

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.191.33

ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧЕСКОЙ И ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ¹

© М. Н. Георгиев², Е. М. Морозов³, Ю. Н. Симонов⁴

Статья поступила 21 мая 2014 г.

Обсуждены преимущества стандартных предела трещиностойкости и диаграммы трещиностойкости перед другими стандартными характеристиками трещиностойкости при статическом нагружении. Предложен образец, аналогичный компактному стандартному образцу, но позволяющий определять помимо предела трещиностойкости также пороговый размах коэффициента интенсивности напряжений при циклическом нагружении. Отмечена возможность использования экспериментальных результатов как для оценки свойств трещиностойкости материала, так и для расчета прочности элементов конструкций с трещинами. Приведены результаты некоторых экспериментов.

Ключевые слова: вязкость разрушения; предел трещиностойкости; диаграмма трещиностойкости; компактные образцы.

Известно несколько механических характеристик, оценивающих сопротивление материала росту трещины при статическом нагружении [1, 2]. Чаще всего для оценки сопротивления материала хрупкому разрушению используют вязкость разрушения K_{Ic} , а для оценки сопротивления вязкому разрушению — упругопластическую вязкость разрушения J_c .

Входящий в документы [1, 2] предел трещиностойкости I_c находит применение как для расчетов конструкций [3, 4], так и для оценки материалов [5, 6]. В то же время использование предела трещиностойкости в практике расчетов прочности конструкций и оценке материалов, к сожалению, носит единичный характер, несмотря на его очевидные достоинства. Во-первых, в экспериментах не требуется какой-либо оснастки для определения раскрытий трещины, а достаточно лишь знание максимальной нагрузки, выдерживаемой образцом или элементом детали (т.е. так же, как и при определении обычного предела прочности гладкого образца). Во-вторых, поскольку предел трещиностойкости находится при разных длинах трещин, а вид разрушения, как известно, может зависеть от длины трещины, то получаемая функция (диаграмма

трещиностойкости — Fracture Assessment Diagram) отражает состояние образца (или элемента конструкции) при разрушении. Это состояние может быть любым между идеально хрупким и полностью вязким. Диаграмма трещиностойкости в отличие от точечных характеристик K_{Ic} и J_c отражает эволюцию состояний тела в связи с изменением размеров трещин.

Диаграмма трещиностойкости — функциональная зависимость коэффициента интенсивности напряжений от действующей нагрузки (или от длины трещины) на момент разрушения. Эта диаграмма строится в координатах разрушающий коэффициент интенсивности напряжений — разрушающее брутто-напряжение. Находит применение и диаграмма трещиностойкости в координатах разрушающий коэффициент интенсивности напряжений — длина трещины. Здесь разрушающий коэффициент интенсивности напряжений и есть предел трещиностойкости I_c . Каждой длине трещины соответствует свой предел трещиностойкости. Подробнее информация о пределе трещиностойкости и диаграмме трещиностойкости изложена в работах [6 – 12].

Вид разрушения (хрупкое, вязкое, промежуточное) зависит не только от длины трещины, но и от формы и размеров тела. Это означает, что для сопоставления между собой разных материалов и их состояний следует выбрать стандартный образец и соответствующую методологию определения предела трещиностойкости. В то же время сопротивление разрушению деталей конкретной формы с дефектами считать достаточно сложно, поскольку практически

¹ Работа выполнена в рамках реализации проекта «Международная исследовательская группа» при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края. Соглашение № С-26/622 от 19 декабря 2012 года.

² E-mail: Natasha1mladen@gmail.com

³ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия;

e-mail: evgeny-morozov@mtu-net.ru

⁴ Пермский государственный технический университет, г. Пермь, Россия; e-mail: simonov@pstu.ru

все коммерческие программные продукты определяют только напряженно-деформированное состояние. Несоющую способность элемента конструкции с трещино-подобным дефектом можно находить экспериментально, используя серию однотипных элементов конструкций с дефектами нарастающей длины. При этом так же, как и для образца, получают конкретную диаграмму трещиностойкости для данной конфигурации элемента конструкции. Естественно, диаграмма трещиностойкости элемента конструкции только случайно может совпасть с диаграммой этого же материала, полученной на образце. Таким образом, для оценки качества металла следует строить диаграмму трещиностойкости, используя стандартный образец, а для оценки несущей способности элемента конструкции — образец, по возможности имитирующий элемент конструкции с трещинами и схему нагружения.

Уделим внимание модификации компактного образца для определения статической и циклической трещиностойкости материала с целью выбора материала и его состояния. Для оценки качества металла предлагаем компактный образец (рис. 1) на внецентренное растяжение, наиболее часто используемый для определения вязкости разрушения. Он не металлоемок, не требует испытательных машин большой мощности, имеет линейный градиент напряжений, отражающий напряженность многих элементов конструкций. Особенности изготовления образца и более подробная информация о нем изложены в стандарте [1]. Его базовые размеры (см. рис. 1) установлены исходя из опыта, причем всегда толщина $t = 10$ мм. Увеличенная ширина предлагаемой модификации образца позволяет уверенно выдерживать большие диапазоны относительной длины трещины, а также дает возможность определять характеристики циклической трещиностойкости. Отметим, что модернизация стандартных компактных образцов типа 3 предлагалась и ранее, но путем увеличения высоты образца, а не его ширины [14]. Фиксированная толщина принята для единообразия, как и одинаковая толщина на образцах для испытаний на ударный изгиб, причем для всех типов образцов — Шарпи, Менаже, Дроздовского [13].

Для построения диаграммы трещиностойкости эксперимент проводится на серии образцов с разными отношениями длины трещины к ширине образца $l/b = 0 \div 0,7$. Прочность образца при отсутствии трещины характеризует сопротивление материала в условиях концентрации напряжений, вызванной надрезом, что представляет дополнительный интерес.

Испытания на вязкость разрушения K_{Ic} необходимы как для оценки качества материалов, так и для расчетов на хрупкое разрушение. Если условия достоверности определения K_{Ic} не соблюдаются, то вместо испытаний на упругопластическую вязкость разрушения (J_c) предлагаем проводить испытания на предел трещиностойкости либо при одной конкретной длине трещины (обычно при $l/b = 0,5$), либо с построением

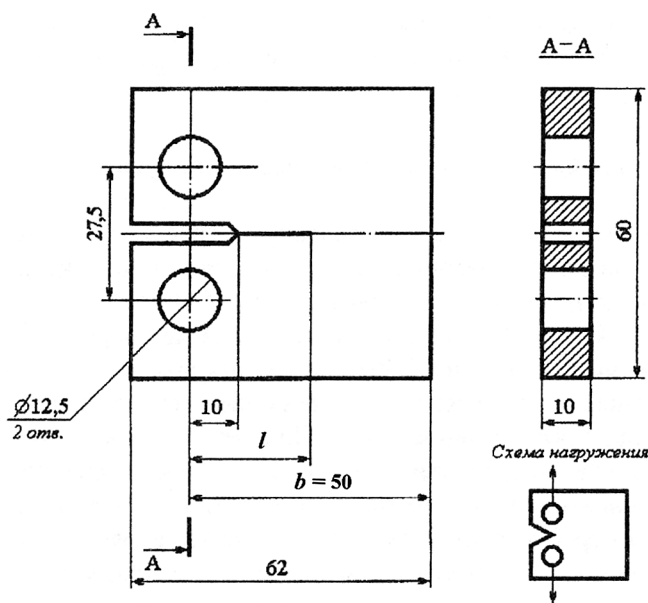


Рис. 1. Компактный образец для определения предела трещиностойкости и характеристик циклической трещиностойкости

диаграммы трещиностойкости (FAD) на серии образцов с трещинами разной длины. Причем материал оценивается на предлагаемом модифицированном компактном образце, а статическая прочность элемента конструкции — на модельном образце, имитирующем характерные особенности элемента конструкции. Несущая способность этого элемента сразу оценивается в терминах коэффициента интенсивности напряжений. Такой эксперимент более реалистично отражает сопротивление элемента конструкции росту трещины, чем зарубежная диаграмма FAD (R6), получаемая не из экспериментов, а рассчитываемая по формулам [15, 16] и дающая очень консервативную оценку прочности, особенно при малых трещинах. Следует отметить, что намечается тенденция к корректировке этой оценки за счет учета разных видов напряжений и пластического течения у вершины трещины [16, 19].

Заметим, что найденную по стандарту упругопластическую вязкость разрушения J_c при больших пластических деформациях использовать в расчете прочности можно только с большими оговорками вследствие ряда неопределенностей. Во-первых, величина J_c определяется на стандартном образце и далеко не факт, что для элемента конструкции она имеет то же значение. Это же соображение относится и к пределу трещиностойкости, найденному на предлагаемом образце. Во-вторых, J_c , как правило, пересчитывается в величину K_{Ic} , причем по формуле, выведенной для упругого тела, что уже не корректно. Этот пересчет необходим, поскольку оценки и расчеты проводятся с помощью получившегося широкого распространение коэффициента интенсивности напряжений. Не проще ли сразу из эксперимента получить разрушающий коэффициент интенсивности (предел трещиностой-

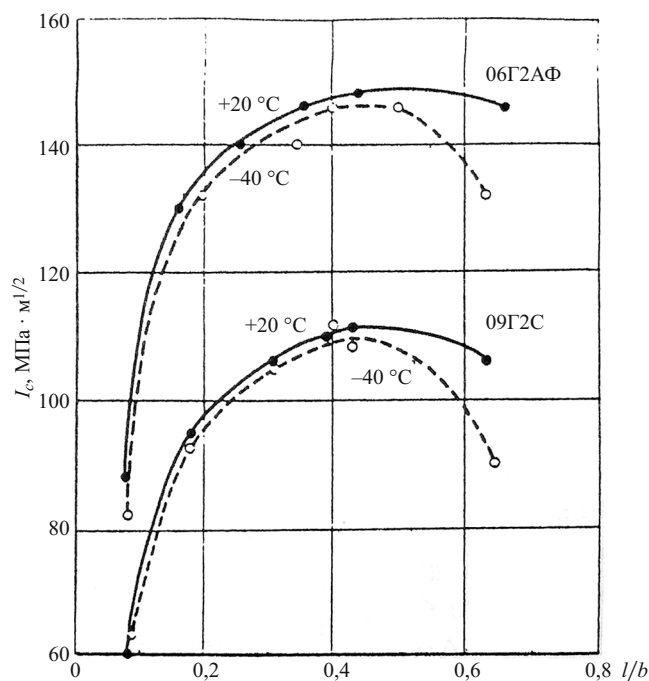


Рис. 2. Зависимости трещиностойкости от безразмерной длины трещины для сталей 06Г2АФ и 09Г2С при +20 и -40 °С

кости), достоверность которого не вызывает сомнений? Немаловажно, что при этом не нужны ограничения на степень пластических деформаций в теле с трещиной, сокращение самого эксперимента и уменьшение промежуточных вычислений при обработке его данных.

Предлагаемый образец особенно удобен для целей прочностного материаловедения. Его можно использовать для определения порогового коэффициента интенсивности напряжений при циклическом нагружении (ширины образца достаточно для роста усталостной трещины). Этот же образец можно доламывать для определения предела трещиностойкости на достигнутой длине трещины. Его преимущество очевидно в тех случаях, когда исследователь располагает небольшим количеством металла и на одном образце можно получить информацию как о циклической, так и о статической трещиностойкости материала. Для этого сначала определяют сопротивление развитию трещины при циклическом нагружении. Когда усталостная трещина подрастет до заранее выбранной длины (для возможности сопоставления статической трещиностойкости при выборе материала или его состояния), циклическое нагружение прекращают и впоследствии образец испытывают при однократном статическом нагружении. При этом фиксируются максимальная разрушающая нагрузка и длина трещины по излому, которых достаточно для определения предела трещиностойкости. Разумеется, что циклическое воздействие нагрузки перед последующим статическим доламыванием в какой-то мере портит материал, но эффект от этого можно так или иначе скорректировать

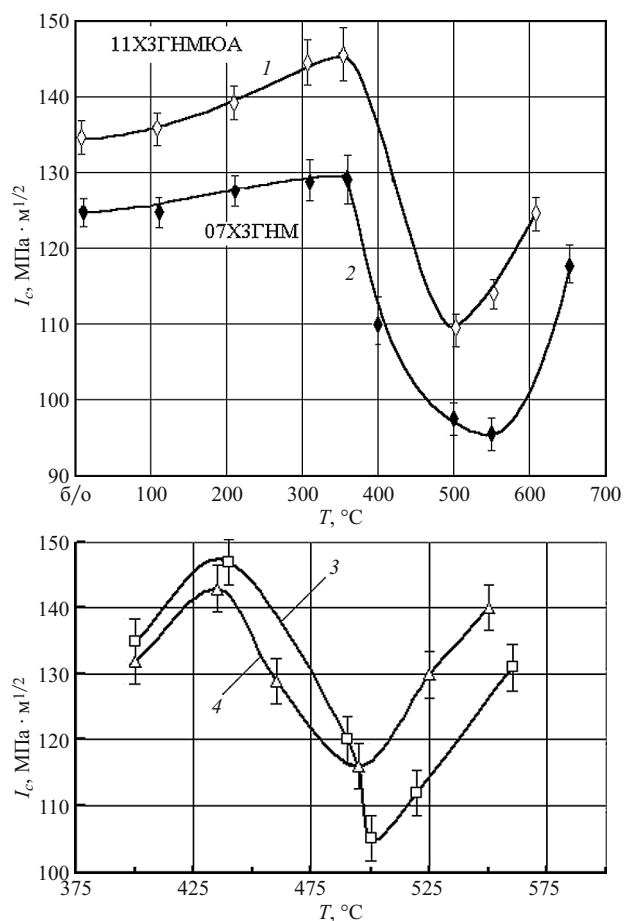


Рис. 3. Зависимости предела трещиностойкости сталей 11Х3ГНМЮА (1), 07Х3ГНМ (2) мартенситносталяей 03Х11Н10М2Т (3) и 03Н18К9М5Т (4) от температуры отпуска

или просто проигнорировать при сопоставительных экспериментах.

Для иллюстрации подобных исследований на рис. 2 приведены зависимости предела трещиностойкости от безразмерной длины трещины для двух марок сталей при разных температурах [17]. Отметим повышенную морозоустойчивость стали 06Г2АФ, разработанной для железнодорожных цистерн.

Температурные области отпускной хрупкости видны на рис. 3 по результатам испытаний четырех марок сталей с определением предела трещиностойкости при фиксированной длине трещины $l/b = 0,5$ на предлагаемых модифицированных компактных образцах (одна точка на диаграмме трещиностойкости). Условия выращивания исходных трещин соответствовали требованиям стандарта.

Низкоуглеродистые мартенситные стали 11Х3ГНМЮА и 07Х3ГНМ по уровню конструкционной прочности, стоимости и технологичности не имеют аналогов в мире. Мартенситносталяей 03Н18К9М5Т и 03Х11Н10М2Т отличается рекордный уровень прочности (до 2000 МПа) в больших конструкциях современной техники.

Характеристики прочности и трещиностойкости стали 38ХС при различных режимах термической обработки

Режим термообработки	σ_B	$\sigma_{0,2}$	I_c	ΔK_{th}	ΔK^*
	МПа			МПа · м ^{1/2}	
Изотермическая закалка: 920 °С, 20 мин → 420 °С, 20 мин, вода	1350	750	58	11,5	31
Изотермическая закалка: 920 °С, 20 мин → 370 °С, 20 мин, вода	1450	1200	113	11,7	38
Изотермическая закалка: 920 °С, 20 мин → 370 °С, 24 ч	1450	1100	42	11,5	28

На рис. 4 представлена диаграмма циклической трещиностойкости, построенная по предлагаемой методике [17]. На первом (начальном) участке диаграммы при скорости $v = 10^{-9}$ м/цикл определены пороговые размахи коэффициентов интенсивности напряжений ΔK_{th} , при которых трещина начинает расти. На втором (прямолинейном — парисовском) участке при скорости $v = 10^{-7}$ м/цикл определены соответствующие коэффициенты ΔK^* , находящиеся в средней зоне этого участка. [Напомним, что коэффициент ΔK^* входит в формулу Яремы $v = 10^{-7}(\Delta K/\Delta K^*)^n$.] При достижении трещиной половины ширины образца проводился статический долом образца для определения предела трещиностойкости. Полученные таким образом важнейшие характеристики статической (I_c при $l/b = 0,5$) и циклической (ΔK_{th} и ΔK^*) трещиностойкости представлены в таблице. Сталь 38ХС (см. рис. 4) относится к группе улучшаемых с повышенным сопротивлением усталости, из нее изготавливают детали, работающие при циклическом нагружении.

Таким образом, показана целесообразность использования единого образца для оценки статической и циклической трещиностойкости материала, а в отдельных случаях (модельные конструкционные образцы) — и для расчета элементов конструкций с трещиной.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 25.506–85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 61 с. МР 1–95. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении / Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. — М.: Изд. МИБ СТС. Ассоциация КОДАС, 1995. С. 7–82.
- МР 9-01. Определение предела трещиностойкости при статическом нагружении / Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Т. 2. ФЦНТП «Безопасность». — М.: МИБ СТС. КОДАС, 2001. С. 6–47.
- Васильченко Г. С., Морозов Е. М. Расчет на прочность массивных конструкций, содержащих дефекты / Вестник машиностроения. 1977. № 3. С. 72–74.
- Яблонский И. С. Трещиностойкость листовых материалов при статическом нагружении / Проблемы прочности. 1980. № 5. С. 26–29.
- Баско Е. М. Диаграммы трещиностойкости строительных сталей в связи с размерами трещин и видом нагружения / Заводская лаборатория. 1990. Т. 56. № 12. С. 75–79.

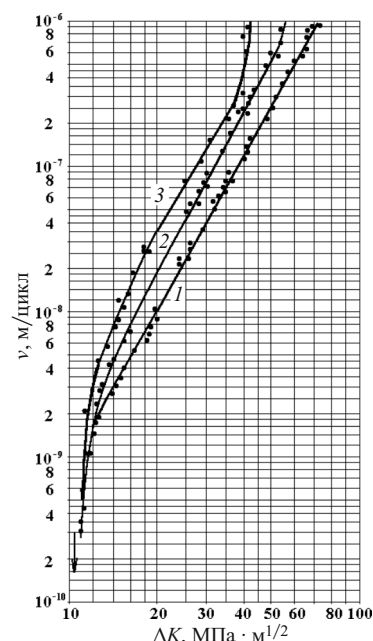


Рис. 4. Диаграммы циклической трещиностойкости стали 38ХС: 1–3 — изотермическая закалка, соответствующая 370 °С (20 мин), 420 °С (20 мин), 370 °С (24 ч)

- Анохин А. А., Георгиев М. Н. Трещиностойкость металлов в упругопластической области при статическом нагружении / Проблемы прочности. 1986. № 2. С. 11–13.
- Morozov E. M. Limit analysis for structures with flows / Eng. Fract. Mech. 1974. Vol. 6. N 1. P. 297–306.
- Георгиев М. Н., Морозов Е. М. Предел трещиностойкости и расчет на прочность в пластическом состоянии / Проблемы прочности. 1979. № 7. С. 45–48.
- Morozov E. M. Some problems in experimental fracture mechanics / Eng. Fract. Mech. 1980. Vol. 13. N 3. P. 541–561.
- Морозов Е. М. Концепция предела трещиностойкости / Заводская лаборатория. 1997. Т. 63. № 12. С. 42–46.
- Morozov E. M. An ultimate crack resistance concept / Fatigue and fracture of engineering materials and structures. 1999. N 11. P. 997–1002.
- Георгиев М. Н., Морозов Е. М., Матвиенко Ю. Г. Предел трещиностойкости как характеристика прочности материала и несущей способности металлических конструкций при наличии трещин / J. Tech. Univ. Plovdiv. Tech. Sci. 2001. Vol. 7. P. 9–29.
- ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатных и повышенных температурах. — М.: Изд-во стандартов, 1982. С. 12.
- Гольцев В. Ю., Маркочев В. М., Морозов Е. М. Трещиностойкость стали 08Х18Н10Т после 12 лет эксплуатации трубопровода Ду500 ВВЭР440 / Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. № 3. С. 1–5.

15. SINTAP. Structures Integrity Assessment Procedure for European Industry. Project BE95-1426. Final Procedure, British Steel Report, Rotherham. 1999.
16. R6 Revision 4. Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects. British Energy, Generation Report. 2001.
17. **Георгиев М., Межова Н.** Прикладная механика разрушения. — София: БУЛВЕСТ 2000, 2013. — 560 с.
18. **Георгиев М. Н., Симонов Ю. Н.** Трещиностойкость железоуглеродистых сплавов. — Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. — 418 с.
19. **Sharples J. K., Watson C. T., Budden P. J.** Overview of fracture mechanics research activities in the UK / Strength, Durability and Stability of Materials and Structures. Proc. 4th Int. Conf. 2007. Lithuania. P. 66 – 73.