

## Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей

С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

*Рассматривается взаимосвязь между характеристиками пластичности и хладостойкости, которая может быть установлена при использовании специальной характеристики – коэффициента механической стабильности (это универсальная мера сопротивления металла переходу из пластичного состояния в хрупкое). Установлено, что пластичность не может обеспечить требуемое сопротивление хрупкости металла, а лишь создает предпосылки для достижения необходимой механической стабильности. Условием высокой механической стабильности является большой силовой интервал между текущей прочностью металла и хрупкой прочностью при разрыве.*

**Ключевые слова:** пластичность, прочность, хладноломкость, механическая стабильность.

**1. Постановка задачи.** Прочность и пластичность – изначальные механические свойства металлических сплавов, при этом пластичность (в сочетании с прочностью) придает металлу еще одно качество – вязкость, которая обеспечивает ему стойкость против хрупкости под воздействием таких факторов охрупчивания, как надрезы, трещины, динамическое нагружение и понижение температуры эксплуатации. В последнем случае сопротивление низкотемпературному охрупчиванию сплава характеризует его хладостойкость. Однако в современной науке о механических свойствах конструкционных сплавов нет ясного понимания того, как пластичность ( $\psi$  – относительное сужение при разрыве) влияет на хладостойкость, т.е. как сохранить требуемую вязкость при экстремальных климатических температурах, например ниже комнатных ( $T_k$ ) на  $100^\circ\text{C}$  ( $\Delta T = T_k - T_c$ ,  $T_c$  – критическая температура перехода металла из пластичного в хрупкое состояние по принятому критерию хрупкости). Таким образом, цель задачи: выяснить, в какой мере пластичность  $\psi$  при испытаниях образцов на разрыв оказывает влияние на хладостойкость  $\Delta T_c$ , определяемую, например, при серийных испытаниях на ударную вязкость образцов с надрезом типа Шарпи по существующим критериям хрупкости. Для решения поставленной задачи необходимо ввести в рассмотрение специальную характеристику, которая совмещает в себе два свойства: прочность и пластичность, т.е. именно те свойства, которые, собственно говоря, определяют удельную работу разрушения или ударную вязкость. Такой характеристикой является предложенный в работах [1–4] коэффициент механической стабильности  $K_{ms}$ .

**2. Механическая стабильность – мера сопротивления металла переходу в хрупкое состояние.** Детальное изложение физических основ концепции механической стабильности содержится в работах [3, 4]. Однако для уяснения основной сути этого понятия достаточно проанализировать упрощенную схему деформационного упрочнения металла при растяжении (рис. 1).

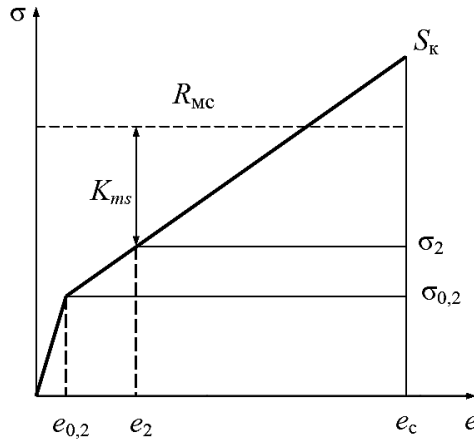


Рис. 1. Схема деформационного упрочнения металла при одноосном растяжении, описывающая связь между деформационным ( $e_2, e_c$ ) и силовым ( $S_k, R_{MC}, \sigma_2$ ) способами представления интервала механической стабильности:  $S_k$  – истинное напряжение разрушения;  $R_{MC}$  – хрупкая прочность при критической деформации  $e_2 = 0,02$ ;  $\sigma_2$  – прочность при критической деформации  $e_2$ ;  $e_c$  – истинная деформация при разрыве в “шейке”.

Запас пластичности металла при его одноосном растяжении описывается не только характеристикой  $\psi$ , но и (с учетом показателя деформационного упрочнения  $n$ ) отношением двух силовых характеристик диаграммы:  $S_k/\sigma_{0,2}$ . И хотя эта очевидная для одноосного растяжения корреляция между отношением прочностей  $S_k/\sigma_{0,2}$  и пластичностью  $\psi$  (через посредство показателя  $n$ ) не представляет большого интереса, для анализа более сложных ситуаций разрушения в локальной области (вершина надреза или трещины) указанная идея оказывается полезной.

В зоне пластичности под надрезом критическим является наименьшее значение хрупкой прочности металла  $R_{MC}$  [5, 6], а не истинное напряжение разрушения  $S_k$ , и соответственно отношение  $R_{MC}/\sigma_2$  несет в себе информацию о резерве деформационного упрочнения в силовом интервале  $\sigma_2 \dots R_{MC}$ , в котором разрушение в очаге локальной деформации под надрезом невозможно, пока локальное напряжение течения металла по Холлому в этом очаге  $\sigma_{1e}$  не превысит  $R_{MC}$ :

$$\sigma_{1e} = \sigma_2 (e/e_2)^n, \tag{1}$$

где  $\sigma_2$  – напряжение течения металла при критической деформации  $e_c = 2\%$ , которая соответствует условию определения минимального значения хрупкой прочности [6];  $R_{MC}$  – сопротивление микросколу [5]. Заметим, что значения  $\sigma_2$  обычно находятся в интервале между пределом текучести  $\sigma_{0,2}$  и пределом прочности  $\sigma_B$ . Таким образом, силовой интервал  $\sigma_2 \dots R_{MC}$  несет в себе информацию о пределах безопасного изменения локального главного напряжения  $\sigma_{1e}$  без возможности инициации разрушения в зоне пластичности под надрезом и тем самым служит мерой механической стабильности данного металла:

$$K_{ms} = \frac{R_{MC}}{\sigma_2}. \tag{2}$$

Очевидно, что с точки зрения физики процесса механическая стабильность означает меру устойчивости сопротивления металла возможности разрушения в условиях появления зародышевых трещин (ЗТ) в ходе пластического деформирования. Зародышевые трещины в силовом интервале  $\sigma_2 \dots R_{MC}$  имеют заведомо докритический (догриффитсовский) размер и поэтому механически стабильны, т.е. неспособны инициировать разрушение в зоне пластичности пока нарастающее номинальное напряжение  $\sigma_N$  не приведет к росту локального напряжения  $\sigma_1$  до уровня, превышающего  $R_{MC}$ , т.е. гриффитсовского уровня для ЗТ металла с данной структурой.

Информативность критерия  $K_{ms}$  состоит в том, что в соотношении (2) содержатся все сведения о резерве безопасного повышения напряжения течения  $\sigma_2$ , которое может быть связано с любым фактором, повышающим напряжение текучести металла: локальным перенапряжением в вершине концентратора  $q_\sigma$ ; динамикой нагружения  $q_u = \sigma_2^H / \sigma_2^c$  – отношение динамического и статического напряжений течения данного материала; снижением температуры  $q_T = \sigma_2^T / \sigma_2$ ; старением; нейтронным облучением и т.д. Все возможные факторы “упрочнения”, действующие независимо, уменьшают  $K_{ms}$ , чем создают эффект охрупчивания, сила которого может быть выражена величиной параметра охрупчивания  $E_m$ . Например, в образце Шарпи при испытании реализуются три фактора охрупчивания: статическое стеснение напряженного состояния ( $q_\sigma$ ), динамическое ( $q_u$ ) и температурное упрочнение ( $q_T$ ):

$$E_m = q_\sigma q_u q_T. \quad (3)$$

В результате локальное напряжение течения в зоне надреза при ударе  $\sigma_2^H$  будет увеличено в  $E_m$  раз:  $\sigma_2^H = \sigma_2 E_m$ . Подставив  $\sigma_2^H$  в (2), получим

$$P_{ms} = \frac{K_{ms}}{E_m}, \quad (4)$$

где  $P_{ms}$  – оставшаяся часть механической стабильности металла в условиях ударного нагружения надрезанного образца после исчерпания части стабильности  $E_m$  под действием надреза, назовем  $P_{ms}$  параметром механической стабильности для образца Шарпи. Если  $K_{ms} > E_m$ , получим  $P_{ms} > 1$  – испытуемый сплав находится в стабильном состоянии, т.е. в области вязкого состояния, выше критической температуры вязкохрупкого перехода  $T_c$ , при  $E_m > K_{ms}$  имеем  $P_{ms} < 1$  – сплав находится в нестабильном хрупком состоянии, если  $E_m = K_{ms} = K_{ms}^*$ , то  $P_{ms} = 1$  и  $T = T_c$  – точка вязкохрупкого перехода.

**3. Результаты эксперимента и их обсуждение.** Экспериментальное определение параметра механической стабильности  $P_{ms}$  связано с установлением критической температуры вязкохрупкого перехода  $T_c$ , при которой имеют место равенства  $K_{ms} = K_{ms}^*$  и  $K_{ms}^* = E_m$ :

$$K_{ms}^* = \frac{R_{MC}}{\sigma_2^*(T_c)}, \quad (5)$$

где  $\sigma_2^*(T_c)$  – напряжение течения (прочность) сплава при деформации  $e_2 = 0,02$  и температуре  $T_c$ . Подставив  $K_{ms}^* = E_m$  в (4), с учетом (2) получим

$$P_{ms} = \frac{\sigma_2^*(T_c)}{\sigma_2}. \quad (6)$$

Как видно, в отличие от формулы (4) практичнее  $P_{ms}$  определять по (6), используя при этом экспериментально установленную температуру хрупкости  $T_c$  и соответствующую величину критической прочности металла  $\sigma_2^*(T_c)$  при этой температуре. Сравнение параметра  $P_{ms}$  для сталей разных классов прочности выполнено в работе [2]. В табл. 1 приведены наиболее характерные примеры конструкционных сталей [2], выбранных в интервале уровней прочности 200...1000 МПа. Для исследуемых сталей определялась температура вязкохрупкого перехода  $T_c$  по критерию фиксированного значения ударной вязкости по Шарпи  $KCV = 49$  Дж/см<sup>2</sup>, применяемому при аттестации сталей для корпусов атомных реакторов [7]. В работе [2] были определены также хрупкая прочность  $R_{mc}$  по методике [5], пластичность  $\psi$ , показатель Холломона  $n$  [8], ударная вязкость  $KCV$  по Шарпи. С помощью величин  $R_{mc}$ ,  $n$  и  $\sigma_{0,2}$  вычислены коэффициенты  $K_{ms}$  по (2), где согласно соотношению Холломона,  $\sigma_2 = 10^n \sigma_{0,2}$ , и  $K_{ms}^*$  по (5).

Т а б л и ц а 1

Показатели основных механических свойств конструкционных сталей с различным уровнем прочности

Сталь	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$n$	$\psi$ , %	$T_c$ , °С	$KCV$ , Дж/см <sup>2</sup> (20°С)	$K_{ms}$ (20°С)	$K_{ms}^*$ ( $T_c$ )	$P_{ms} = \frac{K_{ms}}{K_{ms}^*}$	$e_{кв}$ по (9)
10Г2ФБ	210	0,230	70	-70	200	2,17	1,70	1,28	0,06
09Г2	390	0,120	76	-45	170	1,96	1,76	1,11	0,05
15Г2АФ	330	0,170	70	-10	53	1,90	1,83	1,04	0,03
10ХСНД	680	0,050	76	-96	170	1,97	1,72	1,15	0,33
12ХН3МФ	910	0,030	72	-80	177	1,85	1,70	1,09	0,32
12ХН3МФ	940	0,027	73	-92	182	1,89	1,68	1,10	0,68

Представленные в табл. 1 данные позволяют сделать предварительные выводы. Как видно, с увеличением условного предела текучести стали  $\sigma_{0,2}$  температура хрупкости  $T_c$  вначале повышается до максимальной (для стали 15Г2АФ с  $\sigma_{0,2} = 330$  МПа  $T_c = -10^\circ\text{C}$ ), а затем резко падает до  $-80...-96^\circ\text{C}$ . Подобный немонотонный характер изменения (с минимумом при  $\sigma_{0,2} = 330$  МПа) наблюдается для ударной вязкости  $KCV$  ( $KCV = 53$  Дж/см<sup>2</sup>) и параметра механической стабильности  $P_{ms}$  ( $P_{ms}^{\min} = 1,04$ ). Другие характеристики на этот минимум хладостойкости не реагируют, стандартная пластичность  $\psi$  остается практически неизменной в пределах  $73 \pm 3\%$ .

Эквивалентная пластичность для образца Шарпи  $e_{\text{ЭКВ}}$  обнаруживает минимум для стали с наибольшей хладноломкостью:  $e_{\text{ЭКВ}} = 0,03$ . Суть данной величины следует из соотношения Холломона (1), где для момента хрупкого разрушения принимаем  $\sigma_e = \sigma_2^*$ , и тогда по (6) получим  $\sigma_e/\sigma_2 = \sigma_2^*/\sigma_2 = P_{ms}$ . Следовательно, согласно (1)  $e_{\text{ЭКВ}}$  является деформационным отражением того же упрочнения (от  $\sigma_2$  до  $\sigma_2^*$ ), которое эквивалентно повышению “прочности” стали в результате снижения температуры до  $T_c$ . Поэтому  $e_{\text{ЭКВ}}$  можно использовать как деформационную меру температурного интервала вязкого состояния, т.е. величины  $\Delta T = T_k - T_c$ , где  $T_k$  – условная комнатная температура ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ).

На рис. 2 представлена зависимость  $e_{\text{ЭКВ}}$  от  $T_c$ , полученная по критерию хрупкости ( $KCV = 49 \text{ Дж/см}^2$ ). Как видно, кривая является универсальной (инвариантной), так как в области малых значений  $\Delta T$  (область хладноломкости) практически не зависит от критерия хрупкости. Действительно, температурный прирост прочности  $\Delta\sigma = \sigma_2^* - \sigma_2$  в интервале температур  $\Delta T$  составит

$$\Delta\sigma = \beta\Delta T, \quad (7)$$

где  $\beta$  – коэффициент температурного приращения прочности.

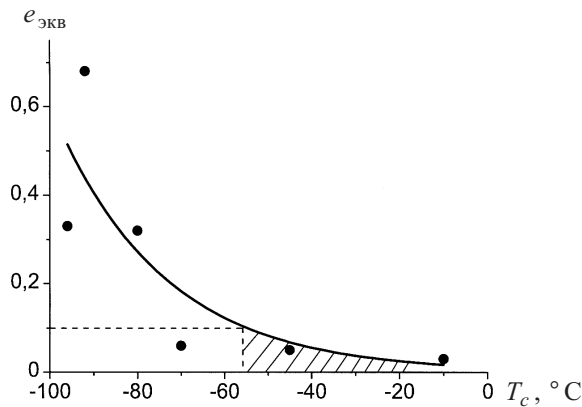


Рис. 2. Зависимость деформации  $e_{\text{ЭКВ}}$  от температуры вязкохрупкого перехода  $T_c$  для сталей, приведенных в табл. 1 (точки), и расчет по формуле (10) (линия).

Этот же прирост прочности можно представить в виде отношения  $\sigma_2^*/\sigma_2$ :

$$\Delta\sigma = \sigma_2 \left( \frac{\sigma_2^*}{\sigma_2} - 1 \right) = \sigma_2 (P_{ms} - 1). \quad (8)$$

Из (1), приняв  $e = e_{\text{ЭКВ}}$ ,  $\sigma_e = \sigma_2^*$ , следует

$$e_{\text{ЭКВ}} = 0,02 \left( \frac{\sigma_2^*}{\sigma_2} \right)^{1/n}. \quad (9)$$

Из (7)–(9) видно, что  $\Delta T$ ,  $\Delta\sigma$  и  $e_{\text{ЭКВ}}$  связаны одними показателями прочности  $\sigma_2^*$  и  $\sigma_2$ :

$$\Delta T = \frac{\sigma_2}{\beta} (P_{ms} - 1) = \frac{\sigma_2}{\beta} [(50e_{\text{ЭКВ}})^n - 1]. \quad (10)$$

В условиях хладноломкости имеем  $\Delta T \rightarrow 0$ , следовательно, согласно (7)  $\Delta\sigma \rightarrow 0$ , тогда в (9):  $\sigma_2^*/\sigma_2 \rightarrow 1$  и  $e_{\text{ЭКВ}} \rightarrow 0,02$ . При  $e_{\text{ЭКВ}} = 0,02$  получим условие хрупкости при комнатной температуре  $T_k = T_c$ . Если считать хладноломкостью хрупкость стали в области климатических температур ( $T_c > -80^\circ\text{C}$ ), то интервал хрупкости в температурном измерении составит  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ , и в деформационном измерении ему будет приближенно соответствовать

$$e_{\text{ЭКВ}} \leq 0,1, \quad (11)$$

что можно рассматривать как оценочный, но довольно простой деформационный критерий хладноломкости стали.

Таким образом, несмотря на то что нормативный показатель пластичности  $\psi$  не может служить количественным индикатором хладостойкости или хладноломкости стали (табл. 1), все же пластичность  $e_{\text{ЭКВ}}$  в выражении, эквивалентном параметру механической стабильности  $P_{ms}$ , вполне отражает меру хладостойкости в форме критерия

$$e_{\text{ЭКВ}} > 0,1. \quad (12)$$

Более того, для различных методов испытаний по формуле (10) можно численно прогнозировать температуру хрупкости  $T_c$ , если известен параметр  $P_{ms}$ . Для этого необходимо знать коэффициент  $K_{ms}$  (4), т.е.  $R_{mc}$  и  $\sigma_2$ , а также параметр охрупчивающей силы  $E_m$  для данного метода испытания образцов. Кроме того, для количественного прогноза  $T_c$  по (10) для сталей потребуется величина  $\beta$ , которая, по данным справочника [9], для интервала температур  $20\dots-80^\circ\text{C}$  колеблется от 0,7 до 1,6. В нашем расчете, который имеет оценочно-иллюстративный характер, приняли  $\beta \approx 1$ .

В табл. 2 приведены результаты расчета  $\Delta T$  по (10) для сталей, представленных в табл. 1. Сравнение данных расчета с экспериментом (табл. 1) показывает, что расчет  $T_c$  для образцов Шарпи по величине параметра  $P_{ms}$  вполне возможен исходя из экспериментальных данных по механическим свойствам, определяемым в случае одноосного растяжения при комнатной температуре (прочность  $\sigma_2$ ) и температуре хрупкости (хрупкая прочность  $R_{mc}$  [5]). Следует также задать необходимую величину фактора охрупчивания  $E_m$  для данного метода испытания. В нашем расчете принята величина  $E_m = 1,7$  – среднее значение  $K_{ms}^*$  для метода испытаний по Шарпи для всех групп сталей (от низкопрочных до высокопрочных) [2].

Сравнение результатов расчета  $T_c$  с экспериментальными значениями (табл. 2) показывает, что прогнозирование хладноломкости стали по параметру механической стабильности  $P_{ms}$  вполне возможно при предваритель-

ной оценке перспективности рассматриваемого конструкционного сплава с точки зрения его ресурса хладостойкости. Вместе с тем величина  $P_{ms}$  дает представление об остаточном резерве механической стабильности металла при его испытании на склонность к хрупкому разрушению. Причем этот запас вязкости и пластичности металла может быть востребован двояко: либо усилением действия фактора охрупчивания вплоть до  $E_{\max} = K_{ms}$ , либо исчерпанием температурного интервала хладостойкости до  $\Delta T \rightarrow 0$ .

Т а б л и ц а 2

Расчетная оценка теоретических температур хрупкости  $T_c$  сталей, представленных в табл. 1

Сталь	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_2$ , МПа	$K_{ms}$	$P_{ms}$ (расчет при $E_m = 1,7$ )	$P_{ms}$ (экспе- римент)	$\Delta T$ , °C	$T_c$ , °C
10Г2ФБ	210	360	2,17	1,28	1,28	80	$\frac{-60}{-70}$
09Г2	390	515	1,96	1,15	1,11	57	$\frac{-37}{-45}$
15Г2АФ	330	490	1,90	1,12	1,04	20	$\frac{0}{-10}$
10ХСНД	680	760	1,97	1,16	1,15	114	$\frac{-94}{-96}$
12ХН3МФ	910	975	1,85	1,09	1,09	88	$\frac{-68}{-80}$
12ХН3МФ	940	1000	1,89	1,10	1,10	100	$\frac{-80}{-92}$

**Примечание.** Над чертой приведены расчетные данные, под чертой – экспериментальные.

Таким образом, хладостойкость стали как мера ее сопротивления охрупчиванию при снижении температуры в пределах климатических температур полностью определяется параметром механической стабильности  $P_{ms}$ , являющимся ресурсом от общей механической стабильности сплава  $K_{ms}$  после воздействия на металл определенного фактора охрупчивания при испытаниях на хрупкость. Коэффициент  $K_{ms}$  есть общая мера потенциальной склонности металла как такового к хрупкому разрушению под воздействием любого фактора охрупчивания.

С помощью условной пластичности сплава  $e_{\text{ЭКВ}}$ , эквивалентной величине  $P_{ms}$  ( $e_{\text{ЭКВ}} = 0,02P_{ms}^{1/n}$ ), можно сформулировать простой критерий достаточной хладостойкости для всех способов определения критической температуры  $T_c$ , а именно:  $e_{\text{ЭКВ}} \geq 0,1$ .

Стандартная пластичность  $\psi$  не является признаком достаточности для обеспечения необходимой хладостойкости, однако с ее увеличением все же наблюдается тенденция к повышению механической стабильности, т.е. к увеличению сопротивления вязкохрупкому переходу.

**Резюме**

Розглядається взаємозв'язок між характеристиками пластичності та холодо-стійкості, який може бути встановлений за допомогою спеціальної характеристики – коефіцієнта механічної стабільності (це універсальна міра опору металу переходу від пластичного стану до крихкого). Установлено, що пластичність не може забезпечити потрібний опір крихкості металу, а лише створює передумови для досягнення необхідної механічної стабільності. Умовою високої механічної стабільності є великий силовий інтервал між поточною міцністю металу і крихкою міцністю при розриві.

1. *Мешков Ю. Я.* Вязкость и механическая стабильность конструкционных материалов // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сб. науч. тр. междунар. конф. ОТТОМ-6. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – С. 6 – 10.
2. *Мешков Ю. Я.* Физическая природа охрупчивающего действия надрезов в металлических материалах // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов: Сб. науч. тр. междунар. конф. ОТТОМ-7. – Харьков: ННЦ ХФТИ ИПЦ “Контраст”, 2006. – Т. 1. – С. 213 – 222.
3. *Kotrechko S. and Meshkov Yu.* A new approach to estimate irradiation embrittlement of pressure vessel steels // Int. Press. Vess. – 2008. – **85**, No. 5. – P. 336 – 343.
4. *Котречко С. А., Мешков Ю. Я.* Физические основы механической стабильности конструкционных материалов // Актуальные проблемы современного материаловедения. – Киев: Издательский Дом “Академперіодика”, 2008. – С. 535 – 556.
5. *Мешков Ю. Я., Пахаренко Г. А.* Структура металлов и хрупкость стальных изделий. – Киев: Наук. думка, 1985. – 268 с.
6. *Котречко С. А.* Критическое напряжение скола и “хрупкая” прочность поликристаллических металлов // Металлофизика. – 1992. – **14**, № 5. – С. 37 – 41.
7. *ПНАЭ Г-7-002-86.* Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Введ. 01.07.87.
8. *Hollomon J. H.* Tensile deformation // Trans. AIME Iron Steel Div. – 1945. – **162**. – P. 268 – 290.
9. *Кошелев П. Ф., Беляев С. Е.* Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах. – М.: Машиностроение, 1967. – 363 с.

Поступила 21. 06. 2009