

10. Гришин А. М., Исаков Г. Н. О режимах гетерогенного воспламенения ПММА в потоке газообразного окислителя // ФГВ.— 1976.— № 3.
11. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа.— М.: Наука, 1965.
12. Найфэ А. Х. Методы возмущений.— М.: Мир, 1976.
13. Мамедов Я. Д., Аширов С. А. Нелинейные уравнения Вольтерра.— Ашхабад: Ылым, 1977.
14. Алексеев Б. В., Гришин А. М. Физическая газодинамика реагирующих сред.— М.: Выш. шк., 1985.
15. Ковеня В. М., Яненко И. Н. Метод расщепления в задачах газовой динамики.— Новосибирск: Наука, 1981.
16. Вилонов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ.— Новосибирск: Наука, 1984.
17. Исаков Г. Н. К вопросу о гетерогенном зажигании полупрозрачных материалов при радиационно-конвективном теплообмене // ФГВ.— 1979.— № 5.
18. Несмелов В. В., Исаков Г. Н. Исследование термодеструкции полимеров при нестационарном нагреве в потоке высокотемпературного газа // ИФЖ.— 1986.— Т. 50, № 3.
19. Дробышев В. И., Кириллов В. А. Математическая модель для описания тепло-массопереноса внутри пористого зерна при наличии фазовых переходов // ПМТФ.— 1985.— № 1.
20. Кузин Н. А., Стегасов А. Н. Низкочастотные колебания температуры зерна катализатора в экзотермических реакциях с фазовым переходом жидкость — газ // Хим. физика.— 1986.— Т. 5, № 12.

Поступила 29/1 1987 г.

УДК 539.4.019

О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ ХРУПКИХ РАЗРУШЕНИЙ

А. Г. Иванов
(Москва)

Процесс конструирования сосудов высокого давления, защитных оболочек химических и ядерных реакторов, корпусов судов, танкеров, а также других крупногобаритных объектов в качестве одного из этапов включает этап выбора материала.

До сих пор проблема хрупкого разрушения решается «...принятием традиционных эмпирических мер...» [1], «...методом проб и ошибок...» [2]. Выбор материала включает испытание образцов натурной толщины с использованием методов механики хрупкого разрушения (МР) и переходной температуры [3, 4]. Принимается, что, если образцы (включая и сварные) не разрушаются хрупко, не следует ожидать хрупкого разрушения и натурного объекта. Такой способ исключения хрупких разрушений представляется наиболее надежным из-за отсутствия единого критерия хрупкого разрушения в МР [1] и, как правило, невозможности прямых испытаний натурных объектов вплоть до их разрушения. Ввиду бесспорных успехов МР число хрупких разрушений объектов, рассчитанных в соответствии с существующими нормами прочности, хотя и резко сократилось, по полностью они не исключены. В настоящее время появились данные, ставящие под сомнение надежность способа ухода от хрупких разрушений испытанием образцов материала натурной толщины. Суть сомнений сводится к двум вопросам. 1. Насколько представителен и обоснован перенос результатов испытаний стандартных образцов натурной толщины несущего металла на реальные конструкции? 2. В какой мере найденные в экспериментах на образцах методами МР критические значения коэффициентов интенсивности напряжения при плоской деформации K_{Ic} и удельные энергии отрыва материала на единицу поверхности 2γ отвечают их значениям при автомоделном стационарном режиме хрупкого отрыва материала?*

Ответ на первый вопрос тесно связан с возможностью проявления геометрических масштабных эффектов (МЭ) энергетической природы при разрушении [7, 8] независимо от того, подобны ли помимо размеров объектов и их дефекты, как того требует МР [9, 10], и состоит в отыскании необходимых условий, при которых возможно (или невозможно) хрупкое разрушение.

В [11] методами МР с использованием Г-интегралов при некоторых упрощающих предположениях и решении дополнительной задачи найдены необходимые условия неразрушения трубопроводов. Анализ этого решения, проведенный в [12], показал, что основной смысл найденного в [11] решения заключается в существовании МЭ энергетической природы, непосредственно следующего из интегрального энергетического подхода к объекту в целом или его характерной части [7, 8], и что вклад инерционных и температурных членов в найденное решение пренебрежимо мал.

* Именно при таком режиме разрушения строго выполняются условия плоской деформации, значение 2γ достигает своего минимума и не зависит от толщины образца [5, 6].

Таким образом, определение баланса упругой энергии объекта и работы, затрачиваемой на его хрупкое разрушение, позволяет получить необходимое условие хрупкого разрушения (неразрушения), недостающего в МР [1, 8].

Математически найденное в [11, 12] условие хрупкого неразрушения труб малой относительной толщины после замены внутреннего давления в трубе на окружное напряжение σ посредством формулы Мариотта и отбрасывания несущественных членов есть

$$(1) \quad \sigma < \left[\frac{2\gamma E}{\pi R (1 - \nu^2)} \right]^{0,5},$$

где E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; R — радиус трубы. Из (1) следует, что граничное значение σ , при котором гарантировано отсутствие хрупкого разрушения, существенно зависит от R : чем больше R , тем при меньших значениях σ возможно хрупкое разрушение (при прочих равных условиях).

В какой мере зависимость (1) должна учитываться при выборе размеров стандартных образцов для отыскания K_{Ic} в МР? Принимая во внимание, что эквивалентом протяженности образца L в направлении, перпендикулярном трещине, является длина окружности трубы, подставляя $R = L/2\pi$, записывая необходимое условие хрупкого разрушения путем замены знака $<$ на \geq в выражении (1) и разрешая его относительно L , получим

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

В МР на толщину t стандартных образцов для определения K_{Ic} наложено ограничение $t \geq 2,5 (K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2$. Нас интересует только необходимое условие разрушения (неразрушения), поэтому требования к размеру исходной трещины не рассматриваем.

Значение L должно быть либо равно t (образцы НРС типа X), либо $L = 2,5 t$ (образцы НРС типа T или образцы ТСТ) [13, 14], так что последнее неравенство запишется как

$$(3) \quad L \geq (2,5 \dots 6,25)(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2.$$

Существенное различие неравенств (2) и (3) состоит в σ и $\sigma_{0,2}$. Так, для образцов материала, удовлетворяющих (3), выполнено условие хрупкого разрушения только при $\sigma \sim \sigma_{0,2}$. Однако есть реальная возможность хрупкого разрушения и при σ , значительно меньших $\sigma_{0,2}$, которая может и не реализоваться при испытаниях таких образцов.

По этой же причине результаты испытаний образцов материала или труб меньшего радиуса той же толщины, что у реального трубопровода, не дают корректного ответа на вопрос о надежности трубопровода. Этот вывод, по-видимому, справедлив и для других объектов, перечисленных ранее, и указывает на необходимость учета МЭ энергетической природы для избежания хрупких разрушений. Очевидно, что изложенные выше соображения справедливы и для сварных конструкций и позволяют понять, почему «... в некоторых случаях уровень напряжений, при котором образуется трещина, настолько низок, что возникает сомнение даже в возможности возникновения хрупкого разрушения...» [15], а также ответить на вопрос, почему в ряде случаев «... разрушение распространяется сквозь целые листы, а не вдоль швов...» [16].

Заметим, что выше, как и в [11, 12], в процессе передачи упругой энергии к развивающейся трещине не учитывалась диссипация энергии на внутреннее трение в металле. Не исключено, что при больших L этот эффект станет заметным так, что сможет на некотором этапе ограничить проявление МЭ энергетической природы.

Перейдем ко второму вопросу. Существует несколько способов определения удельной на единицу поверхности работы отрыва материала: а) испытание на ударную вязкость разрушения a_n стандартных образцов материала (например, образцов типа Шарпи); б) определение коэффициента K_{Ic} методами МР (см. выше) с последующим однозначным пересчетом к

искомому значению 2γ (или G_{1c}):

$$(4) \quad 2\gamma \text{ (или } G_{1c}) = K_{1c}^2 (1 - \nu^2)/E$$

(ν — коэффициент Пуассона); в) определение критического напряжения отрыва материала σ_p при одномерной деформации и всестороннем растяжении в опытах по ударно-волновому отколу с последующим пересчетом к удельной работе по отрыву материала λ . В акустическом приближении значение λ находится согласно выражению [8]

$$(5) \quad \lambda = \sigma_p^2 \delta (1 + \nu) (1 - 2\nu) / [2\beta E (1 - \nu)],$$

где $\beta = 3$ при нагружающем импульсе давления треугольной формы и $\beta = 1$ для прямоугольного импульса; δ — толщина отколовшегося слоя материала. Так как определение λ проводится в опытах по высокоскоростному нагружению материала при временах воздействующих импульсов $\tau \sim 10^{-5} \dots 10^{-6}$ с (характерные длины импульса нагружения ~ 1 см), возникает вопрос о необходимости введения поправки, учитывающей $\lambda(\tau)$. Однако изучение возможной зависимости $\lambda(\tau)$, проведенное в [17], показало, что она весьма слабая и на данном этапе рассмотрения ею можно пренебречь.

В экспериментах по откольному отрыву материала реализуется строго одномерная деформация, эквивалентная идеальному «стеснению» материала, фактически не достижимому в статических условиях, что является бесспорным преимуществом этого метода, как и малые возможные затраты упругой энергии на пластическое течение [8]. К специфике метода откола, помимо высокой скорости деформирования, следует отнести предварительное перед разрушением ударно-волновое сжатие материала, которое способно изменить его структуру и нагреть. Однако эти факторы могут быть учтены. Более того, автор [18], отмечая близость физических механизмов разрушения при отколе и распространении трещины, ставит вопрос об использовании откола для определения K_{1c} в пластичных материалах.

Сравнение, проведенное для мягких сталей, экспериментально найденных значений a_n в области хладноломкости, 2γ (или G_{1c}) при $T \sim -200^\circ\text{C}$ и λ указывает на их близкие значения, лежащие в интервале $5 \dots 20$ Дж/см² [7, 8, 18, 19]. С учетом многообразия факторов, могущих влиять на конечный результат измерений (текстура, направление проката, термообработка, размер образцов и т. п.), и не слишком большого объема исследований такой разброс данных представляется вполне естественным и в определенном смысле позволяет считать рассматриваемые характеристики, подобно K_{1c} в МР, как основные параметры разрушения материала. Близость значений a_n , 2γ и λ прослеживается и для других материалов при низких T , для которых имеются соответствующие данные (сплавы титана и алюминия).

Положение резко осложняется при сравнении хода температурных зависимостей a_n , 2γ , λ . Из общефизических соображений представляется естественным, что с повышением T вплоть до плавления следовало бы ожидать падения удельной работы по разрыву материала. Действительно, падающая зависимость $\lambda(T)$ наблюдается в опытах по откольному разрыву материалов [20] и в систематических исследованиях $\sigma_p(T)$ * [21, 22] не только для твердых материалов, но и для жидкостей [23], если не принимать во внимание некоторые участки $\lambda(T)$, выпадающие из общего хода кривых и, как показано в [23], связанные с фазовыми переходами. Так, согласно [20], для меди зависимость $\lambda = (0,4 - 0,55 T/T_{пл}) \cdot 10^5$ Дж/м² справедлива в интервале $T/T_{пл} = 0,05 \dots 0,6$.

Обращаясь к $a_n(T)$, как и к зависимостям $2\gamma(T)$, полученным из $K_{1c}(T)$ [14, 24], приходим к заключению, что они в отличие от $\lambda(T)$ растут с увеличением T . В чем причина такого расхождения?

* Согласно (5), при прочих равных условиях $\sigma_p^2 \sim \lambda E$.

Легко понять природу растущей зависимости $a_n(T)$. Действительно, с повышением T , как правило, падает $\sigma_{0,2}$, а так как размеры испытуемых образцов неизменны, то падает и запас упругой энергии образца, которого оказывается недостаточно для хрупкого разрушения материала даже при $\sigma \sim \sigma_{0,2}$. Поэтому с повышением T все большая часть сообщенной энергии затрачивается на работу пластической деформации образца в целом в объеме материала, не имеющую непосредственного отношения к работе отрыва материала по некоторой поверхности. Принципиально область «хладноломкости» можно было бы сдвинуть в область более высоких T , увеличивая размеры испытуемых образцов и используя эффект «охрупчивания» материала с ростом размеров объекта — МЭ энергетической природы. Так что a_n как удельной работой отрыва материала можно пользоваться только в области хладноломкости.

Сложнее понять причину роста K_{Ic} и 2γ с увеличением T . Действительно, несмотря на ограничения, наложенные на размеры стандартных образцов в МР [13, 14] вида (3), которые, по существу, следят за постоянством или неуменьшением отношения упругой энергии в образце к работе разрушения, значение 2γ растет с увеличением T . Так, согласно [24], для стали А216 при переходе от $T = -150^\circ\text{C}$ к $T = -20^\circ\text{C}$ значение 2γ возрастает от 5 до 38 Дж/см². Аналогичная картина сохраняется для сталей 28ХЗСНМВФА [24], 15Х2МФА [24], А533 [14], а также других металлов [10, 13, 14, 24]. Правда, для менее пластичных металлов (как сплавы титана) этот рост менее выражен. Вид динамических функций $K_{Ic}(T)$ [25] также подтверждает растущие зависимости $2\gamma(T)$.

Не подвергая сомнению важный вклад в проблему разрушения принятых в МР стандартных методов испытания материалов, нельзя не обратить внимания и на некоторые тревожные обстоятельства. Способы определения K_{Ic} в МР не гарантируют достижения режима автомодельности, стационарности области пластического течения в устье трещины, при которых K_{Ic} , а соответственно и 2γ могут быть приняты за характеристики материала. Только в условиях быстрораспространяющейся трещины [5, 6] достигается одномерная деформация при всестороннем растяжении — то же напряженное состояние, как при ударно-волновом откольном разрушении, и затраты упругой энергии на разгрузку через свободные границы образца сводятся к минимуму.

В свете изложенного нельзя исключить, что по мере роста T автомодельный стационарный режим разрушения будет достигаться на образцах все большего размера, недоступных для лабораторных испытаний, на образцах, где сильнее должны проявляться МЭ энергетической природы, что с необходимостью будет приводить к более высоким скоростям развития разрушения, локализации области пластического течения в устье трещины, уменьшению 2γ 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%...» [2]. Таким образом, значение 2γ при разрушении материала в стационарном, автомодельном режиме и при повышенных T может оказаться существенно меньшим, чем это следует из K_{Ic} , измеренных методами МР на стандартных образцах при T выше T хладноломкости, или, другими словами, сами K_{Ic} могут оказаться завышенными.

В заключение отметим следующее.

1. Отсутствие хрупкого (квазихрупкого) разрушения при лабораторных испытаниях методами МР стандартных образцов материала натурной толщины не дает гарантии от хрупкого (квазихрупкого) разрушения несущих элементов натурального объекта.

2. Резкое различие вида температурных зависимостей удельных работ разрушения металлов λ и 2γ , найденных из опытов по ударно-волновому отколу и из лабораторных исследований K_{Ic} методами МР, дает основа

ние предполагать, что K_{Ic} и соответственно 2γ вдаль от предела хладноломкости металлов существенно завышены.

3. Определенные методами МР запасы прочности крупногабаритных объектов могут оказаться существенно завышенными в сравнении с их фактическими значениями, что может быть причиной непрогнозируемых катастрофических разрушений таких объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойд Дж. Мурей. Практические примеры проектирования конструкций судов // Разрушение.— М.: Машиностроение, 1977.— Т. 5.
2. Адачи Хиро. Методы проектирования артиллерийского оружия // Там же.
3. Юкава С., Тимо Д. П., Рубио А. К расчету на хрупкую прочность вращающихся деталей машин // Там же.
4. Друккер Д. Макроскопические основы теории хрупкого разрушения // Разрушение.— М.: Мир, 1973.— Т. 1.
5. Авербах Б. Л. Некоторые физические аспекты разрушения // Там же.
6. Блом Джозеф И. Хрупкое разрушение и его предотвращение // Разрушение.— М.: Машиностроение, 1977.— Т. 5.
7. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабном критерии при хрупком разрушении конструкций // ДАН СССР.— 1975.— Т. 220, № 3.
8. Иванов А. Г., Минеев В. И. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ.— 1979.— № 5.
9. Вейс В., Юкава С. Критическая оценка механики разрушения // Прикладные вопросы вязкости разрушения.— М.: Мир, 1968.
10. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения.— М.: Наука, 1974.
11. Черепанов Г. П. О разрушении трубопроводов // ДАН СССР.— 1983.— Т. 272, № 3.
12. Иванов А. Г. О природе катастрофических разрушений трубопроводов // ДАН СССР.— 1985.— Т. 285, № 2.
13. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации.— М.: Мир, 1972.
14. Вессел Э., Кларк У., Прайл У. Расчеты конструкций с крупными сечениями методами механики разрушения // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению.— М.: Мир, 1972.
15. Мюнзе У. Х. Хрупкие разрушения в сварных соединениях // Разрушение.— М.: Машиностроение, 1977.— Т. 4.
16. Уайэтт О., Дью-Хьюз Д. Металлы, керамики, полимеры.— М.: Атомиздат, 1979.
17. Иванов А. Г. Феноменология разрушения и откол // ФГВ.— 1985.— № 2.
18. Степанов Г. В. Корреляция между энергетическими характеристиками разрушения — распространением трещины и отколом // Пробл. прочности.— 1983.— № 3.
19. Канель Г. И. О работе откольного разрушения // ФГВ.— 1982.— № 4.
20. Иванов М. А. Температурная зависимость удельной работы отрыва при отколе для Ст. 3 и меди // ФГВ.— 1979.— № 4.
21. Новиков С. А. Прочность при квазистатическом и ударно-волновом нагружении // ФГВ.— 1985.— № 6.
22. Молодец А. М., Дремин А. И. Непрерывная регистрация скорости свободной поверхности при откольном разрушении железа в области криогенных температур // ФГВ.— 1986.— № 2.
23. Иванов М. А. Температурная зависимость прочности глицерина при отколе // ПМТФ.— 1981.— № 1.
24. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов.— Киев: Наук. думка, 1977.
25. Тернер К., Радон Дж. Измерение сопротивления развитию трещины на малопрочных конструкционных сталях // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению.— М.: Мир, 1972.

Поступила 22/1 1987 г.

УДК 550.344.43:550.344.56:550.347.34

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН РЭЛЕЯ В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ. ЛИНЕЙНЫЙ ИСТОЧНИК

С. З. Дунин, Г. А. Максимов

(Москва)

Поверхностные акустические волны и, в частности, волны Рэлея привлекают внимание исследователей ряда областей науки и техники: сейсмологов, создателей микроэлектронной техники. Это обусловлено специфическими чертами, которыми об-