и глицерина (Carlson G.A., Levine H.S. 1975; Уткин А.В. и др. 2003).

а)



б)

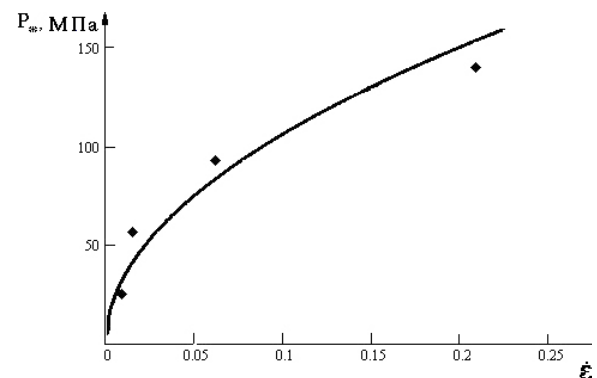


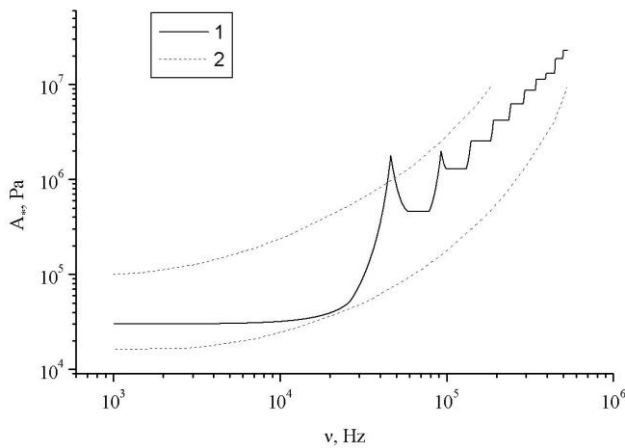
Рис. 2 Зависимость прочности дистиллированной воды от длительности импульса (а) и откольной прочности глицерина от скорости деформирования (б)

Для анализа акустической кавитации автор в [22,28] предложил модификацию критерия (3.2). Пороговую амплитуду давления предлагается определять из соотношения

$$A_* = P_c \cdot \min_{\tau_0 \leq \tau \leq \tau_0 + \delta} \left( \frac{2}{\omega \tau} \cdot \left| \int_0^{\frac{\omega \tau}{2}} \psi(z) dz \right| \right)^{-\alpha}, \quad (3.3)$$

где  $\psi(x) = \text{sign}(\cos x) \cdot |\cos x|^\alpha$ ,  $\omega$  - частота ультразвукового излучения,  $P_c$  - порог кавитации при низкочастотном нагружении, параметры  $\tau_0$  и  $\delta$  задают разброс инкубационного времени  $\tau$  вследствие микронеоднородности среды. Соотношение (3.3) соответствует «принципу слабейшего звена». На рис. 3 дается сопоставление расчетов по (3.3) и экспериментальных данных. На диаграмме (а) показан диапазон экспериментальных значений (кривые Эше) для дегазированной воды, на графике (б) приводятся данные об акустической прочности морской воды (Акуличев 1996).

а)



б)

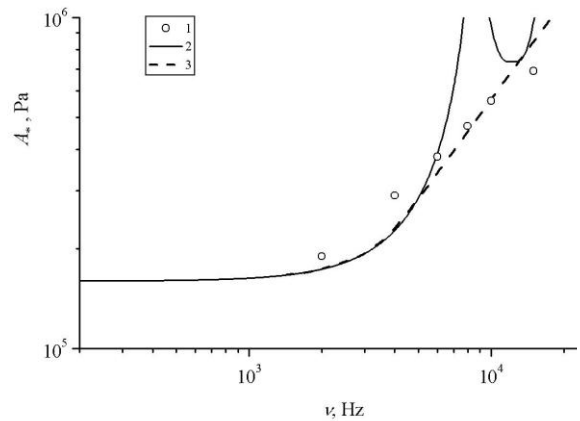


Рис. 3 Зависимость пороговой амплитуды давления от частоты звуковой волны для дегазированной воды (а), для морской воды (Северный Ледовитый океан) (б)

**В четвертой главе** рассматриваются энергетические аспекты разрушения твердых тел.

Проведено сопоставление вклада упругих и инерционных сил при высокоскоростной фрагментации твердых тел. Для ряда простых задач (соударение

пластин, растяжение стержня, раздача кольца) получены точные оценки. Проанализирована модель фрагментации кольца, предложенная D.E. Grady. Показано, что в этом случае энергетический подход, основанный на игнорировании особенностей процесса диссипации энергии в процессе разрушения, не может дать удовлетворительного прогноза.

Условие роста трещины согласно постулату Гриффитса можно представить в виде

$$\frac{dG}{dS} = -2\gamma, \quad (4.1)$$

где  $\gamma$  - константа Гриффитса – удельная (на единицу площади) энергия образования новой поверхности,  $G$  - упругая энергия в образце,  $S$  - площадь свободной поверхности, образующейся при разделении материала. Константа Гриффитса (с учетом поправки Орована и Ирвина) описывает не только поверхностную энергию, а вклад всех диссипативных процессов при разрушении. В условиях нагружения с длительностью в микросекундном диапазоне резко меняются все основные характеристики разрушения, предполагать постоянство величины  $\gamma$  в этом случае, оснований также нет. В опытах по нагружению образцов с трещиной из ПММА и сферопластика импульсами давления с длительностью в микросекундном диапазоне, создаваемыми на магнитно-импульсной установке (С.И. Кривошеев и др. 1999), при заданной длительности были определены пороговые (минимальные) значения амплитуды импульсов, приводящих к продвижению трещины. Зависимость длины прорастания трещины от превышения амплитуды над пороговым значением  $A_0$  имеет вид

$$\Delta L = k(A - A_0), \quad A > A_0. \quad (4.2)$$

На основании решения задачи о нагружения упругого полупространства импульсом давления, была определена энергия, переданная образцу за время нагружения.

$$\Theta = \frac{H D}{\rho c} \cdot \int_0^T (p(t))^2 dt, \quad (4.3)$$

где  $H$  - толщина пластины,  $D$  - длина выреза,  $\rho$  - плотность материала,  $c$  - скорость продольной волны,  $p(t)$  - внешнее давление на берега разреза. На основании (4.2) и (4.3) была определена удельная (на единицу площади) энергия образования новой поверхности, т.е. динамический аналог константы Гриффитса:

$$2\gamma_d = \frac{3A_0 T t_*}{2k\rho}, \quad (4.4)$$

где  $T$  - длительность импульса,  $t_*$  - время до старта трещины,  $A_0$  и  $k$  - параметры из формулы (4.2). Расчет по экспериментальным данным и формуле (4.4) показал резкий рост энергоемкости разрушения при уменьшении длительности импульса (см. рис. 4) [3,4].

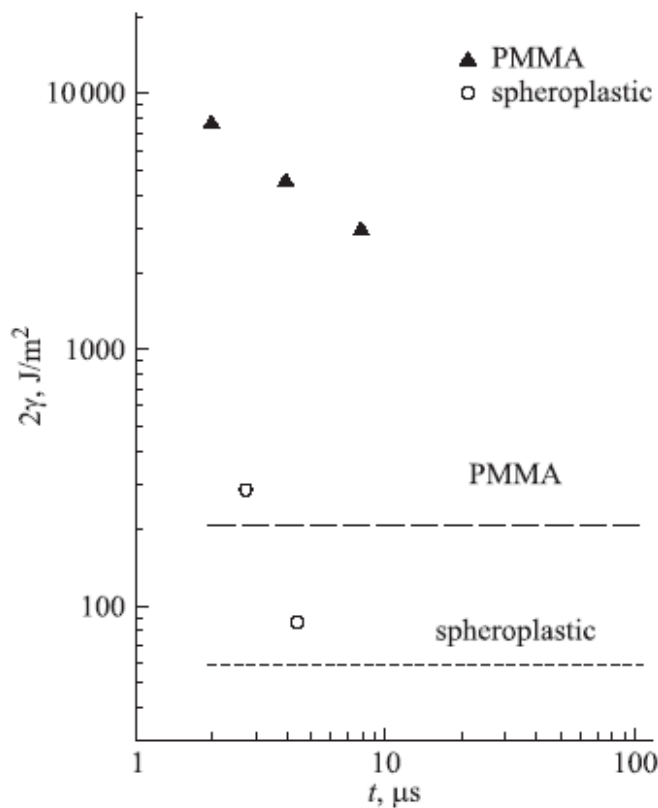


Рис. 4. Динамический аналог константы Гриффитса для ПММА и сферопластика (пунктир – данные квазистатических испытаний)



Окончание главы посвящено обоснованию принципа равных мощностей при многоуровневом разрушении твердых тел [5,6]. Этот принцип заключается в том, что динамическое разрушение материалов на различных структурно-масштабных уровнях может быть охарактеризовано постоянством «средней мощности», представляющей собой отношение характерной энергии, затрачиваемой на разрушение структурного элемента на данном масштабном уровне, к соответствующему инкубационному периоду, определяемому «квантом разрушения».

$$\frac{Q_1}{\tau_1} = \frac{Q_2}{\tau_2} = \dots = \frac{Q_i}{\tau_i} = \dots = const, \quad (4.5)$$

где  $Q_i$  – характерная энергия «активации» процесса разрушения, а  $\tau_i$  – инкубационное время на  $i$ -м масштабном уровне. Частный вариант этого принципа был выдвинут при анализе аномальных температур плавления при ударно-волновом нагружении (Петров Ю.В, Ситникова Е.В. 2005). В работе показывается справедливость соотношения (4.5) при хрупком разрушении линейно-упругих твёрдых тел.

**В пятой главе** рассматриваются температурно-временное соответствие для текучести металлов, проблема определения критической температуры и скорости хрупко-вязкого перехода, а также обобщения критериев вида (1.3) на случай иерархии характерных времен релаксации.

Рассмотрена гипотеза об эквивалентности понижения температуры и повышения скорости деформации, являющейся частным случаем принципа температурно-временного соответствия (time-temperature superposition principle), который первоначально был сформулирован для полимеров. Суть этого принципа заключается в предположении, что изменение температуры можно учесть, изменяя временной масштаб процессов.

Учет влияния температуры производился введением температурных зависимостей параметров критерия (2.2). Предлагаемые зависимости достаточно хорошо известны, их аналоги используются другими авторами:

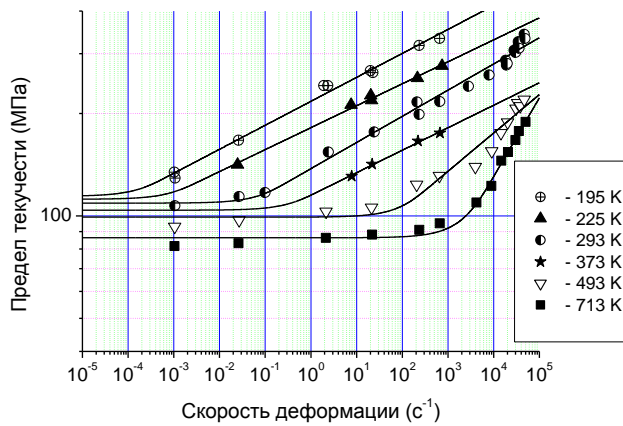
$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{T}{T_p}\right), \quad (5.1)$$

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U}{kT}\right), \quad (5.2)$$

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)\right) \text{ или } \alpha = \alpha_0 \exp\left(-\frac{T}{T_m}\right), \quad (5.3)$$

где  $T$  - абсолютная температура,  $k$  - постоянная Больцмана, остальные величины – константы материала. Критерий (2.2), дополненный зависимостями (5.1-5.3), позволяет получить хорошее соответствие с экспериментальными данными для многих металлов, причем в широком диапазоне изменения скоростей деформации и температуры (рис.5,6).

а)



б)

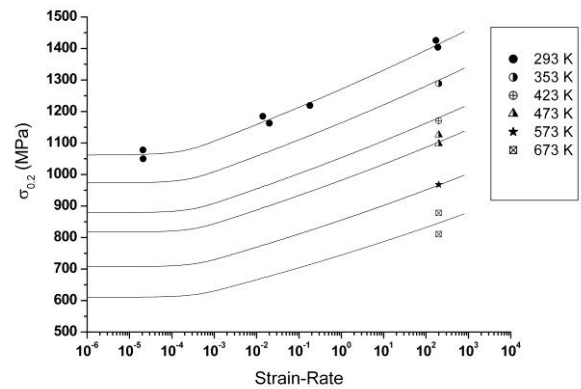
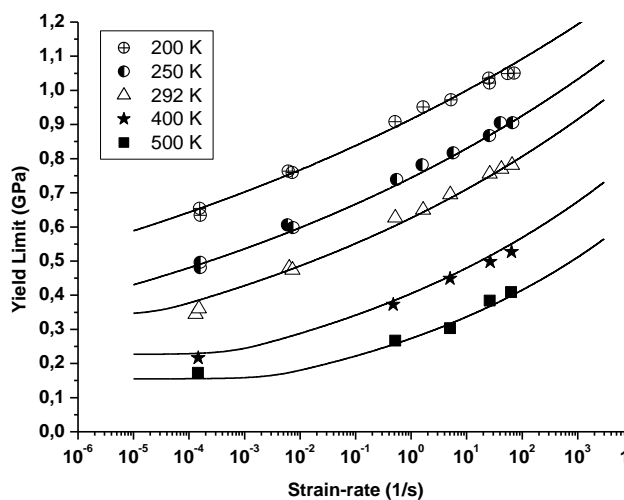


Рис. 5 Зависимость предела текучести от скорости деформации и температуры для мягкой стали (а) и титанового сплава Ti-6-22-22S (б)

a)



б)

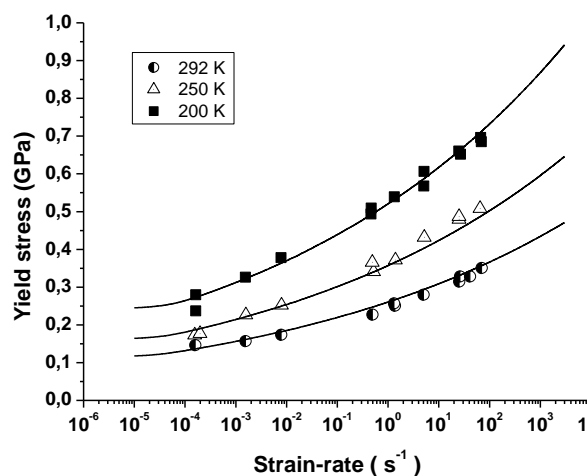


Рис. 6 Предел текучести при различных скоростях деформации и температурах (сопоставление расчетных кривых с экспериментом) для молибдена (а) и ниобия (б)

В работе обращается внимание, что уменьшение параметра  $\alpha$  с ростом температуры отражается изменением наклона расчетных диаграмм. Экстраполяция этих зависимостей в область сверхвысоких скоростей нагружения приводит к пересечению диаграмм и, следовательно, к инвертированию температурной зависимости предела текучести (рис. 7).

В недавних экспериментальных работах (Г.И. Канель и др. 2003) этот эффект получил прямое экспериментальное подтверждение. На рис. 8 приводится сопоставление температурной зависимости предела текучести, рассчитанной формулам (2.2), (5.1-5.3) с экспериментальными данными для монокристаллов алюминия.

Таким образом, в рамках единой модели, включающей общепринятые температурные зависимости параметров удастся объяснить как обычное температурное разупрочнение, так и «аномальное» повышение предела текучести с ростом температуры.

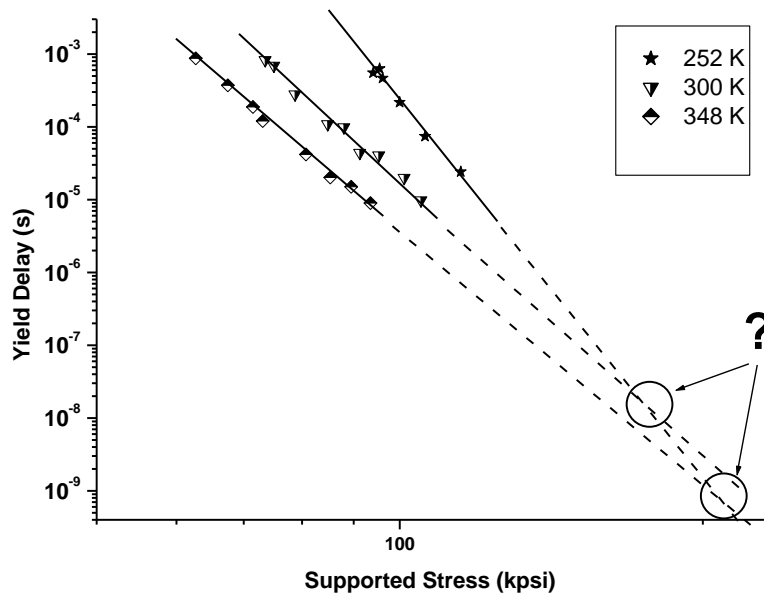


Рис. 7. Экстраполяция зависимостей задержки текучести мягкой стали от величины приложенного напряжения (эксперимент – Kraft, Sullivan 1959).

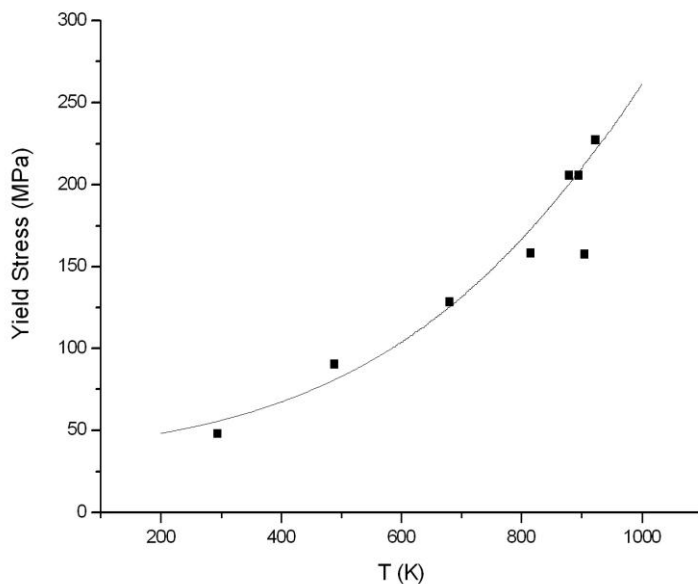


Рис. 8. Температурная зависимость предела текучести монокристаллов алюминия при ударном нагружении (экспериментальные данные: Г.И. Канель и др. 2003).

Совместное использование критериев хрупкого разрушения и текучести позволяет предсказывать тип разрушения и определять критическую скорость

нагрузки, соответствующую хрупко-вязкому переходу. За основу берется представление о хрупко-вязком переходе, как о результате конкуренции двух механизмов. В первом приближении можно пренебречь взаимным влиянием процессов и рассчитать независимо сопротивление хрупкому отрыву и пластическому сдвигу. Такой подход впервые был предложен П. Людвигом (1924) и А.Ф. Иоффе (1929), разрабатывался многими исследователями и к настоящему моменту является общепринятым. В данной работе используется модификация данного подхода. Предлагается сопоставлять между собой рассчитанные на основе развимаемого в работе подхода задержку текучести ( $t_Y$ ) и задержку разрушения ( $t_*$ ). На рисунке 9 показано решение модельной задачи о растяжении стержня при постоянной скорости деформации. Расчет проводился для гипотетического материала с параметрами характерными для легированных сталей.

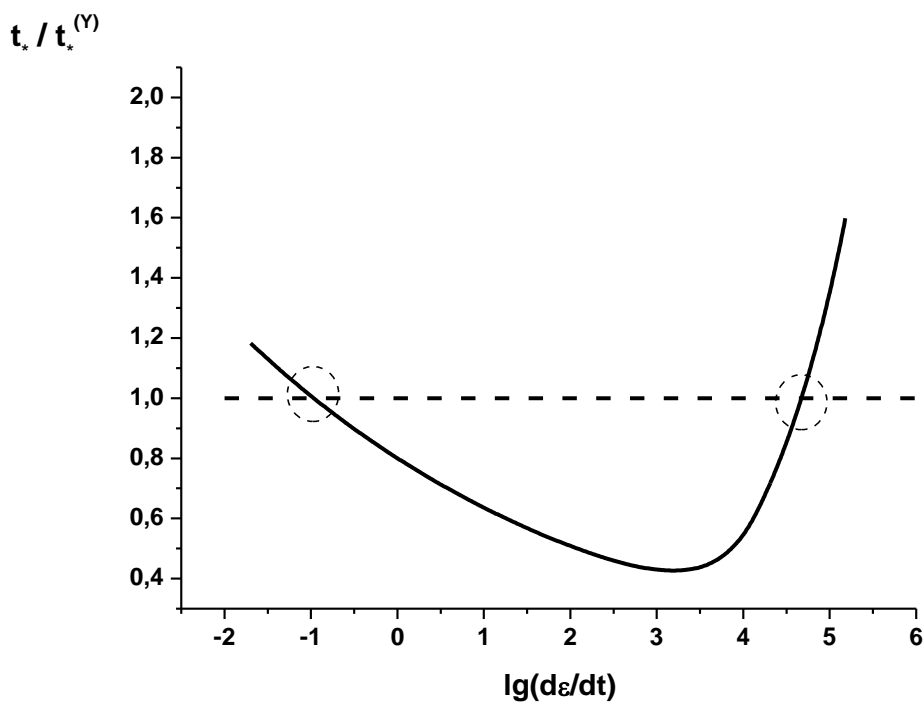


Рис. 9. Зависимость типа разрушения от скорости деформации. Диапазон  $t_*/t_Y < 1$  соответствует хрупкому разрушению.

Результаты расчета предсказывают диапазон скоростей, в котором хрупкое разрушение наиболее вероятно. При дальнейшем увеличении скорости де-

формации предсказывается улучшение пластических свойств. Этот несколько неожиданный вывод качественно подтверждается некоторыми экспериментальными данными (J.F. Kalthof 1987, А.П. Ващенко 1992, Г.В. Степанов 1991 и др.) и численными расчетами, проводимыми методами молекулярной динамики. Для большинства металлов весь диапазон скоростей соответствует вязкому разрушению. В этом случае точка минимума на рис. 9 может интерпретироваться как точка наихудшей пластичности. Для некоторых материалов существование такой точки имеет экспериментальное подтверждение (для стали M. Stelly 1982, для тантала J.C. Gianotta et al. 1985).

Температурные зависимости (5.1-5.3) позволяют при фиксированной скорости деформации определять критическую температуру хрупко-вязкого перехода (точку хладноломкости). Предложенная модель предсказывает известное явление повышения температуры хладноломкости при повышении скорости деформации. В рамках этой модели находит объяснение и неожиданный эффект высокотемпературного охрупчивания. Он может являться следствием инвертирования температурной зависимости предела текучести в области высоких скоростей деформации (см. рис. 8).

Разрабатываемые критерии прочности, текучести, кавитации вида (1.3) связаны с предположением о том, что можно выделить одно характерное время релаксации. В работе анализируется возможность обобщения этих критериев на случай произвольного спектра времен релаксаций. В принципе в реальной ситуации мы всегда имеем дело с результирующим влиянием нескольких процессов. Поскольку функция затухания памяти в (1.2) предполагается неотрицательной, монотонной и имеющей конечный интеграл на положительной полуоси, она с некоторой степенью точности может быть приближена затухающей экспонентой или даже кусочно-постоянной функцией, как в (1.3). В этом случае «инкубационное время» имеет смысл усредненного времени релаксации, характеризующего весь спектр затухания памяти.

Тем не менее, это ограничение может помешать описать в рамках одной модели весь диапазон скоростей нагружения, а использование усредненных

характеристик может затушевывать особенности поведения материала в том или ином диапазоне длительности воздействия. Тем более что в ряде случаев мы заведомо имеем дело с результирующим влиянием процессов, имеющих различные временные характеристики. Так, например, J.M. Galligan et al. (1988) приводят экспериментальные свидетельства о бимодальном характере релаксации напряжений при движении дислокаций в кристаллах для низких температур.

В работе предлагается следующее обобщение критерия инкубационного времени (1.3)

$$I(t) = \int_0^{+\infty} \varphi(p) \left( \int_{t-\frac{1}{p}}^t \sigma(s) \cdot H(s) \cdot ds \right) dp < \sigma_c. \quad (5.4)$$

где  $\sigma(t)$  - приложенное напряжение,  $\sigma_c$  - статический предел прочности,  $H(t)$  - функция Хевисайда. Спектральная функция  $\varphi(p)$  должна удовлетворять условию нормировки

$$\int_0^{+\infty} \frac{\varphi(p)}{p} dp = 1. \quad (5.5)$$

Функцию затухания памяти в (1.2) можно представить в виде:

$$K(t) = \int_0^{\frac{1}{t}} \varphi(p) dp.$$

Критерий инкубационного времени вида (1.3) получается из (5.4) при  $\varphi(p) = \frac{\delta(p\tau - 1)}{\tau}$ . В работе рассмотрен ряд вариантов выбора функции  $\varphi$  для случая дискретного и непрерывного спектра времен релаксаций.

Допустим, что процесс разрушения носит многоуровневый характер, причем каждый уровень характеризуется пороговым напряжением  $\sigma_k$  и характерным временем релаксации  $\tau_k$ . Тогда из (5.4) получается критерий прочности вида

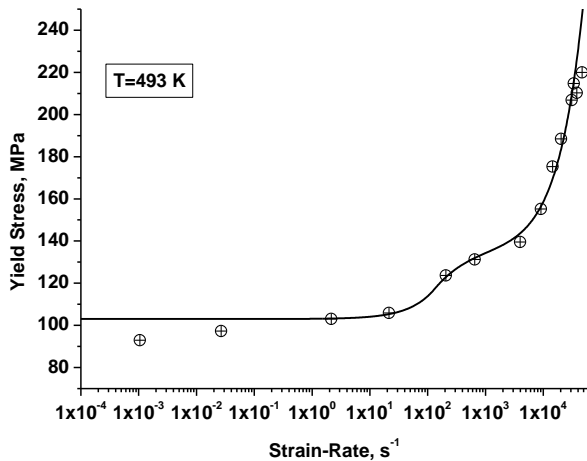
$$\sum_k \left( \frac{1}{\sigma_k} - \frac{1}{\sigma_{k+1}} \right) \cdot \frac{1}{\tau_k} \cdot \int_{t-\tau_k}^t \sigma(s) H(s) ds < 1. \quad (5.6)$$

В частности для двух уровней имеем

$$\left( \frac{1}{\sigma_1} - \frac{1}{\sigma_2} \right) \cdot \frac{1}{\tau_1} \cdot \int_{t-\tau_1}^t \sigma(s) H(s) ds + \frac{1}{\sigma_2} \cdot \frac{1}{\tau_2} \cdot \int_{t-\tau_2}^t \sigma(s) H(s) ds < 1. \quad (5.7)$$

Данный подход был применен к анализу динамической текучести металлов. На рисунке (10) показано сопоставление расчета по формуле (5.7) с экспериментальными данными для мягкой стали (Campbell J.D., Ferguson W.G. 1970) в линейных (б) и полулогарифмических (а) координатах.

а)



б)

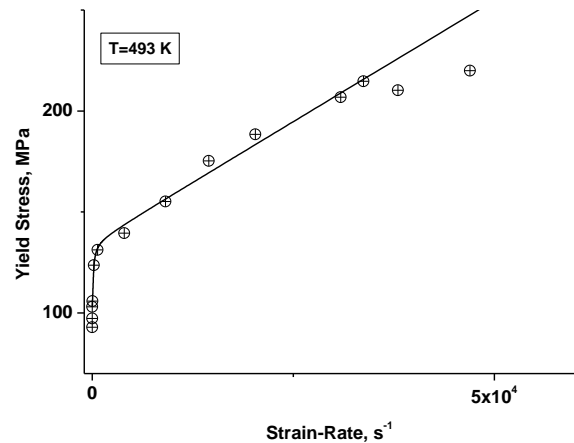


Рис. 10 Зависимость динамического предела текучести мягкой стали от скорости деформации. Расчет производился при  $\tau_1 = 4.5 \cdot 10^{-6} c$ ,  $\tau_2 = 2.4 \cdot 10^{-8} c$ ,  $\sigma_1 = 103 MPa$ ,  $\sigma_2 = 135 MPa$ .

Удовлетворительное соответствие наблюдается во всем диапазоне скоростей, в то время как модель с одним инкубационным временем давала значительные расхождения в области высоких скоростей деформации (см. рис. 1 а). Две пары точек, соответствующие самым низким (а) и самым высоким (б) скоростям, плохо ложатся на расчетные диаграммы. Ситуацию можно исправить ценой ухудшения аппроксимации промежуточных точек, но более правильным представляется объяснить несоответствие влиянием уровней, не учтенных в расчетах.



Проведенные расчеты показывают, что относительный вклад в общую релаксацию высокочастотной части спектра определяет наклон расчетных диаграмм, который в предшествующих расчетах задавался выбором значения параметра  $\alpha$  (рис. 1, 5-7). Различные масштабные уровни характеризуются различной энергией активации (см. зависимость (5.2)), это обстоятельство может объяснять убывание параметра  $\alpha$  с ростом температуры, формально задаваемую (5.3).

**В шестой главе** проводится планирование эксперимента и анализ данных по мартенситной неупругости никелида титана в условиях высокоскоростного нагружения. В результате обработки экспериментальных данных по трехточечному изгибу проволоочных образцов из никелида титана получена зависимость критического напряжения от длительности импульса (рис. 9).

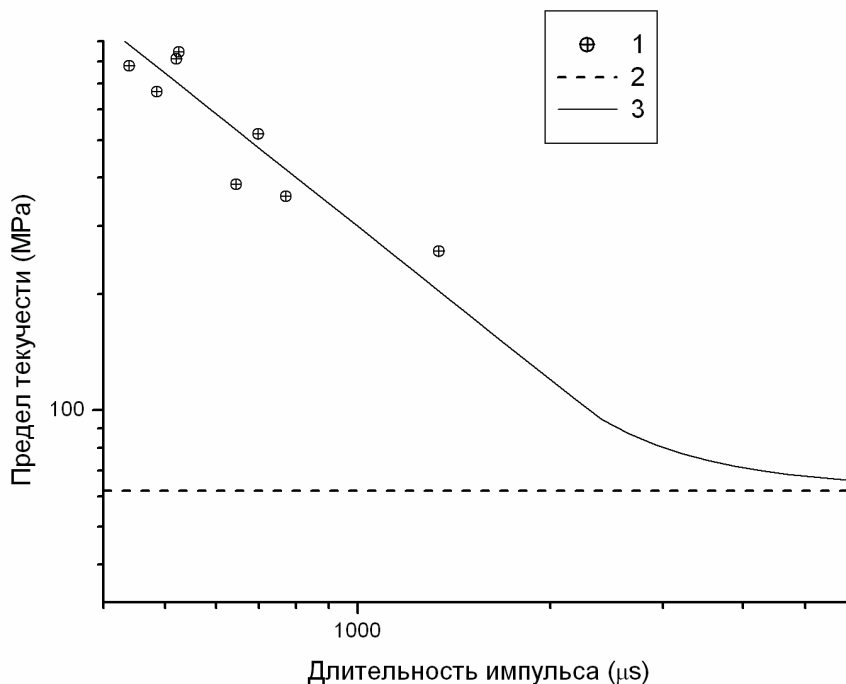


Рис. 9. Зависимость предела текучести никелида титана от длительности импульса: 1 – эксперименты на магнитно-импульсной установке, 2 – предел текучести в статическом тесте, 3 – расчет ( $\alpha = 0.76$ ,  $\tau = 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ c}$ ).

**В заключении** формулируются главные выводы работы.

В работе показано, что многие различные по своей физической сути процессы, объединяемые достаточно широким понятием «динамическое разрушение материалов», могут быть рассмотрены в рамках единого методологического подхода. Такие характеристики, как «статическая прочность» и «инкубационное время» носят достаточно универсальный характер.

Ранее подход, основанный на понятии инкубационного времени, показал свою эффективность для решения задач хрупкого разрушения твердых тел, что было показано в работах Н.Ф. Морозова, Ю.В. Петрова, А.А. Уткина. В данной работе показывается применимость этого подхода к более широкому классу явлений.

Приведенные в работе примеры расчетов показывают, что предлагаемые критерии, обладая достаточной универсальностью, являются относительно несложными и могут успешно применяться в практических расчетах, тем более что затруднений с определением параметров материалов по данным экспериментов обычно не возникает.

Совместное использование критериев хрупкого разрушения, текучести металлов, кавитации жидкостей, фазовых переходов позволяет решать задачи о смене типа разрушения, о разрушении твердых тел в жидких средах и др.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Груздков А.А., Петров Ю.В. О температурно-временном соответствии при высокоскоростном деформировании металлов // Доклады РАН т. 364, N 6, 1999, с. 766–768.
2. Груздков А.А., Петров Ю.В., Смирнов В.И. Инвариантная форма критерия динамической текучести металлов // Физика твердого тела, Т. 44, вып. 11, 2002 г., с. 62–64.
3. Груздков А.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В. Энергоемкость разрушения материалов в условиях импульсного нагружения микросекундной длительности // Физика твердого тела, Т. 45, вып. 5, 2003 г., с. 842–845.
4. Груздков А.А., Братов В.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В. Об энергетическом балансе при инициировании роста трещины в условиях импульсного нагружения // Доклады РАН - 2004.- Т. 395, № 4., с. 345-348.
5. Петров Ю.В., Груздков А.А., Морозов Н.Ф. Принцип равной мощности при многоуровневом разрушении сплошных сред // Доклады РАН - 2005.- Т. 404, № 1., с. 41-44.
6. Груздков А.А., Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Принцип равной мощности при многоуровневом динамическом разрушении твердых тел // Известия РАН. Механика твердого тела N 6, 2006. –с. 167-172.
7. Груздков А.А., Петров Ю.В., Ситникова Е.В. Аномальное поведение предела текучести при повышении температуры в условиях высокоскоростного деформирования // Доклады РАН - 2007.-т. 417, с. 493-496.
8. Груздков А.А., Петров Ю.В. Кавитационное разрушение жидкостей с большой и малой вязкостью // Журнал технической физики, 2008, т. 78, № 3, с. 6-10.
9. Груздков А.А., Казаринцев Н.А., Петров Ю.В. Особенности динамического разрушения дискретных одномерных цепочек // Доклады Академии Наук, 2008, т. 423, № 1, с. 51-55.

### Другие публикации

10. Груздков А.А., Петров Ю.В. О едином критерии текучести металлов при медленном и высокоскоростном нагружении // Тр. 1 Всес. конф. "Технологические проблемы прочности несущих конструкций". Запорожье: 1991. Т. 1, ч. 2. С. 287–293.
11. A.Gruzdkov Yield criteria for both quasistatic and high-strain-rate deformation of metals // EUROMECH June 1992, St.Petersburg, 1992.
12. Груздков А.А., Орешенков А.И., Петров Ю.В. Критерии текучести металлов при высокоскоростном нагружении. Препринт. СПб.: Институт проблем машиноведения РАН, – 1995.– 34 с.
13. Груздков А.А., Morozov N., Petrov Y. On the Time-Temperature Correspondence for Yield Stress during the Dynamic Deformation of Metals. // Proc. of the TSM Fall Meeting'98. Chicago, Illinois, 1998. – P. 96-97.
14. A.Gruzdkov, Y.Petrov Consideration of the Brittle-to-Ductile Transition Accompanying the Fracture of Solids on the Basis of Incubation Time Concept // Proc. of 18-th International Conf. "Mathematical Modelling in Solid Mechanics by Boundary and Finite Element Methods", May 16-20, 2000, St.-Petersburg, Russia, Vol. 1. St.-Petersburg, 2000. – pp. 36-37.
15. Груздков А.А., Бесов А.С., Уткин А.А. Динамический критерий кавитации // Вторые Поляховские чтения. Избранные труды. Санкт-Петербург, Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2000.– с. 135–143.
16. Груздков А.А., Петров Ю.В. О температурно-временном соответствии текучести и разрушения металлов // Актуальные проблемы механики, прочности и теплопроводности при низких температурах: Тезисы докладов VII научно-технической конференции. Санкт-Петербург, СПбГУНТИПТ, 2001, с. 70–72.
17. Груздков А.А. Моделирование эффектов динамической текучести на основе понятия инкубационного времени // Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Пермь, 23–29 августа 2001. Аннотации докладов. Екатеринбург: УрО РАН, 2001.– с. 212.

18. Груздков А.А., Кривошеев С.И., Разов А.И., Петров А.А., Петров Ю.В., Федоровский Г.Д. Функционально-механические свойства сплава TiNi при высокоскоростном магнитно-импульсном нагружении // Структура и свойства перспективных металлов и сплавов/ Труды XL международного семинара «Актуальные проблемы прочности», 30 сент.- 4 окт. 2002 г., Великий Новгород.-Великий Новгород, 2003, с. 56-60.
19. Груздков А.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В., Разов А.И., Уткин А.А., Федоровский Г.Д. Об исследовании функционально-механических свойств сплава TiNi при статических и ударных динамических испытаниях малых образцов // Третьи поляховские чтения: Избранные труды международной научной конференции по механике, Санкт-Петербург, 4-6 февраля 2003 г. – СПб.: изд-во НИИХ С.-Петербургского университета, 2003. – с. 249-253.
20. Груздков А.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В., Разов А.И., Федоровский Г.Д. Изучение динамической неупругости никелида титана // XXI Международная конференция Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов 4 –7 октября, 2005 Санкт-Петербург. Труды. Том 2 (Доклады конференции), с. 207-212.
21. A. Gruzdkov, N. Morozov , Y. Petrov Dynamic loading. Transition between ductile and brittle fracture. Influence of temperature. // Proc. of 6<sup>th</sup> International Congress on Thermal Stresses, Vienna, Austria, May 2005, Vol. 1, pp. 261-264.
22. Груздков А.А., Волков Г.А., Петров Ю.В. Анализ акустической кавитации на основе понятия инкубационного времени // Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование: материалы третьей международной летней научной школы.- Кемерово: ИНТ, 2006. – с. 341-344.
23. Груздков А.А., Дмитровская И.В., Петров Ю.В. Характеристики кавитационной прочности для жидкостей с большой и малой вязкостью // Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование: материалы третьей международной летней научной школы.- Кемерово: ИНТ, 2006. – с.359-364.

24. Груздков А.А. Прогнозирование эффектов динамической текучести на основе понятия инкубационного времени // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Т. III (Нижний Новгород 22-28 июня 2006). Нижний Новгород, изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2006. –с. 77-78.
25. A. Gruzdkov, N. Morozov , Y. Petrov Temporal and Thermal effects in dynamic yielding // The 2-nd International Symposium “Physics and Mechanics of Large Plastic Strains” 4-9 June, 2007, St.-Petersburg, CRISM “Prometej”, p. 125.
26. Груздков А.А., Петров Ю.В., Ситникова Е.В. Моделирование температурных эффектов при высокоскоростном нагружении металлов // 5-й Российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах». Новый Афон, 23 июля – 1 августа 2007. Тезисы докладов. ИПХФ РАН, 2007, с. 18.
27. A. Gruzdkov, N. Morozov , Y. Petrov Thermal Problems In Dynamic Fracture // Proc. of 7<sup>th</sup> International Congress on Thermal Stresses, Tai Pai, Taiwan, June 4-7, 2007, Vol. 1, pp 247-250.
28. Волков Г.А., Груздков А.А., Петров Ю.В. Критерий инкубационного времени и акустическая прочность морской воды // Акустический журнал, 2007, т. 53, № 2, с. 149-152.
29. Груздков А.А., Волков Г.А., Петров Ю.В. Инкубационное время в задачах динамической прочности // 6-ой Российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах», Новый Афон 23 июля-2 августа 2008. Тезисы докладов, ОИФТ, 2008, с. 1.
30. Gruzdkov A, Krivosheev S, Petrov Yu., Razov A., Utkin A. Martensitic inelasticity of TiNi-shape memory alloy under pulsed loading // Materials Science and Engineering A481-482, 2008, p. 105-108.
31. Gruzdkov A, Sitnikova E, Morozov N, Petrov Y. Thermal effect in dynamic yielding and fracture of metals and alloys // Mathematics and Mechanics of Solids Vol. 14, N 1-2, 2009, pp. 72-87.