

ХРУПКОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛА В ИЗДЕЛИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

д.ф.-м.н. С. А. Котречко, д.т.н., член-корр. НАНУ Ю. Я. Мешков

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины

Вступление

Повышенный интерес к использованию высокопрочных металлических материалов в связи с расширением масштабов высотного строительства и при сооружении сильнонагруженных уникальных конструкций сопровождается усилением опасности хрупкого разрушения сталей. Источником проявления хрупкости металла могут служить два рода причин – 1) внутренние (природа металла, структура), и 2) внешние (условия нагружения).

Хрупкость первого рода является хрупкостью металла как такового, изучением условий ее проявления занимается физика прочности металлов [1]. Хрупкость второго рода – хрупкость, наведенная условиями испытания металла, например, низкой температурой, динамикой нагружения, сложным напряженно-деформированным состоянием (НДС), относится к области науки о прочности, которой традиционно занимается механика, в том числе механика разрушения [2, 3].

Постановка проблемы

Нетрудно заметить, что непосредственной причиной хрупкости всегда, как в физике, так и в механике, служит излишнее превышение прочности металла, ибо любой хрупкий металл при достаточно высоком нагреве теряет прочность и приобретает определенную пластичность. Следовательно, для сохранения некоторой пластичности прирост прочности металла не должен быть предельно большим, при котором наступает хрупкость. Важно понимать, что в случае хрупкости, наведенной в металле внешними источниками, не имеет значения, какова непосредственная причина повышения прочности – снижение температуры или высокая скорость нагружения, либо упругое перенапряжение (локальное увеличение “прочности”) металла в зоне местной деформации в вершине трещины или надреза – результат во всех случаях одинаков – предельное повышение прочности означает переход в хрупкое состояние данного металла. Поэтому защита от охрупчивающего действия излишнего переупрочнения возможна, если исходный металл обладает достаточным резервом прочности $\Delta\sigma_p = R_{MC} - \sigma_{0,2}$ (R_{MC} – прочность в хрупком состоянии, сопротивление микросколу [4]; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести), способным “поглотить” излишнюю прочность материала, создаваемую факторами внешнего воздействия.

Понятно, что хрупкий металл по определению не может иметь никакого резерва прочности, т.к. $\sigma_{0,2} \approx R_{MC}$ и $\Delta\sigma_p \rightarrow 0$, а может иметь лишь запас прочности, измеряемый коэффициентом $K_{зп}$:

$$K_{зп} = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_n}, \quad (1)$$

где σ_n – уровень среднего (номинального) напряжения.

Запас прочности ($K_{зп}$) в хрупком материале придает ему запас стабильности упруго-напряженного (упругого) состояния под нагрузкой. Но стабиль-

ность упругого состояния весьма ненадежна, поскольку интервал недогрузки напряжений $\Delta\sigma = \sigma_{0,2} - \sigma_n$ легко преодолевается за счет колебаний уровня σ_n , особенно в зонах концентрации напряжений. Но так как в хрупком материале $\sigma_{0,2} \approx R_{MC}$, то одна лишь упругая стабильность, задаваемая запасом прочности $K_{зп}$ не может служить “демпфером” перенапряжения и не создает надежной защиты от хрупкого разрушения.

В этом смысле принципиальное отличие пластичного металла от хрупкого состоит в том, что у первого интервал прочностей $\Delta\sigma_p = R_{MC} - \sigma_{0,2}$ образует не “запас прочности” по нагрузке, а резерв прочности по свойствам металла. Резерв $\Delta\sigma_p$ защищен от “поглощения” его при повышении нагрузки σ_n , ибо выше $\sigma_{0,2}$ упругая деформация переходит в пластическую, что резко снижает темп повышения упругого перенапряжения даже в зонах местной деформации вблизи концентраторов напряжений. Таким образом, у пластичного металла резерв прочности $\Delta\sigma_p$ играет вполне полноценную “демпфирующую” роль защиты от ненужного излишнего переупрочнения металла, чем затрудняет возможность достижения предельного состояния разрушения пластичного металла. Наличие резерва упругого сопротивления $\Delta\sigma_p$ автоматически означает возможность проявления пластической деформации металла в данном напряженном состоянии, т.е. состояния ограниченной пластической стабильности. Это комплексное состояние совместной упругой и пластической стабильности мы назовем состоянием механической стабильности пластического металла [5, 6]. Количественное описание этого состояния требует введения определенных параметров механической стабильности.

Параметры механической стабильности

На схеме рис. 1 приведено изменение при пластической деформации двух основных механических характеристик стали – текущей прочности стали, деформированной на степень e (величина σ_e) и предельной прочности (S_K) – напряжения разрушения стали, деформированной до степени деформации e . Естественно, точки на кривой S_K могут быть получены как напряжения разрушения в шейке разрываемого образца при разных температурах испытания, вплоть до температуры жидкого азота (-196°C) [4]. Заметим, что в области, лежащей между кривыми S_K и σ_e пластическая деформация металла возможна пока между S_K и σ_e имеется некий интервал $\Delta\sigma_p > 0$. В точке $S_K = \sigma_e$ наступает вязкий разрыв (в “шейке” при больших e) или хрупкий отрыв (при малых деформациях e). Последнее возможно лишь при достаточно низких температурах растяжения образца, когда кривая деформации σ_e из-за высокой прочности $\sigma_e \approx R_{MC}$ пересекается с линией S_K в области минимальной хрупкой прочности металла R_{MC} . Такой минимум хрупкой прочности для конструкционных сталей отмечается при малых пластических деформациях ($\sim 1..5\%$), а чаще всего при $e_c \approx 2\%$, что позволяет принять эту деформацию в качестве критической [7] для экспериментального определения критического напряжения хрупкой прочности – сопротивления микроскола

R_{MC} [4, 7]. Критерий условной хрупкости для стали в таком случае имеет вид:

$$\sigma_2 = R_{MC} \quad (2)$$

Поэтому интервал прочности $\Delta\sigma_p = R_{MC} - \sigma_2$ создает тот минимальный резерв прочности, который способен “поглотить” излишнее упрочнение, вызванное действием любого из внешних факторов охрупчивания – низкой температурой “динамическим упрочнением”, жесткостью напряженного состояния под надрезом (трещиной). Тем самым создается состояние механической стабильности деформируемого металла, мерой которого может служить коэффициент механической стабильности K_{ms} [5, 6]:

$$K_{ms} = \frac{R_{MC}}{\sigma_2} \quad (3)$$

Либо в относительных единицах – относительный резерв упругого сопротивления r_2 :

$$r_2 = \frac{\Delta\sigma_p}{\sigma_2} = \frac{R_{MC} - \sigma_2}{\sigma_2} = K_{ms} - 1 \quad (4)$$

В зоне закритических величин деформаций ($e > 2\%$, рис. 1) резерв упругого сопротивления увеличивается ($r_e > r_2$) вплоть до максимума величины S_K , затем r_e падает до 0 при деформации разрушения образца.

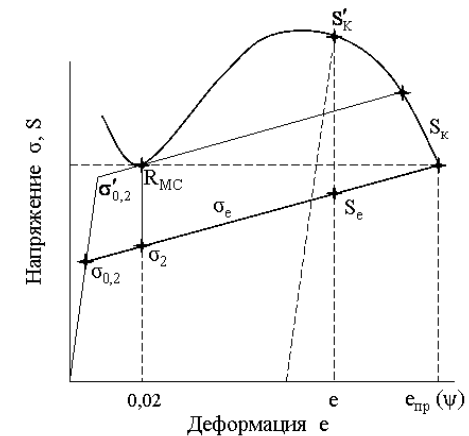


Рис. 1. Хрупко-пластический переход, вызванный низкотемпературным “упрочнением” стали (схема). $\Delta\sigma_p = R_{MC} - \sigma_2$ - критический резерв прочности стали (одноосное растяжение).

По-сути, текущее значение r_e при деформации e ($r_e = S_K / \sigma_e - 1$) имеет смысл локального значения резерва стабильности в зоне местной деформации в окрестности трещины (надреза), поэтому может использоваться для формулировки локального критерия разрушения под надрезом:

$$r_e = Z_e \quad (5)$$

где $Z_e = \frac{\sigma_{11}}{\sigma_e} - 1$ - максимальное относительное упругое перенапряжение в зоне пластичности в точке с локальной деформацией e , σ_{11} - напряжение в этой точке.

Критерий (5) в виде $r_e = Z_e$ есть условие локальной механической стабильности в зоне пластичности под надрезом, но практически более важным является условие макроскопической (т.е. глобальной) механической стабильности элемента конструкции с концентратором, когда величина максимального упругого перенапряжения Z_e не превышает критического резерва упругого сопротивления r_e по (4):

$$r_e > Z_e \quad (6)$$

В этом случае в зоне местных деформаций под надрезом непременно реализуется предельно возможная локальная пластичность металла $e_{пр}$ (рис. 1), что фрактографически проявляется в наличии 100% вязкой составляющей в изломе образца (изделия) после разрушения. Практически это означает отсутствие хрупкого вида разрушения в изделии, что является конечной задачей успешного материаловедческого обеспечения силовой надежности изделия.

Прогнозирование ресурса вязкости стали

Важной особенностью коэффициента механической стабильности K_{ms} является то, что с его помощью удастся количественно судить о скрытом потенциале (ресурсе) вязкого поведения данного металла в различных условиях НДС конкретных элементов конструкций, если известны основные параметры НДС - σ_1 , σ_2 , σ_3 главные напряжения, σ_j - интенсивность напряжений, $j = \sigma_1 / \sigma_i$ - жесткость НДС.

Величина $K_{ms} = R_{MC} / \sigma_2$ содержит в себе весь резерв потенциального “упрочнения” металла, который металл выдержит без разрушения, но в ЭК с жесткостью j , создающей упругое перенапряжение, часть этого резерва “поглощается” и оставшаяся часть

$$P_{ms} = \frac{K_{ms}}{j} \quad (7)$$

служит показателем остаточного ресурса вязкого поведения металла в элементе конструкции. Этот ресурс может быть востребован, например, в виде температурного запаса хладостойкости ЭК (рис. 2), который можно рассчитать, исходя из температурного прироста прочности $\Delta\sigma$:

$$P_{ms} = \frac{\sigma_2^*(T_c)}{\sigma_2(T_k)} = \frac{\sigma_2(T_k) + \Delta\sigma}{\sigma_2(T_k)} = 1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma_2(T_k)} \quad (8)$$

Но т.к.

$$\Delta\sigma \approx \beta \Delta T \quad (9)$$

(β - температурный коэффициент прироста прочности от охлаждения стали в климатическом интервале отрицательных температур), то из (8) и (9) следует

$$\Delta T \approx \frac{\sigma_2(T_k)}{\beta} \cdot [P_{ms} - 1] \quad (10)$$

В формулах (8) и (10): $\sigma_2^*(T_c)$ - прочность стали, деформированной на $e = 0,02$ (2%), при критической температуре хрупкости T_c данного ЭК с его параметрами НДС; $\sigma_2(T_k)$ - прочность этой стали при комнатной температуре T_k , $\Delta T = T_c - T_k$ - интервал температур хладостойкости ЭК.

Из рис. 2 видно, что отношение $R_{MC} / \sigma_2^*(T_c) = E_m$ есть силовой эквивалент охрупчивающего действия напряженного состояния. ЭК, после воздействия которого остаточная стабильность металла имеет меру

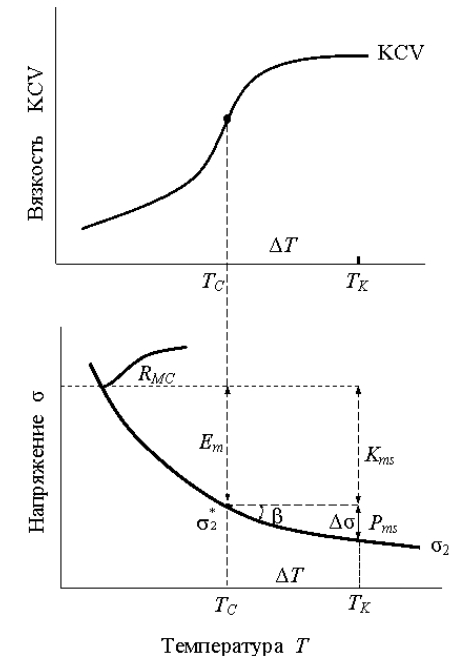


Рис. 2. Хрупко-пластический переход, вызванный действием надреза (схема) $\Delta \sigma = \sigma_2^* - \sigma_2$ - прочностной резерв хладостойкости, ΔT - температурный резерв хладостойкости (ударный изгиб).

Параметр P_{ms} по (10) связан с температурным интервалом хладостойкости ЭК с данным видом НДС.

Если силовой эквивалент охрупчивающего действия, например, надреза или трещины E_m известен заранее (из опыта), то пользуясь величинами K_{ms}

и E_m и учитывая, что $E_m = j$, можно по (7) вычислить P_{ms} и по (10) спрогнозировать температуру хрупкости такого образца с надрезом. В работе [7] приведены результаты прогнозирования T_c для образцов типа Шарпи ($E_m = 1,7$) при критерии хрупкости $K_{CV} = 49$ Дж/см² для группы сталей с различным уровнем прочности (табл.), для которых принято приближенное значение коэффициента $\beta \approx 1$ МПа/град.

Результаты расчета интервала температур хладостойкости сталей ΔT при указанном виде испытания образцов вполне удовлетворительны, что позволяет считать расчетный метод оценки хладостойкости сталей в реальных узлах конструкций с известными параметрами НДС доступными для инженерной практики.

Расчетная оценка критических температур хрупкости T_c для сталей

№ пп.	Сталь	σ_2 , МПа	K_{ms}	P_{ms} расч. ($E_m = 1.7$)	$[P_{ms}]$	$ \Delta T $, °C	T_c , °C (расч.)	T_c , °C (эксп.)	Состояние*)
1	10Г2ФБ	360	2.17	1.27	1.28	96	-76	-70	~хр.
2	15Г2АФ	495	1.86	1.09	1.20	45	-25	-27	хр.
3	15ГБ	539	1.82	1.07	1.19	37	-17	-18	хр.
4	10ХСНД	760	1.97	1.16	1.13	122	-102	-96	~пл.
5	12ХНЗМФ	975	1.85	1.00	1.10	98	-78	-80	пл.
6	12ХНЗМФ	1000	1.89	1.10	1.10	100	-80	-92	пл.

* хр. – хрупкое состояние стали в интервале температур до -80°C ; пл. – пластичное состояние стали до -80°C .

Обсуждение результатов

Из вышесказанного следует, что возможность сохранения вязких или пластических свойств металла, находящегося в сложных условиях НДС конструкции, напрямую зависит от резерва прочностных свойств металла, заключающегося в коэффициенте механической стабильности K_{ms} . Охрупчивающая сила факторов НДС конструкции определяется величиной упругого перенапряжения (жесткостью НДС, локальной или глобальной), измеряемого параметром E_m . Результирующая (остаточная) стабильность металла в конструкции возникает только, если $K_{ms} > E_m$, т.е. параметр $P_{ms} = K_{ms} / E_m > 1$, что означает, что хрупкость в таком конструктивном узле при данных параметрах НДС невозможна. Для обоснованного суждения об опасности, которую может представлять надрез, трещина или иной концентратор, необходимо знать параметр охрупчивающей силы E_m концентратора (из предварительного опыта или расчета НДС), знание параметров K_{ms} и E_m позволяет

заранее прогнозировать возможную опасность хрупкого состояния металла как в регулярных узлах конструкции, так и в содержащих в себе определенные концентраторы напряжений.

Заключение

Резерв потенциальной прочности ($\Delta\sigma = R_{MC} - \sigma_{0,2}$) служит демпфером, поглощающим локальные перенапряжения вблизи трещиноподобных дефектов, а также внутренние макронапряжения в металле и упрочнение металла, вызываемое различными причинами – низкая температура, динамика нагружения, радиационное и деформационное упрочнение, старение и пр., т.е. обеспечивает защиту металла от перехода из пластического в хрупкое состояние в условиях сложного НДС конструкции. Тем самым резерв $\Delta\sigma$ придает металлу возможность находиться в состоянии механической стабильности при его нагружении даже в условиях общей или локальной пластической деформации.

Количественной мерой механической стабильности является коэффициент $K_{ms} = R_{MC} / \sigma_2$ для условий одноосного растяжения металла и параметр $P_{ms} = K_{ms} / E_m$ - для сложного НДС, где E_m - параметр охрупчивающей силы НДС конструкции, требующий своего расчетного или экспериментального определения. P_{ms} - это мера остаточной стабильности металла в конструкции.

Использование параметров K_{ms} и E_m позволяет осуществлять оптимизацию свойств прочности применительно к требованиям напряженно-деформированного состояния конкретного узла конструкции с целью предупреждения опасности его хрупкого разрушения.

Использованная литература

1. В.И. Трефилов. “Роль типа межатомной связи при хрупком разрушении”. В кн. “Физическая природа хрупкого разрушения металлов”. – Киев: Наук. думка, 1965. – с. 22-58.
2. Я.Б. Фридман. Механические испытания. Конструкционная прочность. – М.: “Машиностроение”, 1974, 368 с.
3. Д. Брок. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980, 368 с.
4. Ю.Я. Мешков, Г.А. Пахаренко. Структура металла и хрупкость стальных изделий. – Киев: Наук. думка, 1985. – 268 с.
5. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков. “Концепция механической стабильности конструкционных материалов” // Проблемы прочности, 2009 - № 2, с. 55-78.
6. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции. – Киев: Наук. думка, 2008, 295 с.
7. Ю.Я. Мешков. “Связь между пластичностью и хладноломкостью конструкционных сталей”. В сб. “Оборудование и технологии термомеханической обработки металлов и сплавов”, IX Межд. Научно-технический конгресс термистов и металловедов, т. I, ННЦ ХФТИ, Харьков, 2008, с. 276-280.
8. С.А. Котречко. “Критическое напряжение скола и “хрупкая” прочность поликристаллических металлов”// Металлофизика, 1992, 14 № 5: с. 37-41.