

PACS numbers: 46.50.+a, 62.20.mj, 62.20.mm, 81.40.Np, 81.70.Bt, 83.10.Gr

Физическое обоснование экспериментального определения хрупкой прочности R_{MC} конструкционных сталей по результатам испытания образцов с концентратором напряжений

С. А. Котречко, Ю. А. Полушкин, В. Н. Грищенко, С. А. Мамедов

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

Обоснована возможность использования новой методики определения хрупкой прочности R_{MC} с использованием образцов с кольцевым концентратором. Показано, что уровень хрупкой прочности в широком классе конструкционных сталей можно определить по величине среднего напряжения разрушения образцов с кольцевым концентратором радиусом 2 мм.

Обґрунтовано можливість використання нової методики визначення крихкої міцності R_{MC} із застосуванням зразків з кільцевим концентратором. Показано, що величину крихкої міцності в широкому класі конструкційних сталей можна визначити за величиною середнього напруження руйнування зразків з кільцевим надрізом радіусом у 2 мм.

A possibility of using a new methodology for determining the brittle strength, R_{MC} , of the specimens with circular notch is substantiated. As shown, the level of brittle strength for a wide range of structural steels can be determined by the average value of fracture stress of the specimens with circular notch of the 2 mm radius.

Ключевые слова: образец с концентратором, минимальный уровень хрупкой прочности, скол, локальные напряжения, прочность металла, конструкционные стали.

(Получено 23 апреля 2013 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших служебных характеристик металлов и кон-

струкционных сплавов является их прочность в хрупком состоянии (хрупкая прочность), поскольку разрушение в этом случае является катастрофическим по своей кинетике. В настоящее время не утратила своей актуальности схема Иоффе; однако остаётся не совсем понятным, какую именно механическую характеристику металла можно использовать в качестве меры хрупкой прочности, т.е. считать эквивалентной предложенной Иоффе характеристике $S_{отр}$.

В работах [1, 2] в качестве меры хрупкой прочности предлагалось использовать величину локального напряжения σ_f инициирования скола в вершине концентратора напряжений. Однако, как показали результаты многочисленных исследований [3, 4] для одного и того же материала величина σ_f существенно в 1,3–2,0 раза изменяется с изменением геометрии концентратора и температуры. В работах [5, 6] хрупкая прочность измерялась как прочность металла в области низких температур, когда разрушение происходит при напряжении близком к пределу текучести $\sigma_{0,2}$. Недостатком такого метода определения хрупкой прочности является существование интервала температур и, соответственно, значений напряжения разрушения, когда оно реализуется при достижении предела текучести. Авторами работ [3] в качестве меры хрупкой прочности R_{MC} было предложено использовать минимальное напряжение хрупкого разрушения в области температур вязко-хрупкого перехода рис. 1. Важнейшей особенностью этой характеристики является то, что она определяет нижнюю границу прочности металла в хрупком состоянии. В рамках статистической модели разрушения было показано, что определённое таким образом на стандартных цилиндрических образцах значение R_{MC} только на 15–20% превышает пороговое значение напряжения разрушения σ_{th}^1 , которое является одной из ключевых характеристик металла, используемых в локальном подходе к разрушению [7].

Второй важной особенностью R_{MC} является то, что она однозначно определяется микроструктурными параметрами металла (размером ферритного или перлитного зерна, бейнитного пакета, толщиной цементитной пластины или размером карбидной частицы), кроме того, на сегодняшний день практически для всех структурных состояний, которые можно реализовать на конструкционных сталях, установлены количественные соотношения между уровнем R_{MC} и параметрами микроструктуры [8].

Основной проблемой экспериментального определения R_{MC} является тот факт, что в отличие от α -Fe, температура вязко-хрупкого перехода которого лежит в области кипения жидкого азота (77 К), для подавляющего большинства конструкционных сталей этот ин-

¹ Под пороговым напряжением при хрупком разрушении понимают минимальное напряжение хрупкого разрушения образца бесконечных размеров, т.е. нижнюю границу прочности металла в хрупком состоянии.

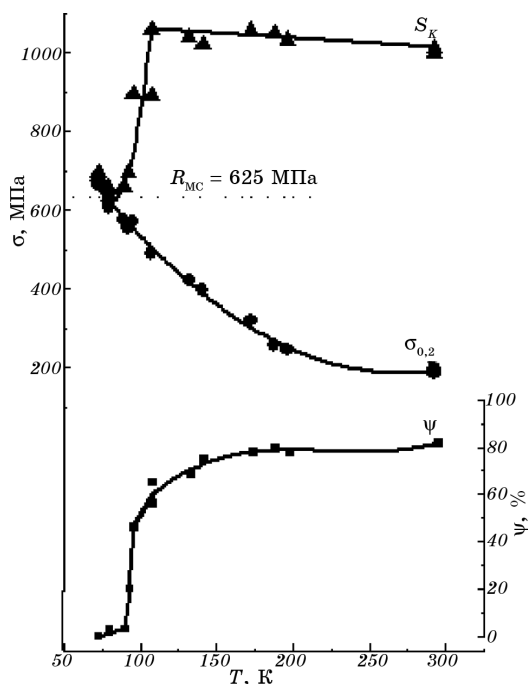


Рис. 1. Температурная зависимость основных механических свойств α -Fe: S_k — истинное напряжение разрушения, $\sigma_{0.2}$ — условный предел текучести, ψ — относительное сужение, R_{MC} — минимальный уровень хрупкой прочности.

тервал находится при более низких температурах. Это приводит к значительным методическим трудностям и удорожанию эксперимента, кроме того, в ряде случаев при столь низких температурах наблюдается прерывистая текучесть, что не позволяет найти минимальное напряжение разрушения.

Цель работы заключалась в разработке и физическом обосновании методики определения уровня хрупкой прочности по результатам испытаний образцов с концентраторами напряжений в области температур не ниже 77 К.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Одним из наиболее эффективных и простых способов повышения температуры хрупкого разрушения является использование концентраторов напряжений, однако, как отмечалось выше, на величину локального напряжения разрушения σ_f оказывает влияние не только микроструктура металла, но и геометрия концентратора. В работах [8, 9] было показано, что степень превышения σ_f над хруп-

кой прочностью металла R_{MC} зависит от остроты концентратора, уменьшаясь с ростом его радиуса.

В рамках предложенной в работах [10,11,12] статистической модели хрупкого разрушения поликристаллических металлов была дана физическая интерпретация причин превышения величины σ_f над R_{MC} , сущность которого заключается в локальном масштабном эффекте, обусловленном локализацией процесса инициирования хрупкого разрушения в предельно малом (в макроскопическом измерении 0,01–0,1 мм³) объёме («process zone») в окрестности вершины концентратора напряжений.

При этом степень превышения величины σ_f над R_{MC} зависит от объёма «process zone» и величины градиента локальных пластических деформаций в пределах этого объёма. Важным является то, что как величина объёма «process zone», так и значение градиента локальных пластических деформаций зависит от радиуса концентратора напряжений.

Таким образом, при разрушении в условиях концентрации напряжений проявляются два противоположных эффекта. С одной стороны, в результате наличия трёхосного растяжения в вершине концентратора металл охрупчивается, что экспериментально фиксируется в повышении критической температуры хрупкого разрушения, с другой стороны в силу локального масштабного эффекта, приводящего к превышению σ_f над R_{MC} этот охрупчивающий эффект в определённой степени смягчается. При этом, увеличение радиуса надреза приводит, как к уменьшению степени трёхосности напряжённого состояния, так и к уменьшению степени превышения σ_f над R_{MC} . Таким образом, основная задача разработки методики определения хрупкой прочности конструкционных сплавов заключается в поиске такой геометрии концентратора напряжений, при которой второй эффект минимизируется, однако, при этом сохраняется достаточный для охрупчивания металла уровень трёхосности напряжённого состояния.

В методическом плане одним из недостатков использования локального напряжения разрушения σ_f в качестве меры хрупкой прочности является необходимость использования метода конечных элементов для определения величины σ_f по экспериментальному значению номинальному (среднему) σ_{NF} напряжению разрушения. В то же время, увеличение радиуса надреза приводит к снижению градиента напряжений и, соответственно, уменьшению разницы между средним σ_{NF} и локальным σ_f напряжением разрушения. В силу этих причин задача заключалась в поиске связи между величиной хрупкой прочности металла и значением среднего напряжения разрушения σ_{NF} образца с концентратором напряжений.

Ранее было установлено, что для углеродистых сталей минимальное значение напряжения хрупкого разрушения R_{MC} достига-

ется при значениях остаточной деформации порядка 1–2% [4, 9] поэтому ставилась задача установления связи между величиной R_{MC} и значением σ_{NF} при величине остаточной деформации 2% разрушения σ_{NF} образца с концентратором напряжений.

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования предусматривали проведение серийных низкотемпературных испытаний на одноосное растяжение стандартных гладких цилиндрических образцов и цилиндрических образцов с кольцевыми надрезами радиусом 2 мм (рис. 2). Образцы на одноосное растяжение испытывали в интервале температур от -196°C до $+20^\circ\text{C}$, что позволило напрямую определять значение хрупкой прочности R_{MC} (рис. 1).

По результатам этих испытаний строились температурные зависимости $\sigma_{0,2}$, S_K , ψ . Образцы с кольцевыми надрезами испытывались только при температуре кипения жидкого азота (-196°C). По результатам этих испытаний определялось среднее напряжение разрушения σ_{NF} в минимальном сечении:

$$\sigma_{NF} = \frac{4P_F}{\pi d_K^2}, \quad (1)$$

причём величина средней деформации

$$e_F = \ln \frac{1}{1 - \psi},$$

а

$$\psi = 1 - \frac{d_K^2}{d_0^2}.$$

В силу стохастической природы хрупкого разрушения металлов, которая наиболее ярко проявляется при разрушении образцов с

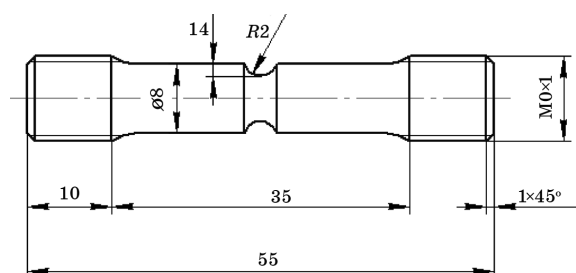


Рис. 2. Цилиндрический образец с кольцевым надрезом радиусом 2 мм.

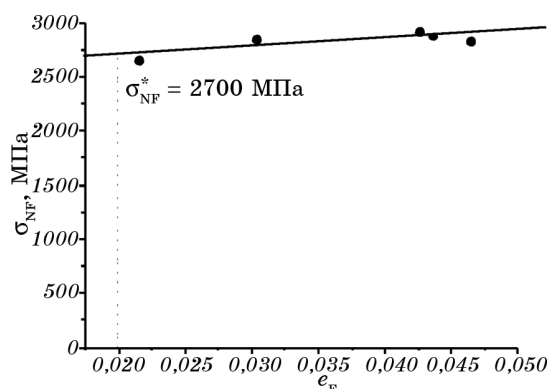


Рис. 3. Экстраполяция экспериментальных данных номинального напряжения разрушения σ_{NF} на величину 2% остаточной деформации e_F . Сталь 30ХГСА.

концентраторами напряжений [11, 13, 14], испытания образцов с надрезом при одной температуре ($T = -196^\circ\text{C}$) позволяли получить достаточно широкий интервал изменения остаточной деформации e_F .

В результате по испытаниям 4–6 образцов при $T = -196^\circ\text{C}$ были построены зависимости σ_{NF} от деформации e_F , и определялось его критическое значение σ_{NF}^* при величине остаточной деформации $e_F = 2\%$ (рис. 3).

Для определения величины локального напряжения разрушения методом конечных элементов рассчитывалось распределение локальных напряжений и деформаций в минимальном сечении надрезанного образца при достижении разрушающего усилия (рис. 6). В качестве величины локального напряжения разрушения σ_f использовалось значение максимального растягивающего напряжения в точке, где значение интенсивности локальных пластических деформаций достигает значения 2%.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из данных, приведённых на рис. 4 и в табл. 1 в широком интервале значений хрупкой прочности величина R_{MC} практически совпадает со значением номинального напряжения разрушения σ_{NF}^* при 2% остаточной деформации образца с надрезом радиусом 2 мм. При этом следует подчеркнуть, что интервал полученных значений R_{MC} от 800 МПа до 2700 МПа перекрывает диапазон изменения хрупкой прочности для типичных конструкционных сталей. Более низкие значения $R_{MC} \cong 600\text{--}900$ МПа были получены на технически чистом железе, подверженном длительному отжигу.

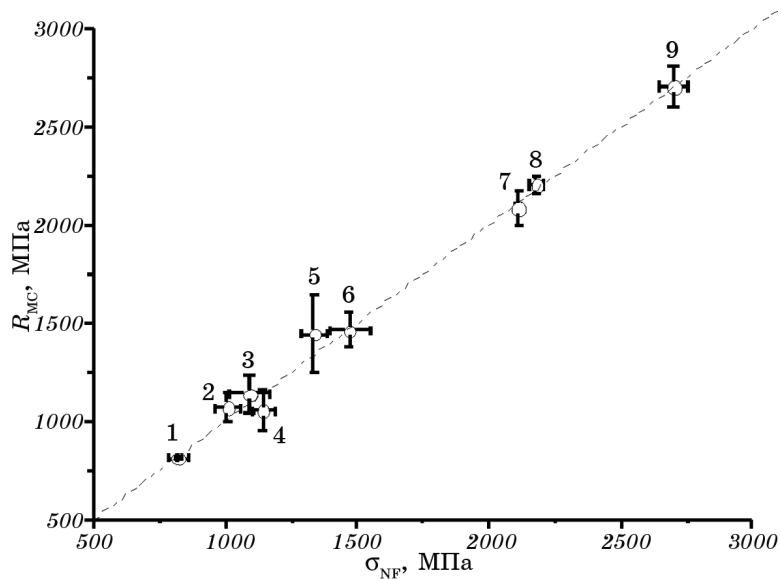


Рис. 4. Сопоставление минимального уровня хрупкой прочности R_{MC} (определённого на стандартных гладких образцах) и номинального напряжения разрушения σ_{NF} цилиндрических образцов с надрезом 2 мм: 1 — Ст10Г, отжиг; 2 — Ст40, отжиг; 3 — Ст55, маятниковый отжиг; 4 — Ст10Г, сфероидизация; 5 — 15Х2НМФА, поставка 1; 6 — 15Х2НМФА, поставка 2; 7 — СтР65, СЭТО; 8 — Ст40, закалка + отпуск 300°С 0,5 часа; 9 — 30ХГСА, закалка в масло + изотермический отпуск 300°С 0,5 часа.

В пределах разброса экспериментальных данных не удалось выявить какую-либо тенденцию во влиянии прочности на отношение σ_{NF}/R_{MC} (рис. 5). В соответствии полученным данным в границах разброса экспериментальных данных величина σ_{NF} совпадает со значением R_{MC} . При выборочном стандарте 4,5% достоверность полученных результатов $P(0,835 < \sigma_{NF}/R_{MC} < 1,165) = 0,98$ (расчёт проводился с использованием статистики малых выборок и распределения Стьюдента).

Физический смысл установленной связи между R_{MC} и σ_{NF}^* заключается в том, что значение локального напряжения разрушения σ_f в вершине надреза, как и следовало ожидать, превышает уровень хрупкой прочности R_{MC} (рис. 6), однако в силу достаточно большого радиуса надреза $R = 2$ мм, это превышение не столь большое. Но самое главное, что это превышение практически совпадает с разницей между значением локального σ_f и среднего σ_{NF}^* напряжения разрушения. Именно это и обеспечивает возможность определения R_{MC} по среднему значению напряжения разрушения σ_{NF}^* образца с надрезом, что принципиально упрощает методику эксперимента. Следует подчеркнуть, что такое совпадение реализуется только при испы

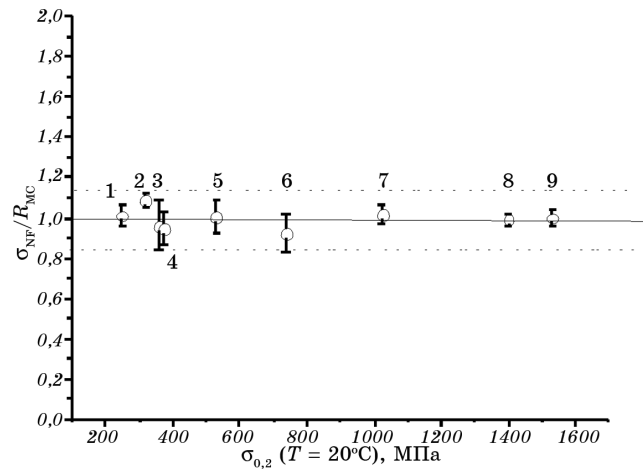


Рис. 5. Отношение напряжения хрупкого разрушения образцов с надрезом радиусом 2 мм к минимальному уровню хрупкой прочности стандартных гладких образцов на одноосное растяжение в широком интервале прочностей. Обозначение те же что и на рис. 4.

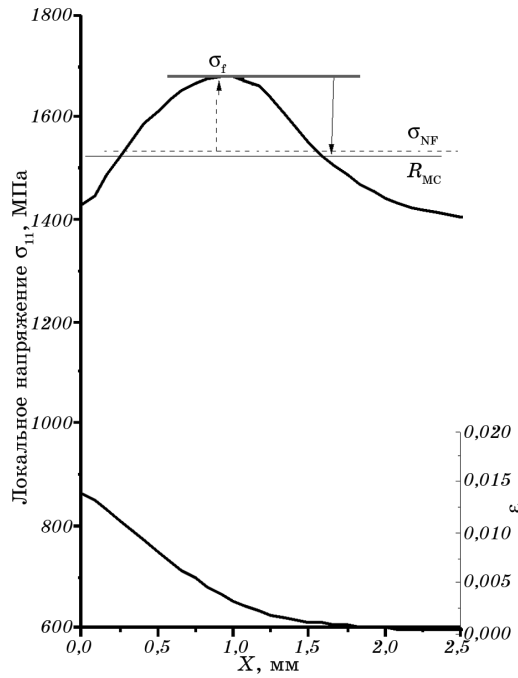


Рис. 6. Превышение локального напряжения разрушения σ_f над уровнем хрупкой прочности R_{MC} (определён на стандартных гладких образцах) и номинальным напряжением разрушения σ_{NF} образцов с кольцевым концентратором $R = 2$ мм. Сталь 15Х2НМФА(II), $T_{исп} = -196^\circ\text{C}$.

ТАБЛИЦА 1. Основные механические свойства образцов.

Материал	Обработка	$\sigma_{0,2}$, МПа (+20°C)	σ_B , МПа (+20°C)	S_K , МПа (+20°C)	ψ_K , % (+20°C)	e_p , (+20°C)	σ_{NF} , МПа	$\alpha =$ σ_{NF}/R_{MC}	R_{MC} , МПа
10Г	Сфероидизация 740°C, $\tau = 48$ часов	319	600	1243	71,5	0,16	1143	1,0885	1050
10Г	Отжиг 920°C, $\tau = 2$ часа	249	484	910	62	0,15	820	1,0123	810
Сталь 55	Маятниковый отжиг, $T_1 = 740^\circ\text{C}$, $T_2 = 680^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ часа, 5 циклов	359	582	1363	70	0,17	1092	0,962	1134
30ХГСА	Закалка 860°C в масло + отпуск 300°C, $\tau = 0,5$ часа	1531	1755	2542	48	0,025	2700	1	2700
15Х2НМФА (I)	Поставка	738	803	1766	75	0,069	1336	0,9277	1440
15Х2НМФА (II)	Поставка	529	650	1502	75,5	0,07	1470	1,0068	1460
Р65	СЭТО*	1022	1267	1974	46	0,082	2111	1,0149	2080
Сталь 40	Закалка 860°C + отпуск 300°C, $\tau = 0,5$ часа	1400	1635	1993	25	0,03	2178	0,99	2200
Сталь 40	Отжиг 920°C, $\tau = 2$ часа	372	693	1261	55	0,14	1008	0,9509	1060

Пр и м е ч а н и е: * — скоростная электротермообработка.

тании образца приведённой на рис. 2 геометрии.

5. ВЫВОДЫ

Использование концентратора напряжений в виде кольцевого надреза радиусом 2 мм и глубиной 1,4 мм на цилиндрическом образце диаметром 8 мм позволяет определить уровень хрупкой прочности R_{MC} конструкционных сталей по величине среднего напряжения разрушения σ_{NF}^* образца с концентратором с точностью 4,5%. Это обусловлено тем, что при такой геометрии образца с надрезом степень превышения локального напряжения σ_f над R_{MC} практически совпадает с разницей между величиной локального σ_f и среднего напряжения разрушения σ_{NF}^* .

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Ужик, *Сопротивление отрыву и прочность металлов* (Москва: Издательство АН СССР: 1950).
2. Дж. Ф. Нотт, *Основы механики разрушения* (Москва: Металлургия: 1978).
3. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Проблемы прочности*, **1**, № 3: 5 (1999).
4. S. Kotrechko, V. Strnadel, and I. Dlouhy, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, **47**, No. 1: 171 (2007).
5. Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, *Структура металла и хрупкость стальных изделий* (Киев: Наукова думка: 1985).
6. Л. А. Копельман, *Сопротивление сварных узлов хрупкому разрушению* (Ленинград: Машиностроение: 1978).
7. S. Kotrechko, *J. Theor. Appl. Mech.*, **52**, No. 2: 75 (2013).
8. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Предельная прочность* (Киев: Наукова думка: 2008).
9. С. А. Котречко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **14**, № 5: 37 (1992).
10. S. Kotrechko and I. Dlouhy, *NATO Science Series*, **78**, No. 2: 135 (2002).
11. С. А. Котречко, *Проблемы прочности*, **22**, № 4: 14 (2003).
12. С. А. Котречко, С. А. Мамедов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, № 5: 687 (2011).
13. F. M. Beremin, *Met. Trans.*, **1**, No. 14: 2277 (1983).
14. K. Wallin and T. Saario, *Metal Sci.*, **18**, No. 1: 13 (1984).