1.2. Характеристики областей 1–4 на (N–L)-диаграмме

Область 1. $A < 1$, $\sigma \le \sigma_0$. Условие неразрушения (1.3) выполнено. Все состояния области безопасны для кубика. Но при прочих равных условиях с ростом L (переход от состояния a_0 к a_1) либо с увеличением σ (переход от a_0 к a_2) новые состояния оказываются на лучах меньших запасов прочности. Возможные значения L ограничены линией OB и (для $\sigma = \sigma_0$) $L = L_{01}$. При замене материала на более прочный или при изменении условий нагружения (T, $\dot{\varepsilon}$), приводящих к росту σ_0 при неизменных G_{IC} и E, значение L_{01} падает. В частности, для импульсных нагрузок, когда возникает вязкая составляющая σ, в области 1 могут оказаться и кубики из жидкости, хотя у жидкости в статических условиях $\sigma_0 = 0$.

Для этой области наиболее существенными процессами, изменяющими значения G_{IC}, σ_0 и E материала, являются медленнотекущие накопления дефектов структуры – старение, вследствие чего состояние кубика может перейти в другую область.

Область 2. $A \ge 1$, $\sigma \le \sigma_0$. Совокупность состояний упругого деформирования и хрупкого разрушения. Необходимое условие разрушения (1.2) выполнено. Чем выше на более пологом луче 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 интенсивнее будет протекать процесс разрушения. Однако, если условие достаточности не выполнено (отсутствуют критическая гриффитсовская трещина [3], опасный дефект структуры, аномальная область перенапряжения и т. п.), разрушение не произойдет. Поэтому если диагностика дефектов во время 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 к безопасной эксплуатации.

Разрушения двух кубиков разного размера L_1 и L_2 в состояниях области 2 могут сопровождаться МЭ. Так, если состояния располагались на луче одинаковой степени риска (точки b_1, b_2), то равенство (1.5) для различных значений L_1 и L_2 приводит к соотношению

$$\sigma_{cr1}/\sigma_{cr2} = \sqrt{L_2/L_1} \quad \text{или} \quad \sigma_{cr} \sim L^{-1/2}, \tag{1.7}$$

где σ_{cr} – разрушающее напряжение. Таким образом, при выполнении достаточного условия разрушение разномасштабных кубиков будет протекать при разных σ_{cr}, что и является проявлением МЭ, в данном случае – энергетической природы (МЭЭП). Очевидно также, что кубики одинакового размера, но имеющие дефекты различного размера, 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 [3]. 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 МЭ, предсказуемым формулой (1.7). Отметим, что если кубик изготовлен из традиционно пластичного материала (пластичность определена существующими стандартными методами), но его состояние лежит в области 2, то исключить возможность его хрупкого разрушения нельзя. При прочих равных условиях вероятность такого события будет увеличиваться с ростом L.

Область 3. $A \geq 1$, $\sigma > \sigma_0$. Здесь, как и в области 2, необходимое условие разрушения (1.2) выполнено. Разрушению предшествует пластическая деформация, которая приводит к следующим особенностям:

А. Слабо изменяющиеся значения G_{IC}, E в областях 1 и 2 и ν в области 3 по мере роста дефектов структуры материала оказываются функциями ε и времени t. Описание разрушения кубика существенно усложнится, так как потребует знания этих функций.

Б. С увеличением ε резко возрастает внутреннее трение материала, затрудняются условия передачи УЭ; уменьшаются окрестности зоны разрушения, с которых может быть снята УЭ. Поэтому если в окрестности $\sigma \sim \sigma_0$ еще возможны МЭ и дисперсия хрупкой прочности, то с удалением ε от ε_0 $(\varepsilon > \varepsilon_0)$ 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 ε характер разрушения сохранится в виде отрыва материала. Однако с ростом ε 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 ε, особенно при динамическом воздействии, доля УЭ кубика, затрачиваемая непосредственно на разрушение $\left(\square\, G_{IC}L^2\right)$, пренебрежимо мала в сравнении с пластически диссипируемой и кинетической частями энергии. Процесс разрушения «встраивается» в соотношение «напряжение–деформация» [15].

Область 4. $A < 1$, $\sigma > \sigma_0$. Для точек этой области, как и области 1, выполняется условие неразрушения (1.3), но, в отличие от области 1, материал кубика подвергается необратимым деформациям, что в ряде случаев может ограничивать возможность эксплуатации его и, как показано выше, усложняет процесс описания. Для этой области состояний 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 ε, но без объединения этих зон вдоль некоторой поверхности разрушения.

В какой мере проведенное рассмотрение при использовании гипотетической диаграммы $\sigma-\varepsilon$ (1.4) и элементарного объекта – кубика – применимо для реальных $(\sigma-\varepsilon)$-диаграмм материалов и более сложных объектов с не столь тривиальными НДС? Где место в предложенной ($N-L$)-схеме существующим критериям (концепциям, теориям) прочности?

Переход к диаграммам реальных материалов, помимо некоторого возможного усложнения расчетов, несущественно отражается на ($N-L$)-диаграмме. Сложнее с переходом к реальным объектам. Как и в примере с кубиком, изменяя L, будем считать, что все размеры изменяются ГП образом, а НДС при изменении L сохраняется (естественно, кроме производных от σ и ε по координате и времени*). Таким образом, состояние на плоскости $N-L$ будет ограничено состоянием ГП объектов, нагруженных одинаковым образом. Сужение круга возможных объектов их ГП представителями фактически не препятствует возможности рассмотрения произвольного объекта. Ему всегда могут быть сопоставлены его ГП модели. Вместе с тем такое формальное ограничение позволяет существенно упростить поиск определяющих физических закономерностей процесса разрушения.

Примем за L и σ любые размер и напряжение, характерные для данного объекта. Например, для сферического сосуда в качестве L можно принять какой-либо его радиус (R), а σ – максимальное значение напряжения при выбранном R. При сложном НДС за σ может быть принято значение приведенного напряжения. Допущенный произвол в определении L и соответствующего ему значения σ скомпенсируем введением коэффициента C_i вместо 2 в (1.5). Коэффициент A, как и ранее, есть отношение запаса УЭ к работе разрушения. Очевидно, что для каждого вида рассматриваемых ГП объектов, нагруженных заданным образом, положения линий N_{0i}, аналогов N_0, как и L_{0i}, аналогов L_{01}, также будут своими. Так, для растянутых тонких объектов – полосы толщиной h и стержня диамет-

* Отличие в поведении материалов вследствие несовпадения значений $\dot{\sigma}$ и $\dot{\varepsilon}$ у ГП объектов относительно невелико и может быть учтено. Так, для сталей, при изменении $\dot{\varepsilon}$ в 10 раз, величина σ_T изменяется не более чем на 2–3 %.

ром D – критические значения их размеров (h_0) и (D_0) найдутся из баланса интервалов времени снятия УЭ и времени прохождения хрупкой трещины со скоростью, равной половине скорости волны сдвига: $h_0 = 2\left(\frac{K_{IC}}{2\sigma_0}\right)^2 \frac{1}{1-\mu^2}\sqrt{\frac{1-\mu}{2}}$ и $D_0 = 2\left(\frac{K_{IC}}{2\sigma_0}\right)^2 \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}}$, где μ – коэффициент Пуассона. Эти значения составляют $\approx 0{,}16\, L_{01}$ кубика.

Вернемся к уравнению (1.7). Очевидно, что для его строгого выполнения недостаточно только равенства параметра A у двух ГП объектов. Согласно МХР при прочих равных условиях должны быть выполнены и достаточные условия разрушения. Для данного избытка УЭ деформации в объектах L_1 и L_2 должны быть и трещины критического размера l_{01} и l_{02}, что эквивалентно $l_0 / L = \text{const}$.

Приведем два примера реализации условия (1.7).

1. Одним из способов определения K_{1C} является разрушение ГП образцов материала с искусственными трещинами, у которых $l_0 / L = \text{const}$ при их внецентренном растяжении [16]. При увеличении размеров образцов их разрушение переходит в хрупкое, а величина K_C падает до своего минимального значения K_{1C}. При дальнейшем увеличении размеров образцов уравнение (1.7) будет строго выполнено.

2. В работах [17, 18] при взрывном разрушении ГП сфероидных сосудов роль трещины критического размера выполняла область концентратора напряжений в месте сопряжения корпуса с массивной горловиной и, согласно (1.7), наблюдались МЭЭП.

Чем можно дополнить характеристики областей 1–4 диаграммы на рис. 1.1 при переходе к простейшим ГП объектам и где можно использовать наиболее распространенные критерии прочности? Очевидно, что все ответственные конструкции (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, веса и увеличение нагрузок, как будет показано ниже, в некоторых случаях может быть достигнуто полным или частичным использованием ориентированных композитов, а в некоторых случаях – рулонированных материалов. Они полностью или частично свободны от МЭЭП. Где возможно, эта же цель частично может быть достигнута заменой одного объекта на большее количество ГП объектов с меньшим значением L.

В этой области допустимо использование критериев прочности, традиционных для курса СМ и основанных на определенных (критических, пороговых) значениях величин σ, ε. В их качестве могут выступать $\sigma = \sigma_T$ и $\varepsilon = \sigma_T / E$, и относительно них могут быть определены «запасы прочности». Фактические же запасы прочности, как отмечалось ранее, зависят от положения точек, определяющих состояния ГП объектов. Для состояний, расположенных на одном луче равного запаса прочности (точки a_1 и a_2), традиционные механические характеристики, например σ_{cr}, могут существенно отличаться. Так, объект из состояния a_1 может разрушиться хрупко при $\sigma > \sigma_0$, а из состояния a_2 – только в области пластического течения при $\sigma > \sigma_0$. Еще большее различие в запасах прочности будет у разномасштабных объектов, нагруженных с одинаковой интенсивностью (точки a_0 и a_1).

Перейдем к области 2. С одной стороны, создание и использование традиционных высокопрочных материалов (с большим значением σ_T) с целью облегчения конструкций, а с другой – стремление к разработке все более крупных объектов, приводят к тому, что область 2 на (N–L)-диаграмме оказывается все более важной для техники. 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. В противном случае объект переходит в равновесное состояние – разрушение. В этой области для ряда ответственных конструкций, пользуясь критериями МР, разработаны нормы дефектности, регламентирующие критические размеры дефектов. Для понимания степени возможного риска важна информация о величине коэффициента A для рассматриваемого объекта. Для состояний 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 в ряде случаев приводит также к удовлетворению условия достаточности [17, 19, 20]. Справедливость этого утверждения следует из одновременности начала разрушения по избранным линиям и даже плоскостям [21, 22]. В полном соответствии с ранее изложенным, в области 2 возможны сильные МЭ при разрушении и проявление дисперсии хрупкой прочности. Для состояний с большим избытком УЭ ($A \gg 1$) разрушение протекает по типу взрыва с образованием большого количества осколков [23]. Эти условия энергетически выгодны для реализации процессов дробления, измельчения. Именно при анализе состояний области 2 достигнуты наибольшие успехи МР.

При замене кубика другими ГП объектами 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 [19, 24] и при взрывном разрушении разнотолщинных эллиптических котлов высокого давления из стали 22К [18] при деформациях до 1 %.

Роль диссипативных потерь с увеличением степени пластической деформации затрудняет накопление УЭ, ограничивает размер области, с которой может быть снята УЭ на образование разрыва, и этот размер перестает зависеть от базового размера объекта, а МЭЭП исчезает. Иная картина реализуется при переходе к динамическому нагружению. Здесь, как и при статическом нагружении, малое значение K/E отвечает малому росту $\sigma(\varepsilon)$ и, соответственно, фактическому отсутствию МЭЭП. Однако меньшее значение $\dot{\varepsilon}$ у объекта большего размера ведет к разрушению при меньшей деформации, т. е. к уменьшению удельной несущей способности в сравнении с объектом меньшего размера.

Существенно сложнее применить МР для описания разрушения объектов при высоких скоростях деформирования в условиях интенсивного нагружения, когда объект обречен на разрушение, а указать его заведомо слабое место невозможно. К таким объектам могут быть отнесены оболочки и кольца, нагруженные изнутри большим взрывным давлением, а также кумулятивные струи, имеющие по длине градиент скорости.

В последние десятилетия на смену традиционным критериям разрушения, основанным на критических значениях ε и σ, пришли критерии, основанные на подходе Тейлора. Согласно последнему, разрушение оболочки наступает сразу, как только окружные напряжения по всему сечению становятся растягивающими. В соответствии с этим, две ГП оболочки, нагруженные сходным образом (с учетом небольшой поправки на различие в $\dot{\varepsilon}$), должны разрушаться при $\varepsilon = \text{const}$ независимо от размера, а импульсно ускоренные расширяющиеся кольца должны разрушаться сразу по окончании воздействия импульса. Экспериментальные данные противоречат этим утверждениям.

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

$$\dot{\varepsilon}\tau = \text{const}, \tag{1.8}$$

где τ – долговечность материала при заданном значении $\dot{\varepsilon}$.

Последнее соотношение далеко не всегда оказывается справедливым. Согласно ему, рассеянное разрушение, возникающее в объеме материала, не противоречит выполнению необходимого условия разрушения (1.3). Процесс же объединения рассеянного разрушения в сквозную 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 кинетической концепции прочности является полуэмпирический подход к изучению кинетики роста дефектности материала после различных воздействий, вплоть до достижения ее критического значения, при котором происходит переход в закритическую стадию – разрушение. Этот подход, предложенный авторами работы [25], широко используется в последние годы, как и кинетическая концепция прочности, для описания кинетики откольного разрушения. Что касается величины критического значения дефектности, то в этом вопросе нет единства мнений у различных авторов. Рассматривая этот подход в более широком плане, следует отметить, что один и тот же материал может разрушаться как в области 2 (точка b_4), т. е. при $\sigma << \sigma_0$, так и в области 3 (точка b_6) при $\sigma >> \sigma_0$. Очевидно, что степень дефектности может быть использована в качестве критерия разрушения лишь в узком интервале изменения начальных условий.

Из предложенной выше схемы ИП в проблеме разрушения, основанной на выполнении необходимого условия разрушения или неразрушения, следует ряд существенных выводов. Остановимся на четырех из них.

1. При рассмотрении ГП объектов существуют области состояний (рис. 1.1, области 1 и 4), где, вопреки МХР и ее модификациям, непрогнозируемое, внезапное, разрушение исключено. На первый взгляд этот вывод представляется малосущественным, так как относится к малым или слабонагруженным объектам. Однако имеется, по меньшей мере, один класс композитных материалов, при разрушении которых не проявляются МЭЭП, что позволяет создавать конструкции, работоспособные в области 1. Это композиты типа стеклопластика.

2. Такие свойства материала, как хрупкость, пластичность, при прочих равных условиях, определяются характерным разме-

ром образцов испытываемых материалов и, в частности, отношением L/L_{01}.

3. При разрушении ГП объектов в области 2 и, частично, 3 (рис. 1.1) должны проявляться МЭЭП.

4. Использование уравнений (1.2) или (1.3), основанных на требовании выполнения только необходимого условия разрушения (или неразрушения), не может полностью подменить МР. Однако в ряде случаев их использование позволяет существенно упростить поиск решения без отрыва от физики явления.

Поясним эти выводы. Прогнозируют ли МХР и ее модификации проявление МЭЭП? В явном виде – нет. Более того, считается, что природа МЭ статистическая. Какова ситуация на самом деле? Так, в [3] для протяженной пластины шириной L с центральным разрезом $2l$ найдено, что величина K_C есть

$$K_C = \sigma\sqrt{L\lg\left(\pi l/L\right)}. \tag{1.9}$$

Следуя МХР и считая разрез случайной величиной, независящей от L, получим, разложив в ряд подкоренное выражение (1.9):

$$K_C = \sigma\sqrt{\pi l\left[1+\left(\pi l/L\right)^2/3+\ldots\right]}. \tag{1.10}$$

Очевидно, влияние L выражается поправкой 2-го порядка малости. Такой же результат следует и при рассмотрении других видов трещин (разрезов) (формулы п. 25, 26, 28 в [3]). Конечно, наложение дополнительного ограничения l/L = const в рамках МХР приводит уравнение (1.9) к уравнению (1.7), выражающему МЭЭП, но одновременно сводит общее статистическое рассмотрение вопроса к частному маловероятному событию. С другой стороны, это ограничение превращает дефект в конкретную особенность, присущую объекту, а само рассмотрение – в ИП.

В качестве примера можно рассмотреть результаты работ [4] и [26] о причинах катастрофических разрушений трубопроводов. Так, в [26] при рассмотрении вспомогательной задачи получен Γ-интеграл и сформулировано условие надежности в форме неравенства. Отмечено, что «в это условие входят шесть независимых безразмерных параметров, поэтому его практически невозможно получить при помощи ЭВМ». Позднее, в [4] при использовании ИП было принято *необходимое* условие неразрушения (1.3), а в качестве *достаточного* условия – возможность разрушения трещиной вдоль трубопровода (так как в нем окружные напряжения в 2 раза превышают продольные). В результате элементарных преобразований было получено существенно более простое условие надежности трубопровода, описывающее проявление МЭЭП (1.7) и имеющее вид

$$\sigma_\Theta < \left[\frac{EG_{IC}}{\pi R\left(1-\mu^2\right)} \right]^{1/2}, \tag{1.11}$$

где σ_Θ – окружное напряжение, R – радиус трубопровода. Замечательно, что условие (1.11) вытекает и из вышеупомянутого условия [26], если из него исключить члены 2-го и 3-го порядков малости. В ряде случаев это обстоятельство лишний раз показывает преимущество и эффективность ИП.

Суммируя вышеизложенное, сформулируем основные характеристики разрушения твердого тела как феномена его состояния в свете современной МР (табл. 1.2).

Рассмотренные частные примеры, которые приводят к МЭЭП, дают основание надеяться, что условие (1.7) будет присуще всем решениям подобных задач МХР или ее модификаций. Таким образом, МЭ, впервые наблюдавшийся еще Галилеем при разрушении одной из ГП галер, но так и не понятый и квалифицированный им как «само свойство неизменяемой и лишенной всяких случайных несовершенств материи» [27], при использовании энергетического критерия разрушения в рамках ИП современной МР приобрел бы четкое физическое обоснование как проявление МЭЭП*. На этом фоне использование ИП и в проблеме космической безопасности

*По-видимому, для Галилея было неприемлемо объяснение, положенное позже в обоснование статистической природы МЭ.

Земли, а именно при математическом моделировании процессов взаимодействия МКТ с атмосферами планет, представляется вполне перспективным.

Таблица 1.2

Основные характеристики разрушения твердого тела

Вид разрушения	Область диаграммы состояний на рис. 1.1	Энергетические затраты на деформацию перед разрушением	Скорость процесса разрушения	Характерные параметры разрушения	НДС при разрушении
Пластический срез	Порог хрупкости не достигнут	≈ 100 % (практически вся энергия израсходована на деформацию перед актом разрушения)	Порядка скорости деформирования материала	σ, ε и их комбинации	За пределом текучести ($\sigma > \sigma_T$)
Хрупкий отрыв	За порогом хрупкости (большие размеры и скорости деформации, низкие температуры)	≈ 0	Сопоставима со скоростью звука в материале	G_{IC}, K_{IC}	Разрушение возможно при любом напряжении, вплоть до $\sigma \approx 0$

1.3. Приложение интегрального подхода к анализу разрушения МКТ в атмосфере

Активные исследования по математическому моделированию процессов взаимодействии МКТ с атмосферами планет начались во второй половине XX века. В первых работах в этом направлении [28–30] рассматривались МКТ сферической формы с диаметром D, внедряющиеся с гиперзвуковой скоростью V_0 в атмосферу