

Рис. 4

Численное моделирование. Распределение скорости продольного градиента скорости, диаметра и температуры струи играет важную роль в формировании структуры полимерного волокна [2, 3], поэтому по предложенной модели рассчитаны эти величины, которые получены решением системы уравнений (9), (10). Результаты вычислений представлены на рис. 2 и 4. На рис. 2 линиями 1—3 соответственно показана зависимость скорости нити v , разности скорости воздуха и нити Δv и градиента скорости нити dv/dx от координаты x . На рис. 4 представлено распределение диаметра D и температуры T (линии 1, 2) струи по координате x . На рис. 2, 4 для сравнения приведены экспериментальные данные из [4—6]. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчета, проведенного по предлагаемой математической модели, и эксперимента, что свидетельствует об адекватности предложенной математической модели.

При предложенном выборе граничных условий возможен расчет параметров струи при различных условиях ее движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kase S., Matsuo T. Studies on melt spinning. 1. Fundamental equations on the dynamics of melt spinning // J. Polymer Sci. — 1965. — V. A3, N 7.
2. Зябицкий А. Теоретические основы формования волокон. — М.: Химия, 1979.
3. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров. — М.: Химия, 1979.
4. Генис А.В., Фильберт Д.В., Синдеев А.А. Аэродинамическое формование волокон из расплава // Хим. волокно. — 1978. — № 1. — С. 7—10.
5. Генис А.В., Фильберт Д.В., Синдеев А.А. Баланс сил при аэродинамическом формировании нитей из расплава полипропилена // Хим. волокно. — 1978. — № 3. — С. 27—29.
6. Генис А.В., Фильберт Д.В., Синдеев А.А., Коровицын О.Г. Охлаждение нити при аэродинамическом формировании нитей из расплава полимера // Хим. волокно. — 1978. — № 5. — С. 30—32.
7. Жиганов Н.К., Янков В.И., Алексеев Е.И., Генис А.В. Математическая модель аэродинамического способа формования волокон из расплавов полимеров // Хим. волокно. — 1988. — № 4. — С. 18—20.
8. Елисеев В.И., Флеер Л.А. Сопряженная задача аэродинамического вытягивания струй нагретой вязкой жидкости // ПМТФ. — 1988. — № 6. — С. 148—153.
9. Иванюков Д.В., Фридман М.Л. Полипропилен. — М.: Химия, 1974.
10. Таблицы физических величин. Справочник. — М.: Атомиздат, 1976.

г. Тверь

Поступила 15/VI 1993 г.

УДК 624.539.4

А.Г. Иванов

ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ И МАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ

(обзор)

1. Введение. Фундаментальным достижением линейной механики разрушения (ЛМР), основанной на идее Гриффитса об условии перехода трещины в неустойчивое состояние, явилось признание факта: разрушение (разделение

© А.Г. Иванов, 1994

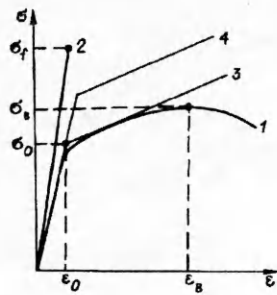


Рис. 1

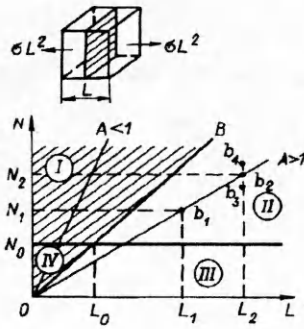


Рис. 2

целого на части) есть акт совершения работы. Эта работа выполняется упругой энергией (УЭ) деформации. Признание данного факта привело к критическому пересмотру критериев разрушения и разработке новых методов испытания материалов на прочность. Традиционные критерии прочности — критические значения напряжения σ_b , деформации ϵ_f или их комбинация — оказались недостаточными. Роль такой характеристики материала, как временное сопротивление σ_b , ограничилась узкой задачей сравнения материалов в стандартных испытаниях, а теоретическая прочность с энергетических позиций оказалась на 2—4 порядка меньше прочности реальных материалов [1]. Стало необходимым введение новых критериев разрушения, включающих удельную на единицу поверхности работу разрушения G_{lc} , употребляемому, как правило, в комбинации $G_{lc}E \sim K_{lc}^2$ (E — модуль Юнга, K_{lc} — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений).

Введение новых критериев разрушения потребовало разработки методов определения их. Традиционные критерии сопротивления материалов легко находились при определении диаграммы деформирования материала, являясь некоторыми особыми точками этой диаграммы (рис. 1). Для пластичных материалов это точка σ_b на линии 1, для хрупких — точка σ_f на линии 2. Линия 3 является аппроксимацией линии 2, принятой в данной работе, а линия 4 — то же, что линия 3, но для большей скорости деформирования. В ЛМР для получения величин 2γ , G_{lc} или K_{lc} , K_c и т.д., как правило, требуется проведение серии испытаний со специальными разномасштабными образцами.

Но, как бы не велики были успехи ЛМР и ее модификаций, хорошо известны и их узкие места и трудности, когда вопрос касается практического использования результатов исследований применительно к конкретным конструкциям. Об этом свидетельствуют периодически происходящие катастрофические разрушения крупногабаритных объектов, рассчитанных с соблюдением существующих норм прочности. Трудности использования ЛМР резко возрастают при описании высокоинтенсивного динамического разрушения, когда диагностика роста и развития дефектов структуры практически невозможна. Эти обстоятельства дают основания для поиска других путей и подходов к решению проблемы разрушения, отличных от локального рассмотрения принятых в ЛМР и в ее модификациях. Подобно тому, как знание законов развития единичного дерева еще не дает гарантии понимания процессов, управляемых лесным массивом, может оказаться, что, ограничившись локальным подходом ЛМР или ее модификаций, можно оставить вне поля зрения закономерности разрушения всей конструкции в целом или ее несущей части.

2. Интегральный подход в проблеме разрушения. Эксперименты по разрушению геометрически подобных (ГП) сосудов и оболочек при высокоскоростном динамическом нагружении в явном виде подтвердили существование сильных масштабных эффектов энергетической природы (МЭЭП). Эти

эффекты следуют из рассмотрения баланса УЭ и работы разрушения всего изучаемого объекта как необходимого условия разрушения. Далее такой подход назовем интегральным (ИП) в отличие от локального, используемого в ЛМР или в ее модификациях, где аналогичный баланс рассматривается в окрестности устья трещины.

Этот подход использован в [2] применительно к кубику материала с ребром L , растягиваемому за две противоположные грани с силой σL^2 . Закон деформирования материала без уменьшения общности рассмотрения был принят билинейным:

$$(2.1) \quad \sigma = \epsilon E \text{ при } \sigma \leq \sigma_0 \text{ и } \sigma = \sigma_0 + K(\epsilon - \sigma_0/E) \text{ при } \sigma > \sigma_0.$$

Здесь K и σ_0 — модуль упрочнения и предел упругости материала. Конечно, значение σ_0 у реальных материалов зависит и от скорости деформирования материала $\dot{\epsilon}$, и от изменения температуры T его, которая также может меняться за счет пластического течения. Однако эти эффекты при не слишком большом изменении масштаба, а также при рассмотрении разрушения в упругой или в начале упругопластической области невелики и могут быть учтены в виде поправок. Затем этот подход был распространен и на другие простейшие объекты.

Как наиболее важной для практики главное внимание уделялось упругой области деформирования. Здесь разрушения протекают хрупко за малые интервалы времени и работой внешних сил можно пренебречь. Это условие выполняется и при динамическом разрушении в пластической области деформирования. Однако для описания разрушения в данной области помимо учета затраты УЭ на пластическое течение и рост T необходимо учитывать возможное изменение G_c и упругих констант материала с увеличением деформации разрушения ϵ_f .

Для кубика материала отношение УЭ $L^3\sigma^2/2E$ к работе отрыва $L^2\lambda$ имеет вид

$$(2.2) \quad A = \sigma^2 L / (2\lambda E)$$

(λ — удельная работа отрыва материала, аналог 2γ , G_c в ЛМР). При $A \geq 1$ уравнения (2.2) — необходимое условие разрушения, а $A < 1$ — условие неразрушения. На плоскости $N - L$, где $N = 2\lambda E / \sigma^2$, лучи, исходящие из точки O (рис. 2), соответствуют состояниям с постоянным значением A . В области $A < 1$ (NOB) они отвечают состояниям с равными запасами прочности, а при $A \geq 1$ (BOL) — состояниям с одинаковой степенью риска возможного разрушения. Значению $\sigma = \sigma_0$ соответствует линия $N = N_0$, которая с лучом $A = 1$ делит плоскость на четыре характерные области. Пересечению N_0 и $A = 1$ отвечает $L = L_0$ — минимальное значение L , при котором возможно хрупкое (в упругой области) разрушение кубика. Это порог хрупкости материала

$$(2.3) \quad L_0 = 2\lambda E / \sigma_0^2.$$

Итак, переход материала в хрупкое состояние с увеличением размера объекта является его физическим свойством. Значение L_0 зависит от температуры T и скорости нагружения $\dot{\sigma}$ через σ_0 , а также и от напряженного состояния, в чем можно убедиться, заменив растяжение на сжатие. В этом случае σ_0 необходимо заменить на $\nu\sigma_0$ и значение L_0 возрастет в ν^{-2} раз. Так что напряжение, при котором происходит хрупкое разрушение, при сжатии в 10—20 раз превышает напряжение растяжения. Значения L_0 при статическом растяжении и $T \sim 300$ К для меди, нержавеющей стали, мягкой стали, закаленной стали, оргстекла и силикатного стекла составляют соответственно 8,3; 1,5; 0,6; 0,05; 0,006 и 10^{-6} м, а вид записи L_0 совпадает с формулой пластической поправки Ирвина [3].

Из четырех областей рис. 2 в области II возможны хрупкие разрушения. Так, если состояния b_1 и b_2 двух кубиков с ребрами L_1 и L_2 лежат на луче с одинаковой степенью риска разрушения, то при разрушении кубиков в соответствии с (2.2) будут проявляться МЭЭП:

$$(2.4) \quad \sigma_1/\sigma_2 = (L_2/L_1)^{1/2} \text{ или } \sigma \sim L^{-1/2}.$$

В общем случае, если состояния разрушаемых кубиков лежат на лучах разного риска, проявление МЭЭП может быть несколько слабее (точки b_1, b_3) или сильнее (точки b_1, b_4), чем следует из (2.4).

Прогнозирует ли ЛМР и ее модификации проявление МЭЭП? В явном виде нет. Так, в [4] для пластины шириной L с центральным разрезом $2l$ имеем

$$(2.5) \quad K_c = \sigma \sqrt{L \lg(\pi l/L)}.$$

Следуя ЛМР и считая разрез случайной величиной, не зависящей от L , разложив в ряд (2.4), получим

$$K_c = \sigma \sqrt{l\pi [1 + (\pi l/L)^2/3 + \dots]}.$$

Таким образом, влияние L выражается поправкой 2-го порядка малости. Такой же результат следует и при рассмотрении других видов трещин (разрезов). Конечно, наложение дополнительного ограничения в рамках ЛМР ($l/L = \text{const}$) приводит уравнение (2.5) к (2.4), т.е. к МЭЭП, но одновременно сводит общее статистическое рассмотрение вопроса к частному маловероятному событию. С другой стороны, это ограничение превращает дефект в присущую объекту конкретную особенность, а само рассмотрение — в ИП [5].

Остановимся еще на одном примере, приводящем к МЭЭП при использовании Г-интеграла в нелинейной механике разрушения. В [6] получено условие неразрушения трубопроводов. Анализ его показал, что при отбрасывании несущественных членов решение приводит к МЭЭП. Это решение элементарно следует из ИП [7]:

$$\sigma_0 < \{E\lambda / [\pi R(1 - \nu^2)]\}^{1/2}$$

(σ_0, ν — окружное напряжение и коэффициент Пуассона). Рассмотренные выше частные примеры, которые приводят к МЭЭП, дают основание надеяться, что условие (2.4) будет присуще всем решениям подобных задач ЛМР или ее модификаций.

Таким образом, масштабный эффект (МЭ), впервые экспериментально установленный Галилеем при разрушении геометрически подобных галер, квалифицированный им как само свойство материи, при использовании энергетического критерия разрушения приобретает четкое физическое обоснование как проявление МЭЭП.

Переход в область пластического деформирования по мере роста ϵ сопровождается резким увеличением затраты работы на пластическое течение. Последнее приводит к росту дефектов структуры материала в его объеме. На этом этапе могут претерпевать существенные изменения величины $\lambda, \nu, \sigma_0, E$. Доля УЭ по отношению к затраченной работе на пластическое течение резко падает. Поэтому затраты УЭ на объединение рассеянных дефектов в магистральную трещину оказываются относительно малыми. Такая ситуация эквивалентна отсутствию МЭЭП, что и подтверждается при разрушении материалов вдали от предела текучести в статических испытаниях.

3. Динамическое разрушение. Интенсивное импульсное нагружение ГП-объектов с одновременным выполнением требования подобия нагружающих машин весьма успешно реализуется при использовании взрыва зарядов взрывчатого вещества (ВВ) [1]. Для ГП-оболочек с центрально- или осесимметричным нагружением расчет действия взрыва ВВ может быть проведен в приближении короткого удара. В этом случае в упругой области де-

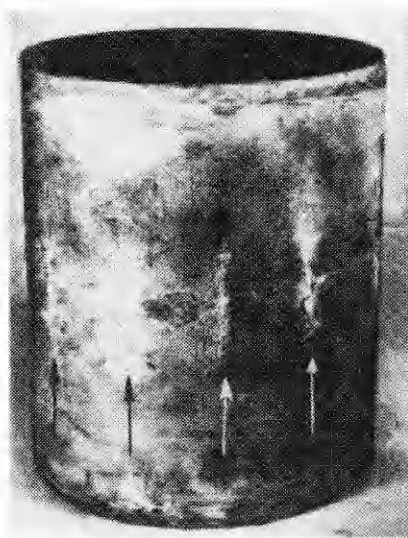


Рис. 3

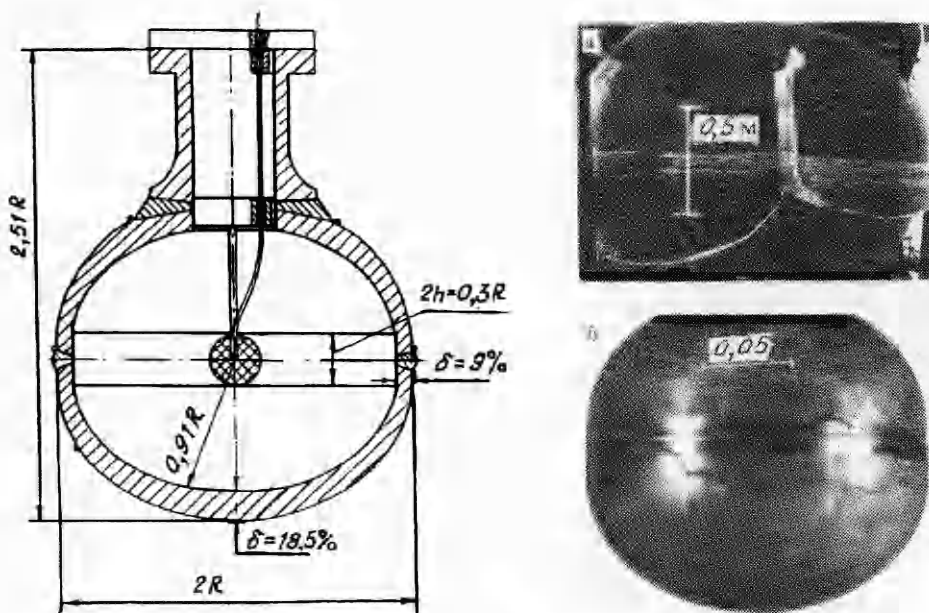
формирования величины σ и ϵ в подобные моменты времени будут пропорциональны ξ , где ξ — отношение веса заряда ВВ к весу конструкции (или ее некоторой части). Поэтому ξ может рассматриваться как аналог давления при статическом режиме нагружения. После перехода в пластическую область деформирования рост σ резко замедляется, так как $E \gg K$. Зависимость $\sigma(\epsilon)$ будет слабой, и целесообразней перейти к зависимости $\epsilon(\xi)$.

При динамическом нагружении с повышением скорости нагружения $\dot{\sigma}$ в большей мере начинают проявляться волновые процессы. Все в меньшей мере сказываются связи объекта с внешней средой, и порой сам объект выступает не как одно целое, а как система автономных областей, в которых процессы разрушения локализованы и независимы. В ряде случаев динамическое нагружение позволяет более наглядно проследить физические закономерности, приводящие к разрушению.

Исследования при динамическом нагружении показывают, что выполнение необходимого условия разрушения фактически влечет за собой и выполнение условия достаточности. Последнее, по-видимому, вызвано интенсивным ростом дефектов из-за многократного отражения и взаимодействия волн сжатия и разрежения, особенно, если объект деформируется в области пластического течения. Это не означает, конечно, что при динамическом нагружении исходные дефекты материала, концентраторы напряжения и т.п. не влияют на несущую способность объекта. Как и при статическом нагружении, они будут уменьшать несущую способность объекта и приводить к разрушению при меньших значениях A (в пределе $A = 1$), и наоборот. Объект, лишенный таких дефектов, работоспособен и при $A \gg 1$, однако разрушаться он будет более бурно, на большее число осколков, более катастрофически. Рассмотрим некоторые примеры.

А. При внутреннем импульсном нагружении тонкой цилиндрической или сферической оболочки при $\sigma < \sigma_0$ радиальные колебания оказываются неустойчивыми и переходят в изгибные формы. Упругокинетическая энергия оболочки перераспределяется, и ее плотность оказывается зависящей от угла: максимальное значение в пучностях волн, минимальное в узлах. Так, на цилиндрической стеклопластиковой оболочке с относительной толщиной $\delta \sim 5\%$ укладывается шесть волн. Ее разрушение происходит одновременно по 12 меридиональным плоскостям. Они соответствуют пучностям изгибных волн, где плотность УЭ более чем в 6 раз превышает ее первоначальное значение радиальных колебаний (рис. 3). С увеличением δ число изгибных волн падает, а при переходе к толстостенным оболочкам более сложной формы их реакция на импульсную нагрузку становится менее очевидной [8].

Б. Особый интерес представляет высокоскоростное разрушение при одномерной деформации — откол. Такие разрушения зарождаются одновременно в громадном количестве очагов и протекают практически синхронно по некоторой поверхности. В предельном случае (при взаимодействии ударных волн разрежения) шероховатость поверхности отрыва близка к зеркальной, а количество очагов разрушения оценивается как $\sim 10^8$ на 1 см^2 [9]. Так как при таком разрушении запас УЭ определяется длиной нагружающего импульса ($\sim L^1$), а работа отрыва не зависит от линейного размера ($\sim L^0$), при отколе должны проявляться МЭЭП [10, 11]. Одномерность деформации и высокоскоростное нагружение резко снижают значение L_0 , так что разрушение даже типично пластичных материалов протекает хрупко [9]. Наблюдается и МЭЭП. Однако интенсивность его несколько слабее (2.4), что вызвано



Р и с. 4

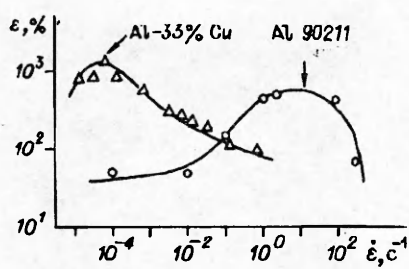
зависимостью $\lambda(L)$. При уменьшении L до межатомного расстояния значение λ должно уменьшаться до удвоенного значения поверхностного натяжения [1]. Таким образом, даже столь специфичное разрушение, как откол, логически вписывается в энергетическую феноменологию разрушения.

Среди других способов описания откола интересна попытка описания его с позиций кинетической концепции прочности. Откольное разрушение рассматривается как продолжение единой кривой долговечности материала в область интервалов времени нахождения под нагрузкой $\tau < 10^{-4}$ с. Такое описание вряд ли приемлемо по следующим причинам: 1) переход из области долговечности $\tau > 10^{-4}$ с (статическая часть) в область $\tau < 10^{-5}$ с сопровождается возрастанием энергии активации разрушения U в 3—6 раз [10], фактически такой скачок U представляется подозрительным; 2) часть кривой при $\tau > 10^{-4}$ с описывается формулой

$$\tau = \tau_0 \exp[(U - \gamma_0 \sigma) / kT],$$

из структуры которой и размерности входящих в нее констант U , γ_0 следует, что она описывает только подготовительную стадию разрушения (накопление повреждений в объеме материала), в то время как интервал времени второй (основной) стадии разрушения мал по сравнению с первой, ветвь же линии $\tau < 10^{-5}$ с отвечает основной стадии разрушения, а именно прохождению трещины по некоторой поверхности; таким образом, вряд ли корректно объединять эти ветви в единую кривую; 3) часть линии при $\tau < 10^{-5}$ с получена в условиях возможного проявления МЭЭП. Определение зависимости $\tau(\sigma)$ при $\tau > 10^{-4}$ с проведено на полосках материала постоянного сечения, где проявление МЭЭП исключено, что также не дает основания для их объединения. Поэтому и изображение зависимости $\tau(\sigma)$ в виде единой линии во всем интервале изменения τ от 10^4 до 10^{-8} с, как это сделано в [12], вряд ли корректно. Частично этот вопрос рассмотрен в [13].

В. Остановимся на разрушениях ГП-объектов в переходной упруго-пластической зоне. На рис. 4 приведены конструкция сосуда, схема его взрывного нагружения и фотографии двух разрушенных ГП-сосудов разного размера ($R = 1$ и $0,1$ м (а, б)) [14]. Проведенное исследование показало, что для сосуда заданного радиуса, если не учитывать возможность проявления МЭЭП, нельзя заранее ответить на ряд вопросов. Какова несущая способность



Р и с. 5

сосуда? Где его слабое место? Каков характер разрушения (хрупкий, катастрофический или вязкий, ленивый)? Так, уменьшение R в 10 раз (от 1 до 0,1 м) привело к увеличению ξ в 5—8 раз, к смене «слабого» места (старт трещины от кромки горловины сменился на разрушение наиболее тонкой экваториальной области стенки сосуда), к смене хрупкого разрушения на вязкое. При этом значение σ увеличилось от 0,18 до 0,54 ГПа, а ϵ_j от 0,11 до 0,62 %.

Сильное проявление МЭЭП наблюдалось и при взрывном разрушении других ГП-объектов. Так, в [15] дано описание разрушения толстостенных сосудов, заполненных воздухом ($P = 1$ атм), при уменьшении радиуса в 15 раз. При этом значение ξ возросло в 15,7 раза. В [16] проявление МЭЭП наблюдалось при высокоскоростном схлопывании труб.

Г. Использование ИП позволило провести оценочные расчеты разрушения в глубокой пластике радиально разлетающегося тонкого кольца со скоростью $v = \text{const}$ [17]. В соответствии с ИП каких-либо ограничений на механизм развития разрушения не накладывалось. Считалось, что одновременно с началом движения кольца в ряде сечений начинался процесс разрушения и что последний протекал за счет УЭ, снимаемой волнами разгрузки, которые расходились от сечений разрушения. Если сечения, где развивались разрушения, достаточно близки, так что происходит наложение волн разгрузки, развитие разрушения в этих сечениях замораживается. Величина деформации перед разрушением определялась интервалом времени снятия УЭ, необходимой для разрушения. Процесс разрушения мог протекать независимо в ряде сечений. Уравнение движения кольца до разрушения имеет вид

$$\mu^2 \dot{\epsilon}^2 \epsilon (\epsilon + 2) / 2 + \dot{\epsilon} (2\mu\epsilon - \alpha) + \ln(\epsilon + 1) = 0,$$

где $\mu = \mu / \sigma_0$; $\alpha = 4E\lambda / (3c\sigma_0^2)$; $\dot{\epsilon} = v/R$; η — вязкость материала. Найденное решение для вязкого пластичного материала прогнозирует максимум в зависимости $\epsilon(\dot{\epsilon})$, который реализуется при равенстве прочностных и вязких сил. Для ряда материалов этот максимум обнаружен в [17—20]. Максимумы в зависимости $\epsilon(\dot{\epsilon})$, смещенные в область низких значений $\dot{\epsilon}$, наблюдаются и при сверхпластичности, как это следует из рис. 5 работы [21]. В [19] аналогичным способом найдено решение для сферических оболочек:

$$\mu^2 \dot{\epsilon}^2 [1 - (1 + \epsilon)^3] / 3 + \dot{\epsilon} [\alpha - \epsilon\mu(\epsilon + 2)] - \epsilon = 0.$$

Физическая природа максимума вызвана резким ростом УЭ деформирования с включением вязких сил. Поэтому уменьшается окрестность, с которой снимается необходимая для разрушения УЭ, и соответственно уменьшаются время и смещение оболочки перед разрушением. Дальнейшее развитие этого подхода [22] позволило рассмотреть более общее уравнение деформирования материала, перейти к описанию дробления оболочки и распада кумулятивной струи. Рядом исследователей [23—26] принято, что работа разрушения непосредственно совершается за счет энергии инерционных сил. Анализ этого направления, проведенный на основе теоретических представлений и имеющегося эксперимента, отдает приоритет в описании явления за счет УЭ [27, 28]. Аналогичная ситуация, как показано в [11], справедлива и при описании разрушения отколом.

4. Пути ухода от МЭЭП. Ориентированные волокнистые композиты. Так как процесс конструирования новых объектов часто идет методом проб и ошибок, ряд рецептов ухода от МЭЭП найден эмпирически. Другие следуют из ИП. Убедимся в их правильности.

А. Рассмотрим расчет стальной тяги на усилие F . К сечению тяги S помимо традиционного требования $S \geq F/\sigma_0$ ИП накладывает еще ог-

раничение. Для исключения возможности хрупкого разрушения характерный размер тяги не должен превышать порога хрупкости $L_0 = 2\lambda E/\sigma_0$, для тяги цилиндрического сечения $S = \pi D^2/4$. Полагая диаметр $D = \varphi L_0$, получим условие неразрушения в упругой области деформирования:

$$(4.1) \quad S \leq \pi(\varphi E \lambda)^2 / \sigma_0^4.$$

Здесь φ — коэффициент пропорциональности при переходе L_0 от кубика к протяженному цилиндру.

Условие (11) эквивалентно тому, что использование новых прочных сталей для облегчения веса тяги возможно только при малых значениях S . Чтобы удовлетворить заданной величине F , тяга должна быть изготовлена из набора параллельных тяг малого сечения, удовлетворяющих (4.1). Но это известный всем канат.

Б. Другой попыткой ухода от хрупкого разрушения является использование многослойных сосудов или рулонированных труб. Такие конструкции лучше противостоят хрупким трещинам, чем из сплошного материала. Так, участки рулонированных труб в газопроводах используются для остановки быстро бегущих трещин. Их повышенная трещиностойкость подтверждается и в условиях интенсивного динамического нагружения [29]. Тем не менее прямые исследования с ГП-объектами из слоенных материалов при статических [30] и динамических [31] нагружениях показали существование МЭЭП, хотя и значительно более слабого, чем это ожидается для конструкций из сплошного материала. Так, увеличение размеров сплошных стальных труб в 4 раза снижает ϵ в 2—2,5 раза [32], а у рулонированных труб подобное увеличение в 10 раз (соответственно увеличение и количества слоев в 10 раз) снижает ϵ всего в 1,3 раза [32]. Причина существования хотя и ослабленного МЭ заключается, по-видимому, в наличии акустической связи между слоями. В случае каната она фактически отсутствует.

Заметим, что если при ГП-изменении масштаба рулонированной трубы или многослойной оболочки количество слоев оставить неизменным и соответственно изменить их толщины пропорционально изменению масштаба, то МЭЭП должен проявиться в полной мере.

В. Обратимся к важным для практики вопросам сооружения крупнобаритных объектов — сосудов давления, силовых оболочек и т.п. Выше приведены результаты экспериментов с ГП-объектами из сплошных материалов, иллюстрирующих проявление МЭЭП. В [33] на основе ИП рассмотрена возможность хрупкого разрушения тонкостенных сферических (4.2) и цилиндрических (4.3) оболочек в статическом ($2n = 1$) и динамическом режимах нагружения:

$$(4.2) \quad \sigma < \{(2n)^{1/2} E \lambda / [2R(1 - \nu)]\}^{1/2} \quad (n = 2,12(R/h)^{1/2} - 0,5);$$

$$(4.3) \quad \sigma < \{2n E \lambda / [\pi R(1 - \nu^2)]\}^{1/2}$$

(n находится из уравнения $n^2(n^2 - 1)^2 = 3(n^2 + 1)(R/h + 0,5)^2$, h — толщина оболочки). Как и следовало ожидать, конечные формулы могут быть записаны соотношением (2.4) или

$$(4.4) \quad \sigma^2 R < \text{const.}$$

Очевидно, что, если расчетное значение σ оказывается ниже σ_0 , а возможность хрупкого разрушения должна быть исключена, необходимо большой сосуд заменить на совокупность малых. Так, для увеличения σ в 2 раза следует R малых сосудов уменьшить в 4 раза. Для получения той же емкости, что у основного сферического сосуда, при том же расходе материала потребуются сооружение 16 геометрически подобных малых сосудов. Такое решение экономически вряд ли приемлемо. Однако, если исходная форма сосуда выбрана цилиндрической, уход от МЭЭП легко осуществим. Для этого достаточно при сохранении объема сосуда уменьшить R при увеличении высоты или использовать связку параллельно соединенных труб меньшего



Р и с. 6



Р и с. 7

диаметра и той же относительной толщины, что у исходного сосуда. Такое решение может оказаться вполне приемлемым.

Г. В примере с канатом ограничение было наложено только на сечение составляющих его нитей, а количество их могло быть каким угодно в зависимости от заданной нагрузки F . Этот вывод имеет важное принципиальное значение, так как открывает путь к конструированию объектов любых размеров, свободных от МЭЭП, или, правильнее сказать, конструкций разного размера из силовых элементов, имеющих постоянный характерный размер $2r$ (r — радиус нити).

На таком пути конструирования легко решается и другая важная задача — снижение веса всей конструкции. Ее решение лежит в использовании легких хрупких материалов, например стекла. Так, при плотности в ~ 3 раза меньше плотности стали нить ординарного стекла марки ВМ-1 диаметром $2r = 10$ мкм разрушается при $\sigma = 4,2$ ГПа, находясь еще в упругой области и допуская упругую деформацию до $\epsilon = 4,8$ %. В настоящее время композитный материал, силовым элементом которого является ориентированная стеклянная нить, а связующим материалом — эпоксидная смола, широко используется в технике.

Первые экспериментальные исследования по динамическому разрушению ГП-оболочек из стеклопластика позволили открыть присущее ему замечательное свойство — отсутствие МЭЭП [34]. У стеклоэпоксида волновые сопротивления стекла и эпоксидной смолы различаются в 7 раз. Поэтому следует ожидать, что конструкции не только из стеклоэпоксида, но и из других материалов класса ориентированных композитов должны быть нечувствительны к МЭЭП, если волновые сопротивления из компонентов также будут достаточно различны. Последующие систематические исследования конструкций из этого материала при их интенсивном динамическом нагружении подтвердили отсутствие МЭЭП и позволили установить ряд его замечательных свойств в условиях динамического нагружения [35, 36].

На рис. 6 и 7 приведены результаты исследований по несущей способности ГП-оболочек из стали и стеклопластика, заполненных соответственно воздухом и водой [40], показана их зависимость от масштаба (относительно радиуса) при их внутреннем взрывном нагружении (точки 1 — оболочки из стали 22К, 2 — оболочки из стеклопластика). Разрушение оболочек при $\xi = \text{const}$ свидетельствует об отсутствии МЭЭП, а рост ξ с уменьшением R — о существовании МЭЭП. Приведенные выше данные говорят также о ведущей определяющей роли МЭЭП в сравнении с масштабными эффектами другой природы [37]. Действительно, если существует заметное влияние МЭЭП другой природы, например статистической, то его вклад в наиболее явном виде должен был бы проявиться при разрушении стеклопластиковых оболочек, свободных от МЭЭП. Как следует из рис. 6 и 7, в эксперименте этого не наблюдается.

5. Статистический МЭ и возможные причины катастрофических хрупких разрушений крупногабаритных конструкций. Проведенное выше исследование разрушения с энергетических позиций в рамках ИП и в некоторых

случаях в ЛМР привело к физически обоснованному утверждению существования МЭЭП. Этот эффект в наиболее важной для техники области упругой деформации при прочих равных условиях описывается формулой (2.3). Фактически в громадном большинстве научно-технической литературы описание масштабных эффектов ведется с позиций статистической теории прочности или ее модификаций и приводит к соотношению

$$(5.1) \quad \sigma \sim V^{-1/3m} \sim L^{-1/m},$$

где V — объем материала объекта; L — характерный размер для ГП-объектов; m — постоянная материала, характеризующая его дефектность. При $m \rightarrow \infty$ материал бездефектный, его прочность стремится к теоретической.

Каковы причины игнорирования МЭЭП? Их несколько: 1) истоки статистического объяснения МЭ тесно связаны с традиционными критериями разрушения и статистической теорией прочности; 2) формула (5.1) носит более общий вид, чем (2.3), и при $m = 2$ формально включает (2.3) как частный случай; 3) значение m находится экспериментально, и поэтому считается, что оно более объективно отражает реальность. Логика такого рассмотрения подводит к выводу, что вопрос о природе МЭ можно отнести в разряд академического спора, несущественного для практики.

Каковы возможные последствия игнорирования МЭЭП? Принимая во внимание, что статистическая теория хрупкой прочности находится в противоречии с опытом [38], статистический подход к описанию МЭ следует рассматривать только как удобный способ описания эксперимента [39]. Но и в этом случае значение m будет зависеть от условий испытания образцов одного и того же материала. Признание же факта, что разрушение есть акт совершения работы, диктует (для получения корректных данных в опытах с ГП-объектами) подобным образом изменять и испытательные машины. Условие, как правило, невыполнимо в статических испытаниях и не регламентируется при исследовании статистического МЭ. Несоблюдение этого условия будет приводить к завышенным значениям m . Значения $m > 2$ могут быть следствием изменения, например, λ с изменением L [9]. В этом случае всякое превышение $m = 2$ удобно трактовать не в пользу МЭЭП. Далеко неакадемический интерес имеет вопрос о природе МЭ. Действительно, если его природа статистическая, то необходимо искать материалы с достаточно большим значением m , т.е. близкие к бездефектным материалам. Такой материал позволит при переходе к крупногабаритному объекту учесть МЭ введением поправочного коэффициента, несильно отличного от 1. Реальность, однако, более жестока. МЭЭП есть следствие, по существу, закона сохранения энергии. Поэтому, если в прочностном расчете крупногабаритного объекта заложено значение $3m = 20-100$ (вместо $3m = 6$), то можно априори утверждать, что запасы прочности его будут неоправданно завышены со всеми вытекающими отсюда последствиями. Так, можно с уверенностью утверждать, что в ряде случаев разрушения крупногабаритных объектов (сосудов давления, мостов, танкеров, морских платформ и т.п.) вызваны неучетом МЭЭП. Это показано на примере многокилометровых разрушений трубопроводов [7, 40]. Ну и, конечно, тот факт, что разрушение ГП-оболочек из стеклопластика проходило без проявления заметных МЭ, а разрушение оболочек из стали сопровождалось сильными МЭ (см. рис. 6 и 7), однозначно свидетельствует о ведущей роли МЭЭП в процессах разрушения традиционных материалов.

6. Запасы прочности и пути предотвращения хрупких разрушений. Каковы рекомендации расчета конструкций в механике разрушения (МР) и всегда ли учитывается возможность проявления МЭЭП? Как отмечалось выше, в тех случаях, когда решение удается получить методами МР (например, трубопроводы [6, 7, 40]) или путем расчета несущего элемента конструкции с использованием одной из схем нагружения с К-тарировкой [41], в которых разрез выступает как деталь конструкции, МЭЭП учитывается. Однако такие ситуации малочисленны. В большинстве случаев ввиду невозможности учесть все дефекты рекомендуется их «размазать» по объему,

считать материал бездефектным и использовать теории прочности сопротивления материалов [38, 41]. При выполнении такой рекомендации, особенно для крупногабаритных объектов, возможность проявления МЭЭП учтена не будет. Расчетные запасы прочности заведомо будут завышены.

Укажем еще на две возможности, которые также могут приводить к завышенным запасам и как следствие к хрупким разрушениям. Рассмотрим их. Один из этапов конструирования состоит в выборе материала. Считается, что если стандартные образцы материала натурной толщины при испытаниях методами МР не разрушаются хрупко, то не следует ожидать хрупкого разрушения и самого объекта [42, 43]. Такой способ исключения хрупких разрушений рекомендуется как наиболее надежный из-за отсутствия критерия хрупкого разрушения в МР [44] и в связи с невозможностью, как правило, прямых испытаний натуральных объектов вплоть до их разрушения.

В испытаниях с образцами натурной толщины величина K_{lc} определяется в момент перехода трещины в неустойчивое состояние, при этом на ширину образца L наложено ограничение [45]:

$$(6.1) \quad L \geq (2,5 \dots 6,25)K_{lc}/\sigma_{0,2}^2.$$

Аналогичная формула, которая получена из точного решения задачи о неразрушении трубопровода, приводит к соотношению

$$(6.2) \quad L \geq 2K_{lc}/\sigma^2.$$

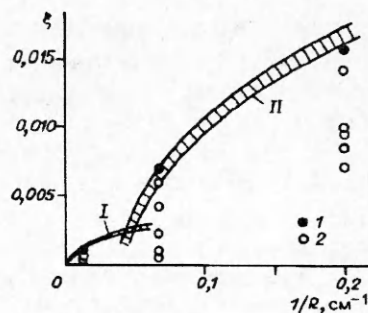
Существенное различие неравенств (6.1) и (6.2) состоит в $\sigma_{0,2}$ и σ . Согласно (6.1), значение K_{lc} находят при $\sigma = \sigma_{0,2}$. Однако хрупкое разрушение может реализоваться и при $\sigma < \sigma_{0,2}$. В последнем случае K_{lc} будет отвечать установившемуся стационарному режиму хрупкого разрушения натурной конструкции. Поэтому отсутствие хрупкого разрушения у образцов еще не дает гарантии от разрушения конструкции.

Другая возможная причина, которая может привести к завышенным значениям запасов хрупкой прочности конструкции, связана с температурной зависимостью K_{lc} (или G_{lc} , λ). Так, при определении методами, принятыми в МР, K_{lc} растет с увеличением T . Аналогичные зависимости, полученные методом откола, имеют вид падающих функций с ростом T . Падающий ход зависимости представляется физически более оправданным и не противоречит меньшим значениям удельной работы отрыва для жидкостей в отличие от твердых тел.

В свете изложенного возможно, что по мере роста T автомодельный стационарный режим разрушения будет достигаться на образцах большего размера, недоступных для лабораторных испытаний, на образцах, где сильнее должны проявляться МЭЭП, что приведет к более высоким скоростям развития разрушения, к локализации области пластического течения в устье трещины и к уменьшению K_{lc} вследствие достижения стационарного режима разрушения. На возможность реализации такого разрушения указывает тот факт, что «... при так называемом хрупком разрушении в лабораторных условиях обнаруживается деформация, превосходящая в вершине надреза 10 % (с некоторым запасом), тогда как при разрушении в рабочих условиях деформация не превосходит 2 % ...» [45]. Таким образом, значение G_{lc} при разрушении материала в стационарном автомодельном режиме и при повышенных температурах может оказаться существенно меньшим, чем это следует из K_{lc} , измеренных методами МР на стандартных образцах при T выше T хладноломкости, или, другими словами, сами K_{lc} могут оказаться завышенными.

Есть ли другие пути прогноза и предотвращения хрупких разрушений, которые свободны от указанных выше недостатков? Одна из таких возможностей рассмотрена в [15]. Пусть возможность прямого испытания на разрушение крупногабаритного объекта или его несущей части исключена. В ряде случаев роль основного несущего элемента выполняют оболочки, осложнен-

ные конструктивными элементами и нагруженные изнутри. Выше указывалось, что при интенсивном динамическом нагружении для реализации разрушения достаточно выполнения одного необходимого условия. В этом случае, зная диаграмму деформирования материала, разрушив геометрически подобную модель меньшего размера, можно дать прогноз о характере разрушения и несущей способности объекта или его несущей части натурального размера. Либо указать максимальное значение характерного размера R_0 ГП-объекта, выше которого разрушение будет переходить в упругую область деформирования.



Р и с. 8

Так, в [15] приведены результаты опытов по разрушению взрывом геометрически подобных сферических оболочек с относительной толщиной стенки 21 %. Оболочки были изготовлены из котельной стали (Ст. 22К) и имели массивные горловины. Наружный радиус оболочек R составлял 75, 15 или 5 см. При описании объектов была принята билинейная диаграмма деформирования материала в форме (2.1), где $\sigma_0 = 0,5$ ГПа, $K = 8,5$ ГПа, $E = 210$ ГПа. С использованием ИП получено уравнение разрушения, которое связывает величины R_i и деформацию разрушения ϵ_i с величиной R_0 :

$$(6.3) \quad R_0 = R_i [1 - K/E + K\epsilon_i/\sigma_0]^2.$$

При $R_i > R_0$ уравнение (6.3) принимает более простой вид

$$R_0 = R_i (\sigma_i/\sigma_0)^2.$$

Найденное значение R_0 составило ~ 20 см. Такой способ прогноза величины R_0 можно распространить на реальные диаграммы $\sigma(\epsilon)$ с тем, чтобы учесть зависимость $\sigma_0(\dot{\epsilon})$. На рис. 8 из [15] дана иллюстрация рассмотренного способа нахождения R_0 . Здесь на плоскости $\xi(R^{-1})$ точки 1 отвечают разрушению оболочки, а 2 — ее сохранности, цифрами I и II помечены области упругого и пластического деформирования.

Пример возможных катастрофических последствий неучета МЭЭП рассмотрен в [46] при проектировании сосудов объемом в несколько тысяч кубических метров, рассчитанных на давления до 50 МПа.

7. Заключение. В работах, изложенных выше, была сделана попытка описания экспериментальных результатов динамического разрушения ГП-объектов с позиций ИП. В ряде случаев оно носило оценочный характер. Для выяснения сути процессов использовались упрощающие предположения. Это относится к виду выбранных уравнений деформирования материала, к рассмотрению наиболее простых случаев напряженно-деформированного состояния ГП-объектов, к предположению о неизменности физических свойств материала ГП-объектов разного размера, в том числе таких характеристик его, как σ_0 и λ (т.е. отсутствие технологического фактора и слабое влияние $\dot{\epsilon}^*$).

Несколько слов о месте ИП в МР. Согласно уравнению (2.2), величина A есть отношение запаса УЭ к работе, которую нужно совершить по разрыву кубика. В области II (см. рис. 2) $A > 1$. Возможно хрупкое разрушение. При $\sigma = \sigma_0$ уравнение (2.2) может быть записано как $L = L_0 A$. Поэтому для

* Так, у сталей при изменении $\dot{\epsilon}$ в 10 раз величина σ_0 изменяется не более чем на 2—3 %. Если не рассматривать разрушения отколом, то наблюдается также слабая зависимость и G_{lc} (аналога λ) от $\dot{\epsilon}$. Согласно [47], увеличение $\dot{\epsilon}$ на 5 порядков приводит к возрастанию K_{lc} всего в 1,5—2 раза. При линейной зависимости K_{lc} от $\dot{\epsilon}$ увеличению $\dot{\epsilon}$ на порядок будет соответствовать рост G_{lc} всего на 0,03—0,04 %.

хрупкого разрушения кубика с ребром L , растянутого силой $\sigma_0 L^2$, достаточно начальной трещины площадью L_0^2 . Но в ИП величина L_0 — минимальное значение характерного размера объекта, когда еще возможно хрупкое разрушение при $\sigma = \sigma_0$. Для некоторых материалов эта величина отнюдь не мала. Так, при одноосном растяжении кубика из меди, нержавеющей стали (12X18H10T) или мягкой стали при $T \sim 300$ К L_0 измеряется дециметрами [2]*. Таким образом, невозможность хрупкого разрушения в области I диаграммы состояний ИП (см. рис. 2) с позиции линейной МР определяется тем, что размер критической трещины должен быть больше самого объекта. В другом предельном случае $A \gg 1$, что характерно для хрупких в обычных условиях материалов, состояние объекта отвечает большому риску разрушения. Значение A может быть уменьшено путем резкого снижения L . В этом случае удастся использовать и высокое значение σ_0 хрупких материалов, как это было показано на примере стеклопластиков.

Выше отмечалось, что G_{lc} , 2γ в МР и λ в ИП являются аналогами. Вопрос о различии их поведения с ростом T обсуждался в п. 6. Другое существенное отличие их состоит в следующем. Значения G_{lc} , 2γ определены в экспериментах при развитии магистральной трещины, а λ , как правило, — методом высокоскоростного разрушения — отколом. В последнем случае разрушение инициируется и протекает синхронно в большом количестве очагов. Первая систематизация экспериментальных данных по отколу с ГП-образцами [1] показала, что значение показателя степени при σ в уравнении (4.4) отличается от 2. Последующие эксперименты подтвердили этот вывод. Изменение показателя степени вызвано зависимостью λ от длины (или продолжительности действия) растягивающего импульса [9]. Так что если эту зависимость для геометрически подобных экспериментальных устройств принять в виде $\lambda \sim L^\kappa$, то уравнение (4.4) для разрушения отколом переписется как

$$(7.1) \quad \sigma^{2/(1-\kappa)} L = \text{const.}$$

Величина κ и значение const в (7.1) являются характеристиками материала. Они находятся из опытов с ГП-устройствами путем отыскания такой интенсивности соударения пластин, которая приводит к отколу в мишени**. Так, значения κ для сплава алюминия ($\sigma_0 = 333$ МПа, $\sigma_b = 449$ МПа, $E = 81$ ГПа) [49] и меди [9, 50] составили соответственно 0,24 и 0,63. Аналогичная зависимость должна существовать и у G_{lc} или 2γ от L . Но, как показано в предпоследней сноске, она пренебрежимо мала. Это обстоятельство подводит к выводу, что и в ИП, когда разрушение осуществляется посредством магистральной трещины, целесообразно использовать G_{lc} вместо λ .

С учетом изложенного сравним формулы для порога хрупкости в ИП (2.3) и протяженности пластической зоны Ирвина в МР [3]

$$(7.2) \quad r_y = \frac{1}{2\pi} \frac{G_{lc} E}{\sigma_0^2}.$$

Из (2.3) и (7.2) следует выражение порога хрупкости через зону Ирвина:

$$L_0 = 4\pi r_y.$$

Таким образом, при $\sigma = \sigma_0$ хрупкое разрушение возможно только для кубика с размером $L \geq 4\pi r_y$ и невозможно с $L < 4\pi r_y$.

Подытожим некоторые результаты использования ИП в проблеме описания динамического разрушения.

* Такая величина L_0 позволяет понять, почему, например, разрушение Мельбурнского моста началось при длине трещины ~ 3 м [3].

** Возможен другой путь определения λ откола, когда независимо от L выбрана такая скорость соударения пластин, что заведомо приводит к отколу. Величина σ откола определяется по записи скорости свободной поверхности мишени. В этом случае σ откола будет зависеть помимо L и от выбранного давления нагружения [48].

1. Предложена возможная схема построения единой теории разрушения. Указаны области состояний, где разрушение, в том числе хрупкое, невозможно.

2. Показана определяющая роль МЭЭП при динамическом разрушении ГП-объектов. Неучет МЭЭП при проектировании и строительстве несущих узлов крупногабаритных объектов ведет к завышенным значениям запасов прочности относительно фактических. Он может явиться одной из причин непредвиденных хрупких разрушений таких объектов.

3. Рассмотрены некоторые пути ухода от МЭЭП при проектировании объектов из традиционных материалов. Цикл исследований по динамическому разрушению оболочек из стеклопластика позволил открыть и теоретически обосновать замечательное свойство этого материала — нечувствительность к МЭЭП.

4. С позиций ИП дано описание многоочагового высокоскоростного разрушения материала при отколе. Обращено внимание на качественно различный вид зависимостей G_{lc} (или 2γ) и λ от температуры. Сделано предположение о завышенных значениях G_{lc} , K_{lc} при высоких температурах. Показана сильная зависимость λ от L (или ϵ) при многоочаговом отрыве — отколе.

5. Проведено исследование особенностей разрушения оболочек как в упругой области деформации при статических нагрузках, так и в области глубокой пластичности. В последнем случае удалось понять физическую природу и математически описать динамический пик пластичности у материалов, имеющих вязкостную составляющую прочности, а также заметно продвинуться в выяснении механизма дробления оболочек и распада кумулятивных струй.

6. Использование ИП применительно к трубопроводному транспорту позволяет разработать концепцию эксплуатационной надежности с учетом динамических нагрузок и свойств материала, а также оценить масштабы последствий разрушения при экстремальных ненормативных нагрузках [51].

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А.Г., Минеев В.Н. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ. — 1979. — № 5.
2. Ivanov A.G. Possible development of the unified fracture theory // High Energy Rate Fabrication: Proc. of X Intern. Conf., Ljubljana, Yugoslavia, 1989.
3. Ирвин Дж.Р. Линейная механика разрушения, переход от вязкого разрушения к хрупкому и методы контроля разрушения // Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. — М.: Мир, 1972.
4. Вейс В., Юкава С. Критическая оценка механики разрушения // Прикладные вопросы вязкости разрушения. — М.: Мир, 1968.
5. Иванов А.Г. Локальный и интегральный энергетические подходы в проблеме разрушения // Прикл. проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. гос. ун-т. — 1990. — Вып. 46.
6. Черепанов Г.П. О разрушении трубопроводов // ДАН СССР. — 1983. — Т. 272, № 3.
7. Иванов А.Г. О природе катастрофических разрушений трубопроводов // ДАН СССР. — 1985. — Т. 285, № 2.
8. Федоренко А.Г., Цыпкин В.И., Иванов А.Г. и др. Особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. — 1983. — № 1.
9. Иванов А.Г., Огородников В.А. Различаются ли хрупкие и пластичные материалы при отколе? // ПМТФ. — 1992. — № 1.
10. Иванов А.Г. Откол в квазиакустическом приближении // ФГВ. — 1975. — № 3.
11. Grady D.E. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids. — 1988. — V. 36, N 3.
12. Молодец А.М., Дремин А.Н. Термоактивационная трактовка откола // ДАН СССР. — 1982. — Т. 265, № 6.
13. Иванов А.Г. Феноменология разрушения и откол // ФГВ. — 1985. — № 2.

14. Иванов А.Г., Рыжанский В.А., Цыпкин В.И. и др. Экспериментальное исследование влияния масштаба на прочность котла высокого давления при внутреннем взрывном нагружении // ФГВ. — 1981. — № 3.
15. Иванов А.Г., Новиков С.А., Сеницын В.А. Масштабный эффект при взрывном разрушении замкнутых стальных сосудов // ФГВ. — 1972. — № 1.
16. Иванов А.Г., Минеев В.Н., Тюнькин Е.С. Импульсное схлопывание стальных цилиндрических оболочек // Изв. АН СССР. МТТ. — 1982. — № 2.
17. Иванов А.Г. Особенности взрывной деформации и разрушения труб // Пробл. прочности. — 1976. — № 11.
18. Борисевич В.К., Сабелькин В.П. и др. Динамические характеристики некоторых металлов и сплавов // Импульсная обработка металлов давлением. — Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1981. — № 9.
19. Stelly M., Legrand J., Dormeval R. Some metallurgical aspects of dynamic expansion of steels // Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomen. Metals: Proc. Int. Conf., Albuquerque, 1980. — N.Y.: Plenum Press, 1981.
20. Иванов А.Г., Кочкин Л.И., Новиков В.Ф. и др. Высокоскоростное разрушение тонкостенных труб из мягкой стали // ПМТФ. — 1983. — № 1.
21. Chokshi Atul H., Meyers Marc A. The Prospects for superplasticity at high strain rates: preliminary considerations and an example // Superplasticity. — 1990. — V. 24, N 4.
22. Иванов А.Г. Динамическое разрушение объектов в области глубоких пластических деформаций // ПМТФ. — 1986. — № 2.
23. Grady D.E. Local inertial effects in dynamic fragmentation // J. Appl. Phys. — 1982. — V. 53, N 1.
24. Kipp M.E., Grady D.E. Dynamic fracture growth and interaction in one dimension // J. Mech. Phys. Solids. — 1985. — V. 33, N 4.
25. Grady D.E., Kipp M.E. The growth of unstable thermoplastic shear with application to steady-wave shock compression in solids // J. Mech. Phys. Solids. — 1987. — V. 35, N 1.
26. Grady D.E., Hightower M.M. Natural fragmentation of exploding cylinders // Proc. Int. Conf. on Shock-Wave and High-Strain-Rate Phen. in Mat., San Diego, U S A, 1990.
27. Ivanov A.G. Dynamic rupture of thin-walled cylindrical shells: Paper pres. at the 3rd Intern. Conf. on Mech. and Phys. Beh. of Mater. under Dynamic Loading, Strasbourg, France, 1991 // J. de Physique IV. — 1991. — V. 1
28. Иванов А.Г. Роль инерционных и упругих сил при динамическом разрушении в пластической области // ДАН СССР. — 1991. — Т. 321, № 1.
29. Тюняев Ю.Н., Минеев В.Н., Попов Н.Н. Прочность сплошных и рулонированных оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Пробл. прочности. — 1978. — № 1.
30. Белянкин Ф.П., Дыбенко Г.И. Влияние скорости деформирования и скорости нагружения на прочность образцов различных размеров из слоистых пластиков // Завод. лаб. — 1963. — № 10.
31. Цыпкин В.И., Иванов А.Г. Масштабный эффект при взрывном разрушении рулонированных оболочек // Пробл. прочности. — 1981. — № 6.
32. Иванов А.Г., Минеев В.Н., Цыпкин В.И. и др. Пластичность, разрушение и масштабный эффект при взрывном нагружении стальных труб // ФГВ. — 1974. — № 4.
33. Иванов А.Г. Хрупкая прочность тонкостенных сосудов // Пробл. прочности. — 1988. — № 6.
34. Рыжанский В.А., Минеев В.Н., Иванов А.Г. и др. Разрушение цилиндрических стеклоэпоксидных оболочек, заполненных водой, при внутреннем импульсном нагружении // Механика полимеров. — 1978. — № 2.
35. Иванов А.Г., Цыпкин В.И. Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных нагрузках // Механика композит. материалов. — 1987. — № 1.
36. Федоренко А.Г., Сырунин М.А., Иванов А.Г. Динамическая прочность оболочек из ориентированных волокнистых композитов при взрывном нагружении // ПМТФ. — 1993. — № 1.
37. Шевандин Е.М., Разов И.А., Решетникова Р.Е. и др. О природе масштабного эффекта при разрушении металлов // ДАН СССР. — 1957. — Т. 113, № 5.
38. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. — М.: Наука, 1974.
39. Кобл Р.Л., Парих Н.М. Разрушение поликристаллической керамики // Разрушение. — М.: Машиностроение, 1977. — Т. 7, ч. 1.

40. Лифшиц Л.С. Расчет устойчивости трубопроводов против хрупких разрушений // Строительство трубопроводов. — 1968. — № 3.
41. Партон В.З. Механика разрушения. От теории к практике. — М.: Наука, 1990.
42. Бойд Дж. Мурей. Практические примеры проектирования конструкций судов с учетом сопротивления хрупкому разрушению // Разрушение. — М.: Машиностроение, 1977. — Т. 5.
43. Адачи Хиро. Методы проектирования артиллерийского оружия // Там же.
44. Вессел Э., Кларк У., Прайл У. Расчеты стальных конструкций с крупными сечениями методами механики разрушения // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению. — М.: Мир, 1972.
45. Друккер Д. Макроскопические основы теории хрупкого разрушения // Разрушение. — М.: Мир, 1973. — Т. 1.
46. Иванов А.Г., Рыжанский В.А. Запасы прочности и надежность крупногабаритных конструкций // ПМТФ. — 1994. — № 1.
47. Черепанов Г.П. Хрупкая прочность сосудов под давлением // ПМТФ. — 1969. — № 6.
48. Огородников В.А., Иванов А.Г. Зависимость откольной прочности металлов от амплитуды ударно-волновой нагрузки // ФГВ. — 1992. — № 1.
49. Stronge W.J., Ma Xiaoping, Zhao Lanting. Fragmentation of explosively expanded steel cylinders // Int. J. Mech. Sci. — 1989. — V. 31, N 11/12.
50. Огородников В.А., Иванов А.Г., Лучинин В.И. и др. О природе масштабного эффекта при высокоскоростном разрушении (отколе) // ФГВ. — 1993. — № 6.
51. Махутов Н.А., Сериков С.В., Котоусов А.Г. Эскалационное разрушение трубопроводов // Пробл. прочности. — 1992. — № 12.

г. Арзамас-16

Поступила 1/VI 1993 г.,
в окончательном варианте — 23/VII 1993 г.

УДК 539.3

В.Н. Юрков

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ НЕЛИНЕЙНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ АНИЗОТРОПНЫХ СЛОИСТЫХ ОБОЛОЧЕК С РАЗРЕЗАМИ-ТРЕЩИНАМИ

В отличие от [1,2] предложенный в [1] энергетический подход в данной работе применяется к решению очень сильнонелинейных краевых задач неклассической теории анизотропных слоистых оболочек, содержащих разрезы-трещины. Рассматриваются три типа нелинейности: геометрическая, физическая и конструктивная. Третий тип нелинейности появляется в результате изменения расчетной схемы: при воздействии внешней нагрузки на оболочку с разрезом-трещиной может возникнуть контакт берегов разреза в сжатой зоне, поэтому следует определить его влияние на коэффициент интенсивности напряжений. Исследуются слоистые пологие оболочки, ослабленные одной или двумя коллинеарными прямолинейными в плане сквозными разрезами-трещинами. Основные требования, предъявляемые к пакету слоев, изложены в [1]. Поведение рассматриваемых оболочек с разрезами-трещинами описывается теорией типа Тимошенко, учитывающей геометрическую и физическую нелинейности. Предполагается, что во всех точках тела оболочки имеет место процесс активной деформации при простом нагружении с изотропным упрочнением [3—5].

1. Постановка задачи. Сформулируем вариационную задачу статики трижды нелинейной неклассической теории типа Тимошенко ортотропной слоистой полой оболочки, содержащей разрез-трещину длиной $2L$, расположенный вдоль оси X_1 . Декартова прямоугольная система координат

© В.Н. Юрков, 1994