

4. Хайруллин М. Х. О решении обратных задач подземной гидромеханики с помощью регуляризирующих по А. Н. Тихонову алгоритмов // ЖВММФ. — 1986. — Т. 26, № 5.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979.
6. Гласко В. Б. Обратные задачи математической физики. — М.: Изд-во МГУ, 1984.
7. Лаврентьев М. М., Романов В. Г., Шипатский С. П. Некорректные задачи математической физики и анализа. — М.: Наука, 1980.
8. Марчук Г. И. О постановке некоторых обратных задач // ДАН СССР. — 1964. — Т. 156, № 3.
9. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике. — М.: Наука, 1970.
10. Вахитов Г. Г. Эффективные способы решения задач разработки нефтеводоносных пластов методом конечных разностей. — М.: Гостоптехиздат, 1963.

г. Казань

Поступила 13/IV 1988 г.,  
в окончательном варианте — 5/IX 1988 г.

УДК 539.4

А. Г. Иванов

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОЙ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ

Обилие существующих и вновь разрабатываемых материалов и многообразие условий их применения привело к созданию многочисленных, как правило, полуэмпирических теорий, критериев, концепций разрушения, каждая из которых справедлива в экспериментально исследованной области изменения параметров. Эти частные теории в совокупности с предшествующим опытом расчета на прочность позволяли до определенного времени ограничиваться ими. Однако дальнейшее развитие техники в направлении создания крупногабаритных уникальных объектов, предназначенных для работы в условиях интенсивных динамических нагрузок, невозможность в ряде случаев проведения натуральных испытаний таких объектов для выяснения их фактических запасов прочности, а также продолжающиеся случаи не прогнозируемых катастрофических разрушений некоторых объектов, сооруженных в соответствии с существующими нормами прочности, — все это требует не столько разработки и создания новых критериев разрушения, сколько необходимости отыскания единого физически обоснованного подхода к проблеме в целом, хотя бы на уровне феноменологии, без учета тонких деталей явления разрушения и осложняющих обстоятельств. Такая теория, способная в той или иной мере объединить частные критерии (концепции) разрушения, должна строиться с учетом общепризнанного факта — разрушение, расчленение целого на части — это совершение работы, пропорциональной поверхности разрыва. Поэтому в качестве критерияльных величин должны выступать удельные на единицу поверхности работа, энергия. Именно использованием энергетического подхода при локальном рассмотрении условий перехода трещины к неустойчивому росту объясняется бурное развитие и успехи в понимании многих деталей и особенностей хрупкого разрушения, достигнутые механикой разрушения (МР). Плодотворны попытки использования МР для описания других видов разрушения. Однако и она не в состоянии объединить и описать все их виды [1, 2].

В последние годы в работах автора с сотрудниками, а также других отечественных и зарубежных исследователей проведено изучение разрушения динамически нагруженных оболочек. Эти исследования позволили, с одной стороны, выявить ряд новых эффектов, не находящихся места в МР, а с другой, основываясь на энергетическом балансе применительно ко всему рассматриваемому объекту или его характерной части, описать эти явления и понять их физическую природу. Далее такой подход назовем интегральным (ИП) в отличие от локального, используемого в МР. Интегральный подход позволяет взглянуть на проблему в целом, нащупать схему построения общей теории разрушения. Ранее такая попытка с использованием ИП была предпринята в [3]. Проведенные последующие исследования с использованием ИП [3—14] дают основания надеяться на плодотворность и необходимость его дальнейшей разработки.

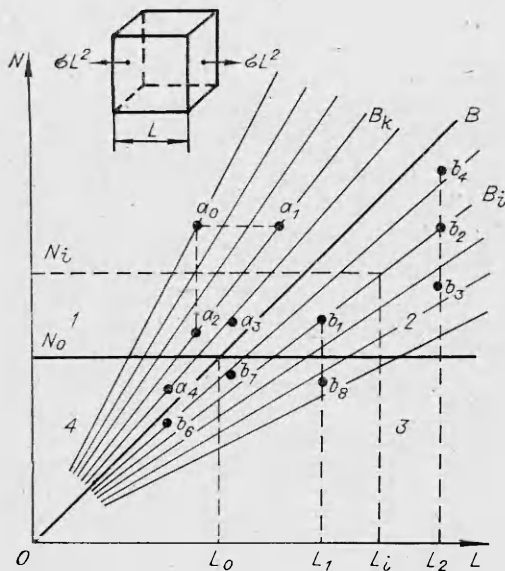
Рассмотрим разрушение кубика материала с ребром  $L$ , растягиваемо-го за две противоположные грани силами  $\sigma L^2$ . Остальные грани свободны. Примем также, что закон деформирования материала кусочно-линейный и состоит из упругой области, где

$$(1) \quad \sigma = \varepsilon E$$

вплоть до  $\sigma = \sigma_T$ , где  $\sigma_T$  — предел текучести (и упругости) материала и области пластического деформирования ( $\sigma > \sigma_T$ ):

$$(2) \quad \sigma = \sigma_T + K(\varepsilon - \sigma_T/E)$$

( $E$  и  $K$  — модули Юнга и упрочнения).



Обратим внимание на хрупкие разрушения, протекающие за малые интервалы времени, сравнимые с  $t \sim L/c$  ( $c$  — скорость звука в материале). Работой внешних сил  $\sigma L^2$  за время разрушения можно пренебречь и считать, что на совершение работы отрыва  $\lambda L^2$  может расходоваться только запас упругой энергии (УЭ), имеющийся к началу разрушения в кубике:  $\sigma^2 L^3 / 2E$  ( $\lambda$  — удельная на единицу поверхности работа разрушения). Очевидно, что необходимое условие разрушения, или неразрушения, запишется как

$$(3) \quad \sigma^2 L^3 / (2E) \geq \lambda L^2;$$

$$(4) \quad \sigma^2 L^3 / (2E) < \lambda L^2.$$

Выражению (3) в координатах  $N - L$  ( $N = 2\lambda E / \sigma^2$ ) на рисунке соответствует область  $LOB$ , включающая и линию  $OB$ , а неравенству (4) — область  $NOB$ . Очевидно, что для заданных  $\sigma$  и  $L$  чем меньше отношение правой части к левой ( $N/L$ ) в сравнении с единицей (линия  $OB$ ), тем больше запас УЭ в сравнении с работой, необходимой для разрыва кубика, и, наоборот, чем больше это отношение, тем более надежно исключена возможность разрушения его. Поэтому лучи, исходящие из точки  $O$  диаграммы  $N - L$  в области  $NOB$ , отвечают состояниям с одинаковым «запасом прочности», а в области  $BOL$  — характеризуют степень риска возможного разрушения. Горизонтальные линии  $N_i$  (считая, что  $E$  и  $\lambda$  не зависят от  $L$ ) отвечают различным  $\sigma_i$ . При  $N = \infty$   $\sigma = 0$ , а при  $N = 0$  физически недостижимая величина  $\sigma = \infty$ . Для кубика с заданным  $L_i$  постепенное нагружение от  $\sigma = 0$  до  $\sigma = \sigma_i$  соответствует движению по вертикали  $L = L_i$  из бесконечности до  $N_i = 2\lambda E / \sigma_i^2$ .

Проведя линию  $N$  при  $\sigma = \sigma_T$  ( $N_0 = 2\lambda E / \sigma_T^2$ ), разделим каждую из областей  $LOB$  и  $NOB$  еще на две области (1—4 на рисунке). В верхних областях деформация упругая, в нижних — пластическая (согласно (1), (2)). Значение  $L = L_0$  в точке пересечения линий  $OB$  и  $N = N_0$  определим как порог хрупкости материала. Это — минимальное  $L$ , при котором возможно разрушение в упругой области деформирования.

Таким образом, возможность проявления хрупкости или пластичности одного и того же материала в зависимости от  $L$  есть объективное свойство материала, вытекающее из ИП к проблеме разрушения.

Типичные значения  $L_0$ , рассчитанные для некоторых материалов при  $T \sim 300$  К, приведены в таблице, откуда следует, что интервал изменения  $L_0$  для реальных материалов простирается не менее чем на восемь порядков, поэтому положение линии  $N_0$  на рисунке в отличие от линии  $OB$  существенно индивидуально. Но и для конкретного материала  $L_0$  не постоянно, так как определяющие его  $\lambda$ ,  $E$  и особенно  $\sigma_T$  — функции температуры  $T$ , скорости нагружения  $\dot{\sigma}$  или скорости деформации  $\dot{\epsilon}$ . Положение  $L_0$  зависит и от вида напряженного состояния. Так, замена растягивающих сил на сжимающие приводит к хрупкому разрушению при напряжении в  $\nu^{-1}$  раз большем и в плоскости, параллельной сжимающим силам, в  $L_0$  появится сомножитель  $\nu^2$  ( $\nu$  — коэффициент Пуассона).

Перейдем к характеристике областей 1—4 на  $N - L$ -диаграмме.

**Область 1.** Условие неразрушения (4) выполнено. Все состояния области безопасны для эксплуатации кубика. Но при прочих равных условиях с ростом  $L$  (переход от состояния  $a_0$  к  $a_1$ ) либо с увеличением  $\sigma$  (переход от  $a_0$  к  $a_2$ ) новые состояния оказываются на лучах меньших запасов

Параметры	Медь	Ст. 12Х18Н10Т (нержавеющая)	Ст. 3	Ст. 40Х (закаленная)	Органическое стекло	Стекло
$E$ , ГПа	130	200	200	200	3,6	95
$\lambda \cdot 10^{-5}$ , Дж/м <sup>2</sup>	0,3	4,7	1,0	1,3	0,12	$92 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_T$ , МПа	30,6	350	250	986	120	>3800
$L_0$ , м	8,33	1,53	0,64	0,053	0,006	$<1,2 \cdot 10^{-6}$

прочности. Возможные значения  $L$  ограничены линией  $OB$ , и для  $\sigma = \sigma_T$   $L = L_0$ . При замене материала на более прочный или при изменении условий нагружения ( $T$ ,  $\sigma$ ), приводящих к росту  $\sigma_T$  при неизменных  $\lambda$  и  $E$ , значение  $L_0$  падает. В частности, для импульсных нагрузок, когда возникает вязкая составляющая  $\sigma_T$ , в области  $I$  могут оказаться и кубики из жидкости, хотя у жидкости в статических условиях  $\sigma_T = 0$ .

Для этой области наиболее существенными процессами, изменяющими значения  $\lambda$ ,  $\sigma_T$ ,  $E$  материала, являются медленно текущие процессы накопления дефектов структуры — старение, вследствие чего состояние кубика может перейти в другую область.

**Область 2** (совокупность состояний упругого деформирования и хрупкого разрушения). Необходимое условие разрушения (3) выполнено. Чем на более пологом луче  $OB$  расположена точка, характеризующая состояние кубика, тем больше степень превышения запаса УЭ над работой разрушения, тем меньшая мера поврежденности материала необходима для выполнения условия достаточности, тем более интенсивно будет протекать процесс разрушения. Однако если условие достаточности не выполнено (отсутствуют критическая Гриффиговская трещина, дефект структуры, аномальная область перенапряжения и т. п.), разрушения не произойдет. Поэтому если диагностика дефектов во времени при эксплуатации рассматриваемого кубика находится на достаточно высоком уровне, а разрушение его не приведет к катастрофическим последствиям, то состояния области 2 или части ее, прилегающей к линии  $OB$ , также могут рассматриваться как пригодные для эксплуатации.

Разрушения двух кубиков разного размера  $L_1$  и  $L_2$  в состояниях области 2 могут сопровождаться сильными масштабными эффектами (МЭ). Так, если состояния располагались на луче  $OB$  одинаковой степени риска (точки  $b_1$ ,  $b_2$ ), то неравенство (3) для них можно записать как

$$(5) \quad \sigma^2 L^3 / (2E) = A \lambda L^2,$$

где  $A$  — отношение запаса УЭ к работе разрушения для линии  $OB_i$  (для  $OB$   $A = 1$ ). Подставив в (5) значения  $L_1$  и  $L_2$  и взяв их отношение, получим

$$(6) \quad \sigma_1 / \sigma_2 = \sqrt{L_2 / L_1}.$$

Таким образом, при выполнении уравнения (5) и достаточного условия разрушение разномасштабных кубиков будет протекать при разных  $\sigma$ . Очевидно также, что кубики одинакового размера, но имеющие дефекты различной меры, будут разрушаться при разных напряжениях, отвечающих линиям разной степени риска (точки  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ). Это — дисперсия хрупкой прочности, которая, вопреки ожиданиям, не описывается статистической теорией прочности [15]. Если состояния кубиков  $L_1$  и  $L_2$  описываются точками на различных лучах, то это может либо усугубить МЭ (точки  $b_1$ ,  $b_4$ ), либо ослабить его (точки  $b_1$ ,  $b_3$ ) по сравнению с предсказываемым формулой (6). Отметим, что если кубик изготовлен из традиционно пластичного материала (пластичность определена по существующим стандартным методам), но его состояние лежит в области 2, то исклю-

чить возможность его хрупкого разрушения нельзя. При прочих равных условиях вероятность такого события будет расти вместе с  $L$ .

**Область 3.** Здесь, как и в области 2, выполнено необходимое условие разрушения. Разрушению в этой области предшествует пластическая деформация, которая приводит к следующим особенностям: а) слабоизменяющиеся в областях 1 и 2  $\lambda$ ,  $E$ ,  $\nu$  по мере роста дефектов структуры материала с ростом  $\epsilon$  оказываются функциями  $\epsilon$  и  $t$ . Описание разрушения кубика существенно усложнится, потребует знания этих функций; б) с увеличением  $\epsilon$  резко возрастает внутреннее трение материала, затрудняются условия передачи УЭ; уменьшаются окрестности зоны разрушения, с которых может быть снята УЭ. Поэтому если в окрестности  $N_0$  еще возможны МЭ и дисперсия хрупкой прочности, то с уходом от  $N_0$  эти эффекты, по крайней мере при статическом нагружении, должны исчезать. Накопление макроскопических дефектов перед разрушением должно приобретать все более локальный, множественный характер; в) при относительно небольших  $\epsilon$  характер разрушения сохранится в виде отрыва материала. Однако с ростом  $\epsilon$  следует ожидать перехода разрушения к срезу по избранным ослабленным плоскостям локализации дефектов структуры. Несмотря на увеличение поверхности разрушения кубика срезом, энергетически такой процесс разрушения, по-видимому, будет более выгодным; г) при больших значениях  $\epsilon$ , особенно при динамическом воздействии, доля энергии, затрачиваемой непосредственно на разрушение ( $\sim \lambda L^2$ ), пренебрежимо мала в сравнении с пластически диссипируемой и кинетической частями энергии.

**Область 4.** Для точек этой области, как и области 1, выполняется условие неразрушения, но в отличие от области 1 материал кубика подвергается необратимым деформациям, что в ряде случаев ограничивает возможность его эксплуатации и, как показано выше, усложняет процесс описания. Для области 4 характерны процессы накопления и роста дефектов структуры материала во времени, т. е. процессы старения, и так называемое рассеянное разрушение в объеме материала, как и для области 3, при больших значениях  $\epsilon$ , но без объединения этих зон вдоль некоторой поверхности разрушения.

В какой мере проведенное рассмотрение для гипотетической диаграммы  $\sigma - \epsilon$  (1), (2) и элементарного объекта — кубика применимо для реальных  $\sigma - \epsilon$ -диаграмм материалов и более сложных объектов с не столь тривиальными напряженными состояниями? Где место в  $N - L$ -схеме существующим критериям (концепциям, теориям) прочности?

Переход к  $\sigma - \epsilon$ -диаграммам реальных материалов помимо некоторого возможного усложнения расчетов несущественно отражается на  $N - L$ -диаграмме. Сложнее с переходом к реальным объектам. Как и на примере с кубиком, изменяя  $L$ , считаем, что все размеры объекта изменяются геометрически подобным образом, а напряженное состояние при этом сохраняется (естественно, кроме производных от  $\sigma$  и  $\epsilon$  по координате и времени \*). Таким образом, рассмотрение на плоскости  $N - L$  будет ограничено рассмотрением геометрически подобных объектов (ГПО), нагруженных одинаково. За  $L$  и  $\sigma$  примем любые характерные для данного объекта величины. (Например, для сферического сосуда в качестве  $L$  можно принять какой-либо его радиус, а за  $\sigma$  — его максимальное значение при выбранном  $R$ .) При сложном напряженном состоянии за  $\sigma$  может быть принято значение приведенного напряжения. Допущенный произвол в определении  $L$  и  $\sigma$  скомпенсируем введением коэффициента  $C_i$  вместо 2 в выражениях (3) и (4). Коэффициент  $A$ , как и ранее в (5); — отношение запаса УЭ к работе разрушения. Очевидно, что для каждого вида рассматриваемых ГПО, нагруженных одинаково, положение линии  $N_{0i}$ , аналога  $N_0$ , как и  $L_{0i}$ , аналога  $L_0$ , также будет своим. Для ряда случаев знание  $C_i$  не обя-

\* Отличие в поведении материалов вследствие несовпадения значений  $\sigma$  и  $\epsilon$  у ГПО невелико и может быть учтено. Так, для сталей при изменении  $\epsilon$  в 10 раз  $\sigma_T$  изменяется не более чем на 5 %.

зательно. Например, найдем  $L_{0i}$  мягкой стали при откольном разрушении. Эффективное значение  $\sigma_T$  есть  $\sigma_{эф} = K_1 K_2 K_3 \sigma_T$ , где  $K_1 = (1 - \nu) / (1 - 2\nu)$  — учет изменения напряженного состояния;  $K_2 = 4,5$  — учет изменения  $\sigma_T$  вследствие ударного высокоскоростного нагружения;  $K_3 = 2$  — учет распространения волны разгрузки по предварительно сжатому материалу. Тогда  $\sigma_{эф} \sim 16\sigma_T$  и  $L_{0i} \simeq 2,5$  мм вместо  $L_0 = 640$  мм. Разрушение мягкой стали отколом следует считать хрупким, его описание дано в [16].

Чем можно дополнить характеристики областей 1—4 диаграммы рисунка при переходе к простейшим ГПО и где можно использовать наиболее распространенные критерии прочности? Очевидно, что все ответственные объекты или их несущие узлы, разрушение которых чревато тяжелыми катастрофическими последствиями, должны отвечать состояниям области 1 и не только в нормальных условиях длительной эксплуатации, но и при аварийных ситуациях и экстремальных нагрузках. Поскольку состояниям области 1 отвечают слабонагруженные объекты, то снижение их удельной материалоемкости, массы и увеличение нагрузок может быть достигнуто полным или частичным использованием направленных композитных или рулонированных материалов, свободных от МЭ энергетической природы или, там где это возможно, заменой одного объекта большим количеством ГПО с меньшим значением  $L$  [8, 9].

При определении границ области и, в частности, линии  $OB$  могут возникнуть осложнения, если вместо  $\lambda$  использовать его аналог — величину  $2\gamma$ , определенную методами МР. Согласно [17],  $\lambda$  и  $2\gamma$ , совпадающие при низких  $T$ , с ростом  $T$  расходятся. Причина такого поведения, по-видимому, связана с некорректным определением  $2\gamma$ . Так, при обычных  $T$  у мягких сталей  $2\gamma$  может в несколько раз превышать  $\lambda$ .

В этой области допустимо использование критериев прочности, традиционных для курса сопротивления материалов и основанных на предельных значениях  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\sigma^2/2E$ . В качестве таких величин могут выступать  $\sigma = \sigma_T$  и  $\epsilon = \sigma_T/E$ , относительно их могут быть определены «запасы прочности». Фактические же величины запасов прочности, как отмечалось ранее, зависят от положения точек, определяющих состояния ГПО. Для состояний, расположенных на одном луче равного запаса прочности  $B_k$  (точки  $a_1$  и  $a_2$ ), традиционные величины, например  $\sigma$  разрушения, могут существенно отличаться. Так, объект из состояния  $a_1$  может разрушиться хрупко при  $\sigma < \sigma_T$ , а из состояния  $a_2$  — только в области пластического течения при  $\sigma > \sigma_T$ . Еще большее различие в запасах прочности у разномасштабных объектов, нагруженных с одинаковой интенсивностью (точки  $a_0$  и  $a_1$ ).

Перейдем к области 2. Создание и использование высокопрочных материалов (с большим  $\sigma_T$ ) с целью облегчения конструкций, с одной стороны, и стремление к разработке все более крупных объектов, с другой — приводят к тому, что область 2  $N-L$ -диаграммы оказывается все более важной для техники, и именно по этой причине проблема хрупких разрушений оказалась в последние десятилетия центральной и привела к бурному развитию МР. Так как необходимое условие разрушения в области 2 выполнено, особую актуальность приобретает диагностика дефектов с целью недопущения выполнения условия достаточности для перевода объекта в равновесное состояние — разрушение. Для понимания степени возможного риска важна информация о величине коэффициента  $A$  для рассматриваемого объекта. На состояния этой области сильное влияние оказывает скорость нагружения объекта. Так, эксперименты по высокоскоростному импульсному разрушению сосудов и откольному отрыву материала дают основание считать, что при достаточно интенсивном нагружении выполнение необходимого условия разрушения (3) автоматически приводит к удовлетворению условия достаточности [6, 8]. Правомочность этого утверждения следует из одновременности начала разрушения по избранным линиям и даже плоскостям [14, 18], а само высокоскоростное разрушение может обладать рядом особенностей. Таким



образом, и столь специфическое ударно-волновое разрушение, как откол, логически вписывается в общую  $N-L$ -схему [3, 16]. Некоторые отклонения от нее у конкретных материалов объясняются неучтенным влиянием таких эффектов, как фазовые переходы, различная степень динамического упрочнения у разных материалов и т. п. В полном соответствии с изложенным ранее, в области 2 возможны сильные МЭ при разрушении и проявление дисперсии хрупкой прочности. Для состояний с большим избытком УЭ ( $A \gg 1$ ) разрушение будет протекать по типу взрыва с образованием большого количества осколков [19].

Эти условия энергетически выгодны для реализации процессов дробления, измельчения. Именно при анализе состояний области 2 достигнуты наибольшие успехи МР.

При замене кубика другими ГПО все сказанное ранее относительно области 3  $N-L$ -диаграммы полностью сохраняется. Как и в области 2, при небольших пластических деформациях (0,5–1,0 %) проявляются сильные МЭ, что наблюдалось при стандартных статических испытаниях в [5, 20]. При динамическом разрушении разнотолщинных эллиптических сосудов из Ст. 22К [6] при деформациях до 1 % помимо проявления сильных МЭ наблюдались и другие эффекты. Так, типично хрупкое разрушение сосудов в упругой области деформации (обл. 2) при уменьшении размера сосуда становится вязким\*. Кардинально изменяется и расположение слабого места сосуда. При разрушении в упругой области зарождение, развитие и распространение трещины идет из места наибольшей концентрации напряжения перпендикулярно сварке и наиболее тонкому месту оболочки. При разрушении в условиях пластического деформирования трещина распространяется по тонкому месту оболочки параллельно сварному шву.

Рост диссипативных потерь с увеличением степени пластической деформации затрудняет протекание волновых процессов и резко ограничивает область, с которой может быть снята УЭ на образование разрыва. Протяженность этой области перестает зависеть от характерного размера объекта, а МЭ энергетической природы исчезают. Это, действительно, подтверждается в стандартных статических испытаниях на разрушение растяжением разномасштабных образцов «пластичных» материалов. Более тщательное исследование разрушения образцов из Ст. 12X18H10T показало существование слабого МЭ (изменение  $\Delta\sigma \sim 5\%$  при  $L_1/L_2 = 6$ ), по-видимому, технологической природы. Переход к высокоскоростному динамическому действию существенно усложняет протекающие процессы, ведет к росту УЭ вследствие увеличения  $\sigma_T$  и одновременно накладывает временные ограничения на процесс снятия УЭ и завершения разрушения. Анализ явлений с позиций ИП позволил теоретически описать и экспериментально подтвердить существование динамического пика пластичности у мягких сталей [4, 11–13]. Исследование с этих же позиций некоторых уравнений деформирования показало многообразие поведения материалов при динамическом разрушении и возможность описания высокоскоростного фрагментирования при больших пластических деформациях цилиндрических оболочек и кумулятивных струй [7, 10].

Обращаясь к существующим теориям прочности, следует заключить, что в упруго-пластической области деформирования при не слишком больших значениях  $\varepsilon$  в настоящее время с успехом используется МР и ее модификации [22], а в области больших пластических деформаций при статических нагрузках в процессах ползучести и т. д. — традиционные теории прочности, основанные на использовании критических значений  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  или их комбинации.

Существенно сложнее применить МР для описания разрушения объектов при высоких скоростях деформирования в условиях интенсивного на-

---

\* Разрушение равнотолщинных оболочек и при деформации 1,5 % оставалось хрупким [21].

гружения, когда объект обречен на разрушение, а указать его заведомо слабое место не представляется возможным. К таким объектам могут быть отнесены оболочки, а также кольца, нагруженные изнутри внезапно приложенным давлением.

В последние десятилетия на смену традиционным критериям разрушения, основанным на критических значениях  $\varepsilon$  и  $\sigma$ , пришли критерии, основанные на подходе Тэйлора. Согласно последнему, разрушение оболочки наступает сразу, как только окружающие напряжения по всему сечению становятся растягивающими. Однако эти критерии находятся в противоречии с экспериментом. Действительно, две геометрически подобные оболочки, нагруженные сходственным образом (с учетом небольшой поправки на различие в  $\varepsilon$ ), должны разрушаться при  $\varepsilon = \text{const}$  независимо от  $R$ , а импульсно ускоренные расширяющиеся кольца — сразу по окончании воздействующего импульса. Эксперимент находится в резком противоречии с прогнозом. В подходе Тэйлора нет места и динамическому пику пластичности, экспериментальное подтверждение которого получено в [11, 12 и др.].

Область 4  $N-L$ -диаграммы для более сложных объектов, чем кубик, может описываться теориями накопления повреждений в объеме материала типа кинетической концепции прочности (ККП) и в меньшей мере ее аналогом

$$(7) \quad \dot{\varepsilon} \tau = \text{const}.$$

Последнее соотношение далеко не всегда оказывается справедливым.

В (7)  $\tau$  — долговечность материала при заданном значении  $\varepsilon$ . Возникающее рассеянное разрушение (разрушение в объеме материала) не противоречит невыполнению необходимого условия нагружения (3). Процесс же объединения рассеянного в объеме разрушения в глобальную трещину можно рассматривать как следствие постепенного переползания точки, описывающей первоначальное состояние объекта (точка  $a_4$  области 4 или даже точка  $a_3$  области 1), в область 3 (точки  $b_6, b_7$ ) по мере накопления дефектов структуры.

Близким по сути к ККП является полуэмпирический подход к изучению кинетики роста дефектности материала после различных воздействий вплоть до достижения критического значения, при котором происходит разрушение. Этот подход [23], как и ККП, последние годы используется рядом авторов для описания откольного разрушения. Но так как один и тот же материал может разрушаться как в области 2 (точка  $b_4$ ), т. е. при  $\sigma \ll \sigma_T$ , где дефектность материала мала, так и в области 3 (точка  $b_6$ ) при  $\sigma \gg \sigma_T$ , то очевидно, что степень дефектности в качестве критерия разрушения может быть использована лишь в узком интервале изменения начальных условий.

Таким образом, предложенная схема построения общей теории разрушения на основе энергетического ИП позволяет:

объединить в одной схеме как хрупкие разрушения при статических [9] и экстремально высоких динамических нагрузках [3], так и разрушения в области глубокой пластичности при высоких скоростях деформаций [4];

понять место ряда критериев (теорий, концепций) прочности в этой схеме, подтверждая тезис, что природа разрушения едина;

сформулировать условия безопасного конструирования объектов; подтвердить возможность проявления сильных МЭ энергетической природы в явном виде при разрушениях ГПО, нагруженных динамически [5, 6]. Эти эффекты при статических нагрузках проявляют себя через дисперсию хрупкой прочности, а у пластичных материалов — как непредвиденные хрупкие разрушения крупногабаритных объектов [9];

более критически взглянуть на фактические запасы прочности крупногабаритных объектов, спроектированных без учета возможности проявления МЭ энергетической природы;

заклучить, что такие свойства материала, как хрупкость или пластичность, при прочих равных условиях зависят от характерного размера объекта, и ввести понятие порога хрупкости;

исключить возможность проявления МЭ энергетической природы, если при изготовлении ГПО сохранять характерный размер силового элемента. Этому условию отвечают однонаправленные композитные материалы, нагруженные в направлении армирования [14];

описать и физически осмыслить экспериментально установленную для ряда металлов зависимость напряжения разрушения при отколе от времени действия растягивающих нагрузок [3, 16]. Анализ вида температурной зависимости  $\sigma_{отк}$  позволяет заключить о некорректности определения  $K_{IC}$  в МР при высоких  $T$  [17];

понять физическую природу и математически описать динамический пик пластичности у материалов, имеющих вязкостную составляющую прочности [4, 7, 11, 12], и заметно продвинуться в выяснении механизма дробления оболочек и распада кумулятивных струй [10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения.— М.: Наука, 1987.
2. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел.— Новосибирск: Наука, 1979.
3. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабном критерии при хрупком разрушении конструкций // ДАН СССР.— 1975.— Т. 220, № 3.
4. Иванов А. Г. Особенности взрывной деформации и разрушения труб // Пробл. прочности.— 1976.— № 11.
5. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ.— 1979.— № 5.
6. Иванов А. Г., Учаев А. А., Рыжковский В. А. и др. Импульсное разрушение геометрически подобных объектов // ДАН СССР.— 1981.— Т. 261, № 4.
7. Иванов А. Г., Кочкин Л. И., Новиков В. Ф., Фоломеева Т. М. Высокоскоростное разрушение тонкостенных труб из мягкой стали // ПМТФ.— 1983.— № 1.
8. Иванов А. Г., Новиков С. А., Синецкин В. А., Цыпкин В. И. Прочность и разрушение материалов и простейших конструкций при интенсивных импульсных нагрузках // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб.— Горький: ГГУ, 1985.
9. Иванов А. Г. О природе катастрофических разрушений трубопроводов // ДАН СССР.— 1985.— Т. 285, № 2.
10. Иванов А. Г. Динамическое разрушение объектов в области глубоких пластических деформаций // ПМТФ.— 1986.— № 2.
11. Olive F., Nicaud A., Marilleau J., Loichot R. Rupture behaviour of metals in explosive expansion // Mechanics properties high rates strain: Proc. 2nd Conf., Oxford, 1979.— Bristol; London, 1980.
12. Stelly M., Legrand J., Dormeval R. Some metallurgical aspects of the dynamic expansion of shells // Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals: Concepts and applications: Proc. Intern. conf. metallurgical effects high-strain-rate deformation and fabrication, Albuquerque, 1980.— N. Y.; L.: Plenum, 1981.
13. Сериков С. В. Оценка предельной деформации при разрушении металлических труб под действием интенсивных нагрузок // ПМТФ.— 1987.— № 1.
14. Иванов А. Г., Цыпкин В. И. Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных нагрузках // Механика композит. материалов.— 1987.— № 3.
15. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения.— М.: Наука, 1974.
16. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении // ФГВ.— 1975.— № 3.
17. Иванов А. Г. О возможных причинах хрупких разрушений // ПМТФ.— 1988.— № 3.
18. Иванов А. Г., Новиков С. А. Об ударных волнах разрежения в железе и стали // ЖЭТФ.— 1961.— Т. 40, № 6.
19. Баргенов Г. М., Измайлова Л. К. Бездефектные стеклянные волокна // ДАН СССР.— 1962.— Т. 146, № 5.
20. Фридман В. М., Шербань Н. И. О влиянии масштабного фактора на прочность твердых сплавов // Пробл. прочности.— 1980.— № 11.
21. Иванов А. Г., Синецкин В. А., Новиков С. А. Масштабные эффекты при динамическом разрушении конструкций // ДАН СССР.— 1970.— Т. 194, № 2.
22. Партон В. З., Морозов Е. М. Механика упругопластического разрушения.— М.: Наука, 1985.
23. Shockey D. A., Seaman L., Curran D. R. The influence of microstructural features on dynamic fracture // Metallurgical effects at high strain rates.— N. Y.; L.: Plenum, 1979.

г. Москва

Поступила 12/IX 1988 г.