

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

УДК 620.174.2;539.4

ДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ
ПРИ КВАЗИХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ

© 2014 г. Е.И. Колоколов

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.

В статье показано, что трещиностойкость конструкционных сталей при квазихрупком разрушении можно определить путем анализа диаграмм нагрузка-деформация и фрактографического анализа излома цилиндрических образцов с острым кольцевым надрезом, испытанных на растяжение. Полученный динамический критерий трещиностойкости (ДКТ) – G соответствует критическому сопротивлению продвижения трещины G_c , вычисляемому через коэффициент интенсивности напряжений K_c согласно концепции линейной механики разрушения. Использование ДКТ является наиболее корректным способом определения работы развития трещины, определяемой в настоящее время путем испытаний на ударную вязкость призматических образцов с предварительно нанесенной усталостной трещиной.

Ключевые слова: трещиностойкость, Гриффитс, критерии разрушения, квазихрупкое разрушение, вязко-хрупкий переход (ВХП), пластическая деформация, упругая энергия, фрактография.

Поступила в редакцию 15.07.2014 г.

Проблема обеспечения надежности конструкционных сталей, работающих в сосудах под давлением и других ответственных металлоконструкциях, уже давно является актуальной для специалистов в области прочности и материаловедения. Разработаны и широко применяются концепции трещиностойкости, разработанные на основе линейной механики разрушения [1, 2]. Рассчитаны критические длины трещин, коэффициенты интенсивности напряжений для конструкций, испытывающих эксплуатационные нагрузки в разных условиях.

Развитие механики разрушения началось с пионерной работы Гриффитса [по 1–3], изучавшего причины очень низкой прочности хрупких материалов (стекло) по сравнению с теоретической ($\sigma_c \approx 0.1E$), рассчитанной на основе физической модели разрушения тела, в котором внешняя сила преодолевает силы межатомной связи двух параллельно расположенных слоев атомов (рис. 1). Гриффитс показал, что низкая прочность стекла обусловлена наличием трещин, приводящим к значительной концентрации напряжений. Для тонкой пластины с трещиной, находящейся в условиях плосконапряженного состояния (рис. 2), растягиваемой напряжением p , он получил соотношение: $(W = -\pi l^2 p^2 / E)$, где W характеризует работу, которая может быть получена из системы при образовании трещины. Если нагруженные границы тела зафиксированы, то величина W равна освобождающейся при разрушении упругой энергии. Для расширения трещины нужно преодолеть силы взаимодействия соседних атомных слоев, т.е. затратить некоторую работу. Для образования единицы свободной поверхности необходима работа γ . Величину γ , называемую плотностью поверхностной энергии, можно считать константой, характерной для материала в данных условиях (температура, внешняя среда и т.д.). Закон сохранения энергии по

Гриффитсу: $-dW = d\varepsilon$, где $-dW$ – уменьшение упругой энергии напряженного образца в процессе его разгрузки при росте трещины, равное увеличению свободной поверхностной энергии $d\varepsilon$. Плотность поверхностной энергии можно оценить, произведя расчеты по кривой, приведенной на рисунке 1б. Опустив соответствующие выкладки, приведенные, например, в монографии Л.М. Качанова [1], приведем конечную формулу Гриффитса: $p^2 = 2E\gamma/\pi l$. Эта формула при заданной длине l определяет критическое напряжение $p = p^*$, приводящее к расширению трещины. В этом случае размер l является критическим (l_c). Так как с увеличением длины l критическое напряжение уменьшается, далее происходит быстрое (лавинное) разрушение. Из последней формулы вытекает, что для данного материала $p\sqrt{\pi l} = \sqrt{2E\gamma} = \text{const}$. Для хрупких материалов это соотношение качественно подтверждается (т.е. $p^* \sim 1/\sqrt{l}$), например, опытами Гриффитса со стеклом. Следует отметить, что ввиду обратимости упругих деформаций, небольшие трещины могут заживать. Критическая длина трещины в стекле согласно критерию Гриффитса составляет всего несколько микрон. Для материалов, разрушение которых сопровождается большой пластической деформацией, например, конструкционных сталей, наблюдаются большие количественные отклонения и формула Гриффитса неприменима.

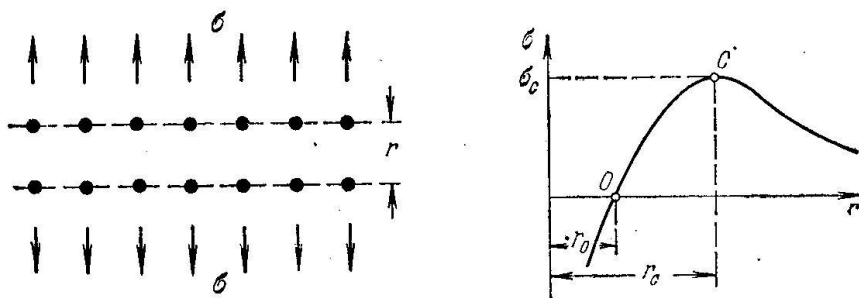


Рис. 1. – Физическая модель твердого тела в условиях механического нагружения. Справа – график зависимости разрушающих напряжений в функции расстояния между атомами

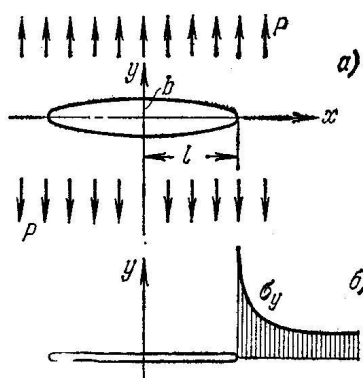


Рис. 2. – Модель тонкой пластины с трещиной в поле напряжений p

Процесс разрушения складывается из двух стадий – зарождения трещины и ее распространения, причем каждая из них подчиняется своим закономерностям. Среди критериев прочности одни описывают условия зарождения трещины, другие – ее распространения. Первые – фактически есть критерии наступления опасного состояния в точке в рассматриваемый момент. Вторые – исходят из наличия в теле трещины и фактически являются критерием начала распространения трещины. Предельное состояние равновесия считается достигнутым, если трещиноподобный разрез получил возможность распространяться, т.е. становится трещиной. Этот критерий может быть

получен как на основе энергетических соображений, так и силовых. Концепция Гриффитса носит название энергетической. Роль энергии согласно этой концепции состоит в следующем: Одной концентрации напряжений у вершины трещины мало для того, чтобы разрушить тело. Если не обеспечить подвода достаточной энергии к ее вершине, то разрушение прекратится. Этой энергией является W – освобождающаяся при разрушении упругая энергия. Проведение расчетов на прочность тел с трещинами по Гриффитсу, исходя из расчета энергии деформации всего тела, очень сложны и фактически не выполнялись, так как уже в 1957 г. Дж. Р. Ирвин сформулировал другую, более удобную для вычислений силовую концепцию в механике хрупкого разрушения и показал, что оба подхода эквивалентны [4]. Он же вычислил этот поток через работу сил сцепления у вершины трещины [4], т.е. применил силовой подход к данной задаче. В результате этого решения получилась новая характеристика трещиностойкости $K = \sigma\sqrt{\pi l}$ – коэффициент интенсивности напряжений, характеризующий локальные упругие напряжения, развивающиеся в области вершины трещины. Ирвин ввел параметр G , характеризующий сопротивление продвижению трещины. Согласно решению Ирвина для плоского напряженного состояния $G = K^2/E$.

Таким образом, согласно концепции Ирвина трещина получает возможность распространяться в том случае, когда:

- 1) интенсивность освобождающейся энергии G достигает критической величины $G_c = \delta\Gamma/\delta S = \text{const}$ (энергетический критерий);
- 2) коэффициент интенсивности напряжений K достигает критической величины $K_c = \text{const}$ (силовой критерий).

Ирвин же ввел и пластическую поправку к длине трещины, увеличив ее на величину рассчитанного им размера зоны пластической деформации $r_y = K^2/2\pi\sigma_t^2$, где σ_t – предел текучести. Формула приведена для плоского напряженного состояния. Плоская деформация при объемном напряженном состоянии уменьшает размер пластической зоны (в этом случае ей можно пренебречь), разрушение становится более хрупким, а напряжения разрушения – более низкими.

Венгерский ученый Е.О. Орован в 1952 г., проводя эксперименты на плитах из малоуглеродистой стали с искусственно нанесенными трещинами, обратил внимание, что в области кончика таких трещин происходят необратимые пластические деформации. После разрушения искаженная пластической деформацией зона сосредотачивается в тонком слое вблизи поверхности трещины. Такое разрушение было названо квазихрупким. Был сделан вывод, что затраты энергии в процессе создания новых поверхностей при развитии трещины связаны, главным образом, с работой пластической деформации объемов материала, расположенных перед фронтом трещины. Если линейные размеры этих объемов малы по сравнению с длиной трещины, то поток упругой энергии по-прежнему можно вычислить, сообразуясь с упругим решением, а затраты энергии на разрушение относить к работе пластической деформации. На основе этой концепции квазихрупкого разрушения Орован скорректировал схему Гриффитса применительно к металлам [5], приписав поверхностной энергии γ более широкий смысл и заменив ее в формуле Гриффитса суммой $(\gamma + \gamma_p)$, где γ_p – работа пластической деформации при образовании единицы поверхности. Так как для металлов $\gamma_p \gg \gamma$ (например, для малоуглеродистой стали $\gamma_p \approx 10^3 \gamma$), столь значительная пластическая работа обеспечивает их хорошее сопротивление хрупкому разрушению по сравнению со стеклами [2, 9]. Величиной γ в формуле Гриффитса можно пренебречь. В этом случае $\rho\sqrt{\pi l} = \sqrt{2E\gamma_p} = \text{const}$. Критический размер трещины в металлах согласно данной модели составит уже несколько мм.

Расчеты на прочность материалов с трещиноподобными дефектами с

применением вышеприведенной формулы получили название расчетов на трещиностойкость (в английской терминологии «fracture toughness» – буквальный перевод «вязкость разрушения»). Интенсивность напряжений в вершине трещины характеризуется множителем $\sigma\sqrt{\pi l}$ и существенна не только при статическом нагружении, но и при циклическом нагружении, коррозии под напряжением, при быстром лавинном распространении трещин в крупных металлоконструкциях. В сущности же понятие «трещиностойкость» объединяет разнообразные свойства металлов, связанные с их механическим нагружением и определяемые микроструктурой и способностью к пластической деформации. Эта характеристика важна и приобретает все более широкое использование при оценке свойств высокопрочных материалов, для которых концентрация напряжений имеет первостепенное значение. В конструкциях из высокопрочных материалов аккумулируется большая потенциальная энергия и при образовании в них трещин даже небольшого размера может произойти быстрое разрушение.

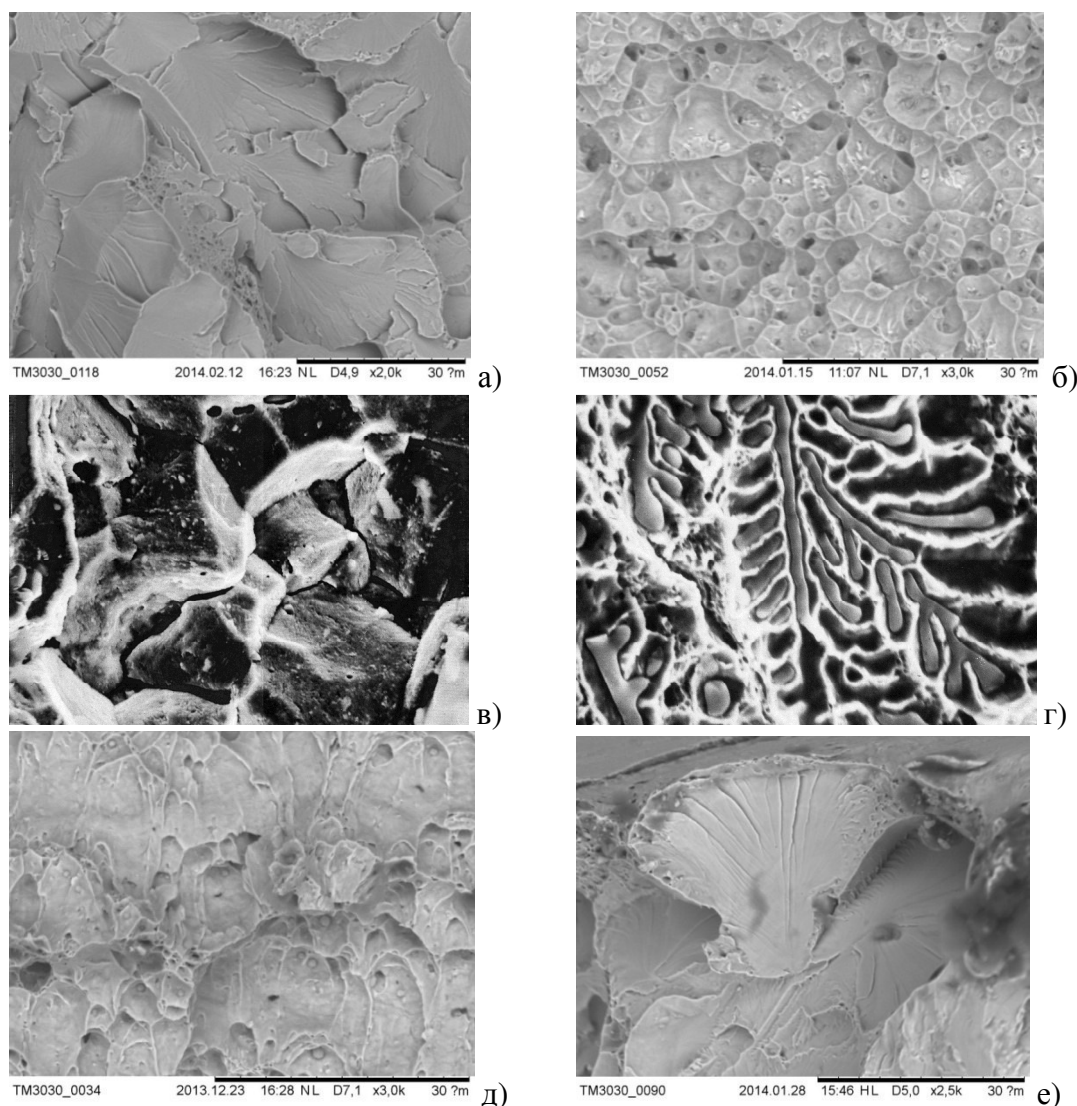


Рис. 3. – Характерный вид микрофрактограмм, полученных на растровом электронном микроскопе: а – скол по плоскостям спайности, малоуглеродистой стали; в центре – перемычка между трещинами скола, распространяющимися в разных плоскостях, разрушенная срезом; б – вязкое разрушение высокопрочной стали с малой энергоемкостью – плоские ямки со скоплением включений на дне; в – межзеренное разрушение (камневидный излом); г – вязкое межзеренное разрушение по вырожденной сульфидной эвтектике; д – разрушение срезом – вытянутые ямки; е – участок трещины скола, распространявшейся в направлении надреза (вверху).

Следует отметить, что в основе концепции хрупкого разрушения Гриффитса лежит простая физическая модель, согласно которой происходит разделение тела между двумя соседними слоями атомов, расположенными перпендикулярно направлению растяжения (рис. 1). Механизмом такого разрушения является скол по плоскостям спайности. Модель квазихрупкого разрушения Орована – Ирвина, разработанная и опробованная на малоуглеродистых сталях, опирается на разрушение сколом по плоскостям спайности, сопровождаемого пластической деформацией (рис. 3а). Все расчеты и прикидки, осуществляемые в рамках этих концепций, осуществлялись в рамках теории сплошных сред. В дальнейшем концепция Ирвина была распространена и на другие материалы, в которых квазихрупкое атермическое разрушение сколом не происходит: алюминиевые и титановые сплавы, нержавеющие аустенитные стали, высокопрочные сплавы на никелевой основе и др. В них действуют термически активируемые процессы разрушения: ямочное по границам (рис. 3г), или внутри зерен (рис. 3б), межзеренный камневидный излом (рис. 3в) и др. Такое расширительное толкование квазихрупкого разрушения требует дополнительных обоснований.

Наши работы посвящены исследованию процессов развития разрушения в конструкционных сталях с ОЦК-структурой, испытывающих вязко-хрупкий переход (ВХП). В них осуществляется механизм хрупкого атермического разрушения сколом, заложенный в концепции Гриффитса-Орована. Общие закономерности разрушения в интервале ВХП изложены в работах [6, 7]. Отличительной особенностью такого разрушения в полосе разброса данных испытаний является медленное докритическое подрастание трещины по вязкому ямочному механизму, прерывающееся быстрым нестабильным разрушением, сопровождаемым резким звуковым эффектом. На кривых нагрузка – деформация надрезанных образцов при растяжении (рис. 4) и изгибе (рис. 5) видны участки роста и спада нагрузки при подрастании трещины и участки резкого спада нагрузки, сопровождающие быстрое разрушение. На изломе образцов видны темные участки подрастания трещины с вязким ямочным рельефом разрушения и блестящие участки макроскопически хрупкого излома (рис. 6) с ярко выраженными признаками квазихрупкого разрушения (рис. 3а, 3д, 3е), содержащие, в основном, элементы разрушения сколом, а также перемычки с ямочным изломом между участками скола, элементы межзеренного разрушения, разрушения неметаллических включений, расслоения и др.

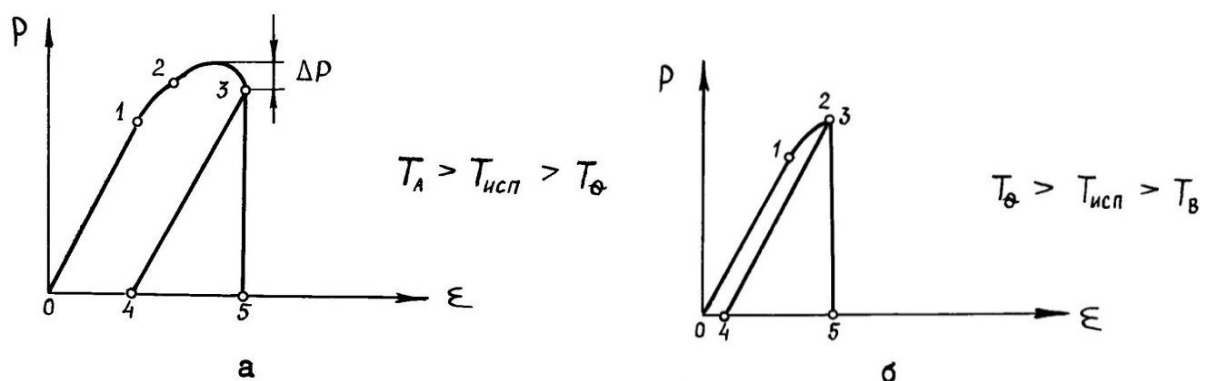


Рис. 4. – Схематическое изображение кривых нагрузка-деформация при растяжении цилиндрических образцов с острым кольцевым надрезом в интервале ВХП; а) верхний участок ВХП, б) нижний участок ВХП. Точка 2 соответствует началу появления вязкого излома в вершине концентратора. Треугольник 3-4-5 соответствует упругой энергии выделившейся в процессе хрупкого разрушения

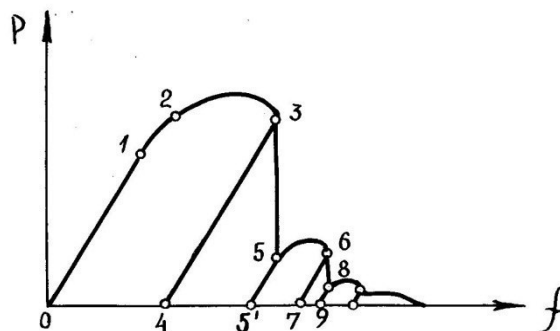


Рис. 5. – Схематическое изображение кривых нагрузка-прогиб при статическом или ударном изгибе призматических образцов с острым надрезом в верхней части интервала ВХП. Точка 2 соответствует появлению участка вязкого разрушения под надрезом. Трапеция 3-4-5-5' соответствует упругой энергии выделившейся в процессе хрупкого разрушения при первом скачке трещины; участок 5-5'-6-7 соответствует вторичному подрастанию вязкой трещины; трапеция 6-7-8-9 соответствует упругой энергии выделившейся в процессе хрупкого разрушения при втором скачке трещины; участок правее линии 8-9 соответствует энергоемкости зоны сжатия



Рис. 6. – Вид излома образцов с острым надрезом из стали 10ГН2МФА, испытанных на ударный изгиб при комнатной температуре в полосе разброса в верхней части интервала ВХП. Вверху под надрезом видна зона подрастания вязкой трещины, различающаяся для всех приведенных образцов; в центре – блестящая зона макроскопически хрупкого разрушения; по бокам участки среза; внизу – вязкая зона сжатия. Профиль излома имеет искаженную деформацией форму

Разрушение в интервале ВХП вне зависимости от скорости нагружения, типа и размера образцов или изделий имеет динамический характер. Этот фактор в концепциях Гриффитса и Ирвина учтен не был. Фактически в уравнении сохранения должен присутствовать еще один член dQ – механические потери при разрушении. В результате, уравнение приобретает вид: $-dW = d\varepsilon + dQ$ [3]. Различают механические потери трех видов:

1) Так называемые деформационные потери, особенно выраженные в областях концентрации напряжений (в основном, эти потери были учтены Орованом и Ирвином введением соответствующих поправок).

2) Рассеяние упругой энергии при разрыве связей в вершине растущей трещины. Эта составляющая играет роль при оценке поведения материалов на уровне микромеханизмов разрушения.

3) Динамические механические потери – переход части упругой энергии в кинетическую энергию раздвижения стенок быстро растущей хрупкой трещины и кинетическую энергию разлетающихся осколков.

Динамическая природа хрупкого разрушения проявляется следующим образом. Упругая энергия, запасаемая в системе образец-машина при механическом нагружении образца с надрезом, сосредотачивается, в основном, в образце – в плоскости, содержащей концентратор напряжений (рис. 2). Часть этой энергии расходуется на пластическую деформацию, упрочнение и вязкое ямочное разрушение материала в пластической зоне перед концентратором напряжений. Фактически, вязкое разрушение – это заключительная стадия пластической деформации в упрочняющихся материалах, содержащих включения. В процессе пластической деформации пик напряжений перед концентратором в области пластической зоны уменьшается за счет их релаксации (рис. 7а). Другая часть упругой энергии приводит к росту внутренних напряжений в недеформированном участке впереди пластической зоны, где релаксация напряжений незначительна. Если эти напряжения не превышают критической величины σ_k , при которой происходит хрупкое разрушение, пластическая зона будет перемещаться вперед (рис. 7а), увеличивая уровень действующих напряжений в оставшемся сечении. Пока осуществляется подвод упругой энергии в зону концентратора напряжений, происходит стабильный, докритический рост вязкой трещины, который может привести к конечному разделению образца на две части. Если напряжения достигают критической величины σ_k , впереди пластической зоны происходит взрывное хрупкое разрушение в плоскости, перпендикулярной направлению действия растягивающих напряжений. Очагом хрупкого разрушения (рис. 3е) обычно является какое-либо неметаллическое включение, расположенное в зоне наибольших напряжений на расстоянии l_0 (рис. 7б) от границы зоны подрастания.

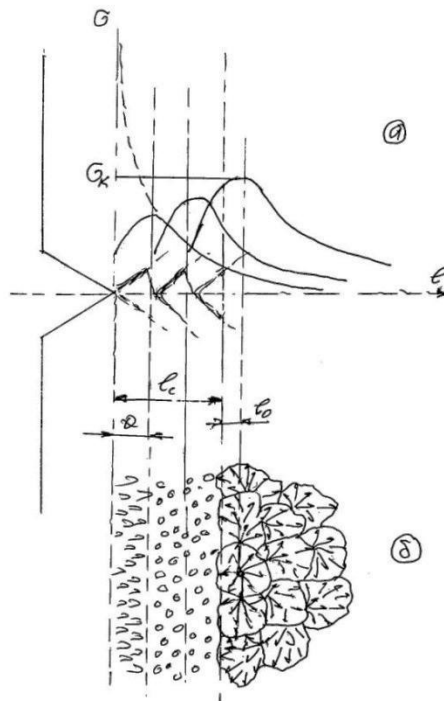


Рис. 7. – Схема продвижения докритической вязкой трещины и перехода к хрупкому разрушению сколом (а). Схема строения излома в интервале ВХП для малоуглеродистых сталей. σ_k – критическое напряжение, при котором образуется первая фасетка скола; Θ – ширина зоны среза; l_c – критический размер зоны подрастания вязкой трещины; l_0 – расстояние от очага разрушения до границы зоны подрастания

Размер зоны макроскопически хрупкого (квазихрупкого) разрушения в изломе образца определяется имеющимся запасом упругой энергии. В процессе развития хрупкого разрушения упругая энергия расходуется на преодоление сил связи и образование трещины скола по плоскостям спайности, разрыв перемычек между соседними участками трещины скола, преодоление границ зерен и других дефектов микроструктуры (рис. 3а,е). Так как скорость роста трещины скола сопоставима со скоростью звука в металле [8], часть упругой энергии идет также на распространение волн напряжений и кинетическую энергию перемещения частей разрушившегося образца или изделия.

В верхней части интервала ВХП (между точками T_a и T_θ на рис. 8 и рис. 9) наблюдается разброс как значений суммарной энергии деформации и разрушения (характерный вид этих диаграмм показан на рис. 4 и рис. 5, соответственно), так и размера участков докритического подрастания трещины и макроскопически хрупкой зоны в изломе (рис.6), определяемых запасом упругой энергии в системе. На диаграммах нагрузка-деформация образцов с надрезом, испытанных на растяжение и трехточечный изгиб были выделены зоны (участки ограниченные точками 3-4-5 на рис. 4 и 3-4-5' на рис.5), соответствующие работе, совершаемой при образовании участков макроскопически хрупкого (квазихрупкого) разрушения. Был проведен подсчет соответствующей этим участкам упругой энергии ($A_{упр}$) и фрактографическое определение площадей участков макроскопически хрупкого разрушения ($S_{хр}$). Из рисунка 10 на примере испытаний на растяжение при комнатной температуре цилиндрических образцов с надрезом из мартенситных сталей 12X13 и 12X13Ш видно, что площадь участков хрупкого разрушения ($S_{хр}$) пропорциональна величине соответствующей $A_{упр}$.

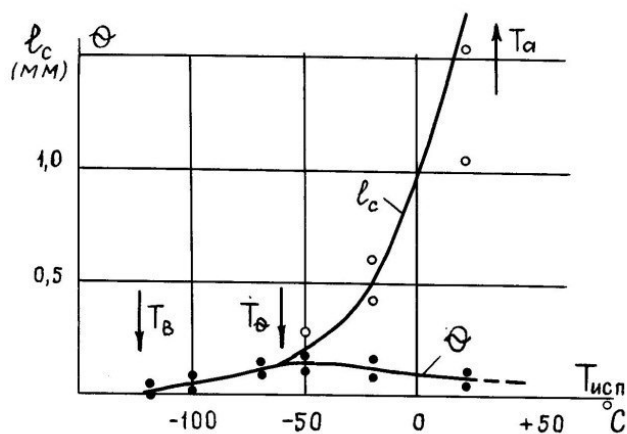


Рис. 8. – Температурная зависимость зоны подрастания вязкой трещины l_c в цилиндрическом образце с острым кольцевым надрезом; Θ - ширина зоны среза под надрезом

Химический состав сталей и режим их термической обработки приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав сталей и режим их термической обработки

Материал	Химический состав %								Термообработка
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	
12X13	0.11	0.35	0.37	0.016	0.017	13.37	0.18	0.08	Отжиг 860 ⁰ С; закалка 1000-1050 ⁰ С, масло; отпуск 700-740 ⁰ С.
12X13Ш	0.12	0.30	0.30	0.011	0.012	12.45	0.26	0.07	

Получена эмпирическая зависимость:

$$A_{упр} = G S_{хр} , \tag{1}$$

в которой коэффициент пропорциональности G (кГм/мм²) является мерой энергоемкости квазихрупкого разрушения, приходящейся на единицу площади хрупкого излома, и определенный фраттографическим методом, т.е. анализом излома после разрушения образца. G является структурно-чувствительной характеристикой. Например, из рисунка 10 видно, что ее значение выше в более чистой стали (для стали 12Х13Ш тангенс угла наклона больше).

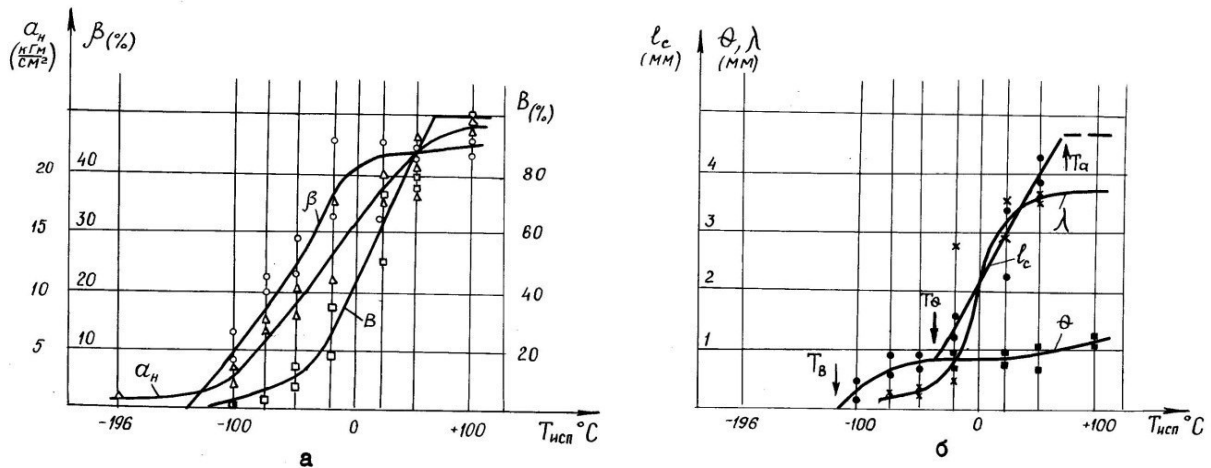


Рис. 9. – Температурные зависимости параметров излома призматических образцов, испытанных на ударный изгиб в интервале ВХП

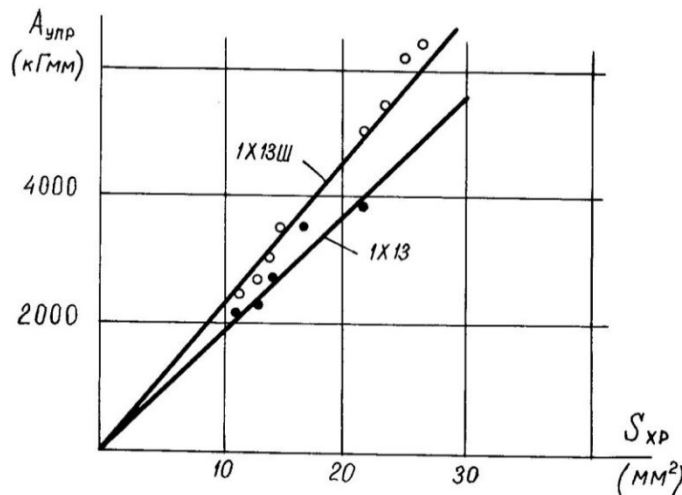


Рис. 10. – Экспериментальная зависимость работы, совершенной источником нагружения, затраченной на образование поверхности макроскопически хрупкого излома ($S_{хр}$) и равной запасу упругой энергии ($A_{упр}$), накопленной в системе образец-машина к моменту начала катастрофического хрупкого разрушения

Ниже точки T_0 на рисунке 8 докритического подрастания трещины в вершине надреза не наблюдается. Здесь вязкое разрушение сосредоточено в пределах участка среза, по одной из ветвей зоны пластической деформации (рис. 7). Ширина участка среза при снижении температуры испытаний уменьшается до нуля при полностью хрупком изломе (в точке T_B). При этих температурах размер $S_{хр}$ определяется с учетом наличия зоны разрушения срезом.

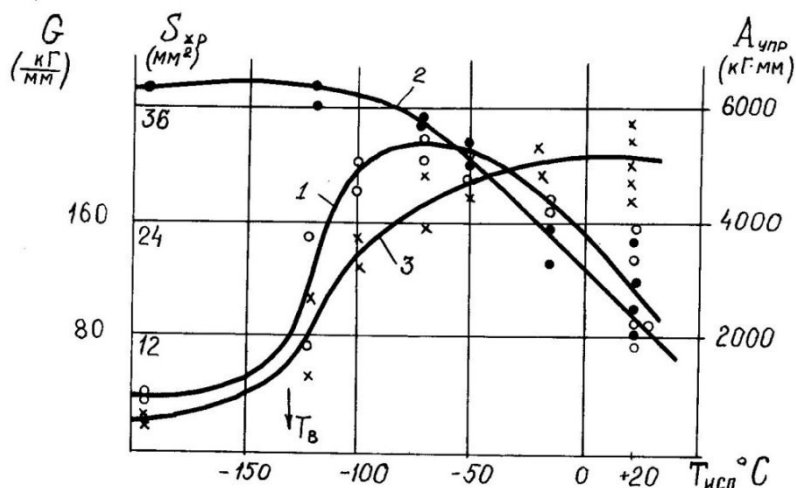


Рис. 11. – Температурная зависимость характеристики трещиностойкости G (1), площади зоны макроскопически хрупкого разрушения S_{xp} (2) и запаса упругой энергии в момент начала катастрофического хрупкого разрушения $A_{чпp}$. В точке, соответствующей испытанию при температуре жидкого азота, S_{xp} соответствует площади сечения образца под надрезом, $A_{чпp}$ – энергии хрупкого разрушения образца без признаков предшествующей пластической деформации

На рисунке 11 показана температурная зависимость характеристики энергоемкости квазихрупкого разрушения G (кривая 1) для высокоотпущенной мартенситной стали 12X13. Из кривой видно, что наибольшая энергоемкость наблюдается в области температуры T_0 . При понижении температуры энергоемкость падает, ввиду уменьшения доли элементов вязкого разрушения на фоне участков разрушения сколом. При повышении температуры наблюдается снижение, обусловленное облегчением условий пластической деформации при снижении предела текучести.

Характеристика G , определенная по формуле (1), – это характеристика трещиностойкости, так как определяет энергоемкость квазихрупкого разрушения, определенную при измерении параметров именно этого разрушения. Данная характеристика, получена фрактографическим методом и имеет динамическую природу, так как ее определение связано с изменением упругой энергии в системе, ростом напряжений до критического уровня и возникновением критической ситуации, обусловленной неожиданным лавинообразным хрупким разрушением, имеющим динамический характер.

Можно ли связать эту эмпирически полученную характеристику с трещиностойкостью, теоретическое обоснование которой осуществлено в рамках концепций Гриффитса-Орована-Ирвина? Интуитивно – да, так как очевидно, что характеристика G – это характеристика квазихрупкого разрушения, основным элементом которого является скол, что фактически и предполагается в вышеуказанных концепциях. Вернемся к их сущности [1, 2, 4]. Предельное состояние равновесия тела с трещиной считается достигнутым, когда трещиноподобный разрез получил возможность распространяться, и тогда разрез становится трещиной. Чтобы он стал распространяться, увеличивая свою поверхность, требуется израсходовать энергию, равную по величине работе, которую надо произвести, чтобы обеспечить целостность материала перед кромкой разреза. Эту работу (конечно же, с обратным знаком) можно назвать работой разрушения. Одновременно с образованием новой поверхности, которая становится свободной от нагрузок, в прилегающем к этой поверхности объеме резко снижается деформация. Это приводит к соответствующему выделению из тела

упругой энергии. На основании закона сохранения энергии при развитии трещины на величину δS соблюдается энергетическое условие вида:

$$\delta G = G \delta S, \quad (2)$$

где δG – работа разрушения необходимая для образования новой поверхности разрыва площадью δS ,

G – поток энергии в вершину трещины, отнесенный к единице площади трещины (интенсивность освобождающейся упругой энергии), другими словами сопротивление продвижению трещины [2].

Так как непосредственное вычисление потока энергии, идущего в вершину трещины, – очень трудная математическая задача даже в рассмотрении Гриффитса, непосредственному анализу этого соотношения исследователи не уделяли достаточного внимания, сосредоточившись на результатах силового подхода Ирвина.

Рассмотрим условия энергетического равновесия в момент начала движения трещины согласно формуле (2) с учетом закономерностей разрушения сталей в интервале ВХП и сравним эту формулу с эмпирически полученной нами формулой (1), оценивающей энергоёмкость квазихрупкого разрушения. Можно показать, что выражения в формулах (1) и (2), которые внешне подобны, практически идентичны.

– Формула (2) показывает, что энергетический баланс тела с трещиноподобным дефектом при начале движения трещины должен определяться работой разрушения δG , необходимой для образования новой поверхности разрыва площадью δS .

– Формула (1) показывает, какие затраты упругой энергии ($A_{упр}$) были произведены источником механического нагружения при образовании трещины макроскопически хрупкого разрушения ($S_{хр}$), определенной после разрушения образца фрактографическим методом.

Можно считать очевидным, что в условиях квазихрупкого разрушения начало движения трещины соответствует моменту срыва на диаграмме нагрузка – деформация. В любые предшествующие моменты докритического подрастания трещины по вязкому механизму квазихрупкого разрушения нет по определению, а само вязкое разрушение нельзя отделить от предшествующей пластической деформации, так как фактически – это стадия зарождения трещины, а не ее распространения.

С учетом этого разъяснения новая поверхность разрыва площадью δS из формулы (2) соответствует площади трещины макроскопически хрупкого разрушения $S_{хр}$ из формулы (1). Работа разрушения δG , необходимая для образования новой поверхности разрыва, из формулы (2) – равна затратам упругой энергии ($A_{упр}$), которые были произведены источником механического нагружения при образовании трещины макроскопически хрупкого разрушения из формулы (1).

Отсюда следует, что характеристика G – мера энергоёмкости квазихрупкого разрушения из формулы (1) идентична параметру G – интенсивности освобождающейся упругой энергии или сопротивлению продвижения трещины из формулы (2). Эта характеристика соответствует значению G_c – критическому сопротивлению продвижения трещины по Ирвину, который, таким образом, легко определяется экспериментально. Так как определение параметра G осуществляется нами для динамической системы образец – машина в критический момент наступления хрупкого разрушения, осуществляющегося под действием накопленной в этой системе упругой энергии, мы обозначили эту характеристику термином «Динамический критерий трещиностойкости» (ДКТ). Характеристики трещиностойкости, определенные в рамках линейной механики разрушения, используют статический

подход к разрушению. Для рассмотренных выше сталей 12Х13 и 12Х13Ш при комнатной температуре G_c равно 91 и 118 кГ/мм соответственно.

ДКТ G можно использовать для определения работы развития трещины, определяемой в настоящее время путем испытаний на ударную вязкость призматических образцов с предварительно нанесенной усталостной трещиной.

При ударном изгибе надрезанных образцов на изломе кроме зоны докритического подрастания трещины выявляются губы среза по бокам образцов, зона вязкого разрушения в месте удара молота маятникового копра (рис. 12а). Трещина хрупкого разрушения движется в уже продеформированном на предшествующей стадии образце (степень деформации характеризуется степенью искажения формы излома – β). Все эти факторы завышают и искажают полученные значения работы развития трещины. Температурные зависимости этих параметров излома значительно отличаются (рис. 9). Более корректным способом является использование данных испытаний цилиндрических образцов с острым кольцевым надрезом, где эти факторы отсутствуют (рис. 12б). Фактически G соответствует истинным значениям работы развития трещины.

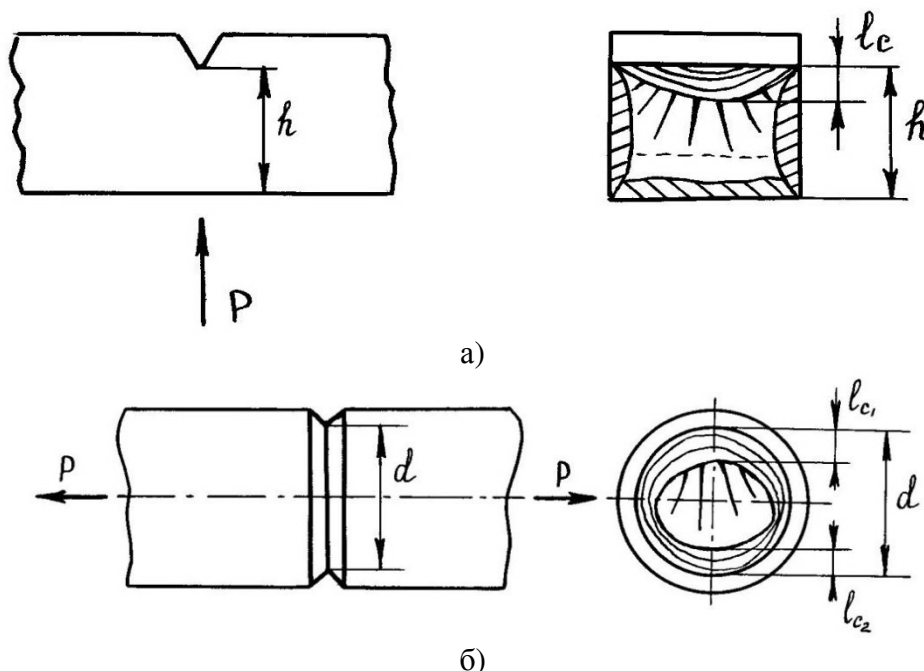


Рис. 12. – Схематическое изображение вида излома образцов, испытанных в верхней части интервала температур ВХП:

а) призматических образцов с острым надрезом при испытаниях на ударную вязкость:

- a_n – ударная вязкость;
- B – доля вязкой составляющей;
- β – деформационная характеристика (искажение формы излома).

б) цилиндрических образцов с острым кольцевым надрезом:

- l_c – критический (максимальный) размер зоны подрастания вязкой трещины;
- Θ – ширина зоны среза под надрезом;
- λ – ширина губ среза по краям излома.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения [Текст] / Л.М. Качанов. – М. : Наука, 1974.
2. Партон, В.З. Механика разрушения от теории к практике [Текст] / В.З. Партон. – М. : Наука, 1990.
3. Бартнев, Г.М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла [Текст] / Г.М. Бартнев. – М. : Стройиздат, 1974.

4. Ирвин, Дж. и др. Основы теории роста трещин и разрушения. Разрушение [Текст] / Дж. Ирвин, П. Парис. – Т. 3. – М. : Мир, 1976.
5. Orowan E. Proseedings of the Symposium on Fatigue and Fracture of Metals. Wiley, N.F., 1952. P. 139.
6. Колоколов, Е.И. Исследование особенностей разрушения конструкционных сталей в интервале вязко-хрупкого перехода при различных условиях разрушения : автореф. дис. канд. техн. наук [Текст] / Е.И. Колоколов. – 1979. – 26 с.
7. Ботвина, Л.Р. и др. [Текст] / Л.Р. Ботвина, Е.И. Колоколов // ФХММ. – 1976. – С. 23–26.
8. Финкель, В.М. Физика разрушения. Metallurgiya [Текст] / В.М. Финкель. – М., 1970.
9. Вигли, Д.А. Механические свойства материалов при низких температурах [Текст] / Д.А. Вигли. М. : Мир, 1974.

Dynamic Criterion of Crack Resistance of Structural Steels at Quasi-fragile Destruction

E.I. Kolokolov

*Volgodonsk Engineering Technical Institute
the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360 e-
mail: VITkafMPM@mephi.ru*

Abstract – In article it is shown that the fracture toughness of structural steels with quasigroups destruction can be determined by analyzing the charts load-deformation and factographic analysis of fracture cylindrical samples with sharp ring cut tested on strength. Retrieved dynamic criterion of fracture toughness (VCT) - G corresponds to the critical resistance promotion cracks GC, calculated through the stress intensity factor KS according to the concept of linear fracture mechanics. The use of VCT is the most correct way to determine the work of development of cracks, determined at present by testing for impact strength prismatic samples with pre-applied fatigue crack.

Keywords: crack resistance, Griffiths, criteria of destruction, quasigroups destruction, visco-brittle transition (VHP), plastic deformation, elastic energy, fractography.

REFERENCES

- [1] Kachanov L.M. Osnovy mehaniki razrusheniya [Introduction to probability theory and its appendices]. M. Pub. Nauka [Science], 1974. (in Russian)
- [2] Parton V.Z. Mehanika razrusheniya ot teorii k praktike [Mechanics of destruction from the theory to practice]. M. Pub. Nauka [Science], 1990, ISBN 5-02-014287-5, 240 p. (in Russian)
- [3] Bartenev G.M. Sverhprochnye i vysokoprochnye neorganicheskie stekla [Heavy-duty and high-strength inorganic glasses]. M. Pub. Strojizdat [Stroyizdat], 1974 (in Russian)
- [4] Irvin Dzh, Paris P. Osnovy teorii rosta treshhin i razrusheniya. Razrushenie [Bases of the theory of crack growth and destruction. Destruction]. Т. 3 [Vol.3]. М. Pub. Mir [“Mir”], 1976. (in Russian)
- [5] Orowan E. Proseedings of the Symposium on Fatigue and Fracture of Metals. Wiley, N.F., 1952. p. 139. (in English)
- [6] Kolokolov E.I. Issledovanie osobennostej razrusheniya konstrukcionnyh stalej v intervale vjazko-hrupkogo perehoda pri razlichnyh uslovijah razrusheniya [Research of features of constructional steel destruction in viscous and fragile transition interval under various conditions of destruction] : avtoref. dis. kand. tehn. nauk. [PhD thesis abstract in Engineering]. М. 1979, 26 p. (in Russian)
- [7] Botvina L.R., Kolokolov E.I. Vvedenie v teoriyu veroyatnosti i ee prilozheniya [Introduction to probability theory and its appendices]. FHMM [PhChMM’]. 1976, pp. 23–26. (in Russian)
- [8] Finkel V.M. Fizika razrusheniya. Metallurgiya [Physics of destruction. Metallurgy]. М. Pub. 1970. (in Russian)
- [9] Vigli D.A. Mehanicheskie svojstva materialov pri nizkih temperaturah [Mechanical properties of materials at low temperatures]. М. Pub. Mir [“Mir”], 1974. (in Russian)