

УДК: 669

## ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ К ОХРУПЧИВАНИЮ КАК МЕРА КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Ю. Я. Мешков, д. т. н., проф. С.А. Котречко, д. т. н., проф.,  
А.В. Шиян, к. т. н., с. н. с.

*Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев*

### 1. Вступление. Состояние вопроса

Основным признаком пригодности стали для использования ее в конструкции есть качество этой стали, заключенное в комплексе ее важнейших механических характеристик. При этом в основе суждения о качестве конструкционной стали, так или иначе, лежит степень ее защищенности от хрупкости, в первую очередь, за счет рационального использования свойства прочности.

Прочность является основным (базовым) механическим свойством любого конструкционного материала. Для конструкционных сталей и сплавов она определяется стандартными показателями условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  или предела прочности  $\sigma_B$ , но, для обеспечения надежности при использовании данного материала в конструкции, к имеющейся характеристике прочности обязательно прилагаются дополнительные механические характеристики - пластичности  $\psi_K$  (относительное поперечное сужение при разрыве образца),  $\delta_p$  (относительное равномерное удлинение при разрыве), ударной вязкости (удельная работа при разрушении образца с регламентированным надрезом, KCV или KCU), трещиностойкости  $K_{IC}$  и др. [1–3]. Все указанные дополнительные характеристики, так или иначе, отражают одно важнейшее свойство испытуемого металла - его сопротивляемость к переходу из пластичного состояния в хрупкое или, другими словами, свойство "*охрупчиваемости*" металла. Однако, каких-либо физически обоснованных нормативов достаточности показателей свойств пластичности или вязкости для заданной прочности металла применительно к конкретной конструкции и условиям ее эксплуатации в нынешней инженерной практике пока не выработано, а существующие нормативы основаны на сугубо эмпирическом и статистическом опыте.

Между тем, в ряду механических характеристик сталей, свойство прочности занимает особое, ключевое место, однако роль этого свойства с точки зрения его влияния на хрупкость и конструкционное качество металла, пока явно недооценивается. То, что с ростом прочности металлических сплавов опасность хрупкого разрушения нарастает – общеизвестный факт, но проблема состоит в том, что необходимо указать ту характеристику, которая отражает степень этой опасности в определенной количественной мере. В настоящей работе делается попытка представить свойство охрупчиваемости

или, напротив, изломостойкости, как свойство, непосредственно связанное со свойством прочности - основным (базовым) механическим свойством конструкционного материала.

## 2. Постановка задачи. Расширенная характеристика свойства прочности

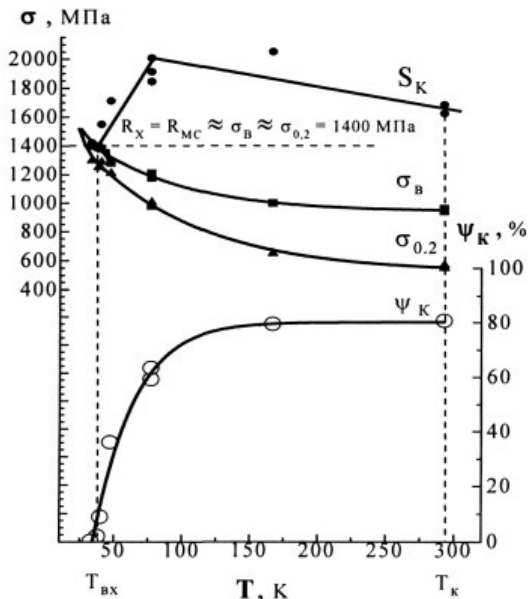
Прочность, как и другие механические свойства металла, сильно зависит от природы сплава, его состава, структуры (термообработки) и внешних факторов воздействия (температуры, скорости нагружения, вида напряженного состояния). Исследование влияния внешних факторов на прочность особенно интересно в том смысле, что в этом случае мы имеем дело с изменением механического поведения (свойств) металла с данной фиксированной структурой и, поэтому, имеется возможность в спектре возможных уровней прочности выделить некоторую базовую характеристику, отражающую лишь вклад структурной *“атермической”* составляющей и лишенную влияния всех внешних факторов. Примером такой базовой характеристики может быть, например, прочность при низких (криогенных) температурах и квазистатической скорости нагружения при одноосном растяжении. Эту характеристику прочности можно считать исходной и только структурно-детерминированной, в отличие от текущей прочности, изменяющейся под влиянием различных факторов внешнего воздействия, например, таких, как температура, динамика нагружения и жесткость напряженного состояния.

Как правило, для большинства конструкционных сплавов, низкотемпературная *“структурная”* или *“атермическая”* часть прочности практически совсем или весьма существенно лишена пластичности и, поэтому проявляет себя, как вполне или почти *“хрупкая”* прочность. Но, с повышением температуры испытания, прочность снижается, а пластичность нарастает (рис. 1) и это придает прочности некое специфическое свойство, которое можно назвать **стабильностью прочности**. Стабильность прочности означает, что с достижением предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (или любого другого выбранного рубежа прочности, например,  $\sigma_B$ ) деформирование образца продолжается, идет пластическое формоизменение и упрочнение вплоть до достижения предельного напряжения разрушения  $S_K$  при конечной пластической деформации  $\psi_K$ . По мере снижения температуры от комнатной  $T_K$  до критической вязко-хрупкого перехода  $T_{BK}$  прочность стали постепенно теряет признак стабильности (в виде снижения пластичности  $\psi_K$ ) и, в конечном счете, при условии  $\sigma_{0,2} \approx S_K$  (или  $\sigma_B \approx S_K$ ), где  $\psi_K \rightarrow 0$ , прочность  $\sigma_{0,2}^*$  становится нестабильной, или прочностью хрупкого состояния, которую можно назвать хрупкой прочностью  $R_x$ .

Заметим, что хрупкая прочность  $R_x$  является наибольшим значением стабильной прочности  $\sigma_{0,2}^*$  и наименьшим значением нестабильной, но по своей сути  $R_x$  – это именно та, упомянутая выше, исходная (базовая) структурно-детерминированная прочность, которая задается только составом и структурным состоянием металла. Эта хрупкая прочность  $R_x$ , являясь наибольшей стабильной прочностью, может рассматриваться как особая **предельная прочность**, т.к. представляет собой точку перехода от предельной нестабильной прочности хрупкого разрушения (ниже  $R_x$  на температурной

---

кривой прочности) и участка стабильной прочности  $\sigma_{0,2}$  в температурном интервале пластического поведения металла. Весь интервал стабильного поведения свойства прочности  $\sigma_{0,2}$  (при комнатной температуре  $T_k$ ) до  $R_x$  (при температуре вязко-хрупкого перехода  $T_{вх}$ ) является интервалом механической стабильности металла (см. рис. 1).



**Рис. 1.** Температурные зависимости механических характеристик конструкционной стали 15X2NMФА для определения хрупкой прочности  $R_x$ .

Механическая стабильность, как важнейший признак свойства прочности, принципиально дополняет характеристику прочности с точки зрения оценки степени подверженности металла угрозе его охрупчивания под воздействием всех внешних факторов влияния на прочность - температуры, динамики, вида напряженного состояния и др.

### 3. Механическая стабильность металла

В качестве конкретной количественной меры такого свойства прочности, как механическая стабильность, в работах [4, 5] было предложено использовать “коэффициент механической стабильности”  $K_{ms}$ :

$$K_{ms} = \frac{R_{MC}}{\sigma_2}, \quad (1)$$

где  $R_{MC}$  - хрупкая прочность (сопротивление микросколу), как минимальная прочность разрушения при критической степени деформации  $\epsilon_c \approx 2\%$  в области криогенных температур [5];  $\sigma_2$  - стабильная прочность стали на стадии критической деформации  $\epsilon_c \approx 2\%$  в диапазоне температур от  $T_k$  до  $T_{вх}$ .

Из (1) видно, что при неизменной структуре ( $R_{MC} = \text{const}$ ) изменение прочности за счет температурно-зависимой составляющей прочности  $\sigma_2$  в пределах, где  $\sigma_2 < R_{MC}$ , механическая стабильность этой стали остается  $K_{ms} > 1$ , что означает безусловное проявление определенной пластичности ( $\psi_K > 2\%$ ) в момент разрушения при разрыве. Но принципиальное преимущество показателя  $K_{ms}$  перед другими показателями пластичности ( $\psi_K$ ) или вязкости (KCV, KCU), заключается в том, что характеристика  $K_{ms}$  пригодна для анализа условий пластического поведения стали и в общем случае сложного напряженного состояния, где достаточно учесть механическое повышение прочности металла в зонах стесненной текучести по законам механики напряженного состояния [6]. Именно поэтому параметр  $K_{ms}$  оказывается пригодным для расчетного прогнозирования критической температуры хрупкости  $T_c$  образцов с надрезом или трещиной [7].

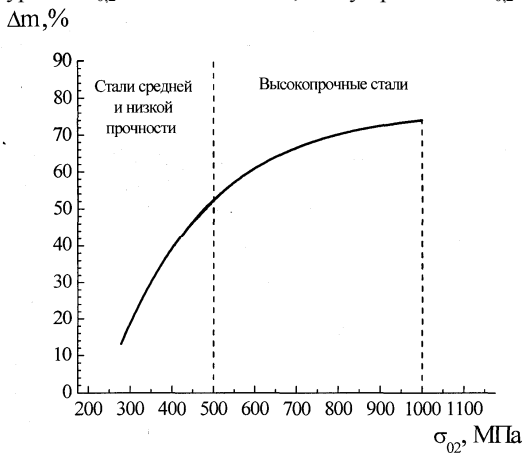
Таким образом, прочность металла ( $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_2$ ) является главным, ключевым механическим свойством, которое в сочетании с характеристикой механической стабильности  $K_{ms}$  полностью контролирует склонность к охрупчиванию (охрупчиваемость стали). При этом иные показатели ( $\psi_K$ , KCV и др.) играют лишь иллюстративную (косвенную), но не определяющую роль в возможности проявления хрупкости металла.

#### **4. Прочность, стабильность и качество конструкционной стали**

Модельное физически обоснованное на субмикроскопическом уровне представление о механической стабильности металлов в процессе их пластической деформации подробно приводится в работах [4, 5] и здесь не рассматривается. Можно лишь подчеркнуть, что для выработки полезного для инженерной практики наглядного представления об одном из ключевых показателей свойств металлов, имеющих прямое отношение к проблеме конструкционной хрупкости металлов (“*охрупчиваемости*”) нет необходимости углубляться во внутреннюю микроструктурную природу механических явлений деформируемого металла, а достаточно лишь расширить подход к рассмотрению макроскопического свойства прочности ( $\sigma_{0,2}$ ), дополнив его введением понятия стабильности прочности.

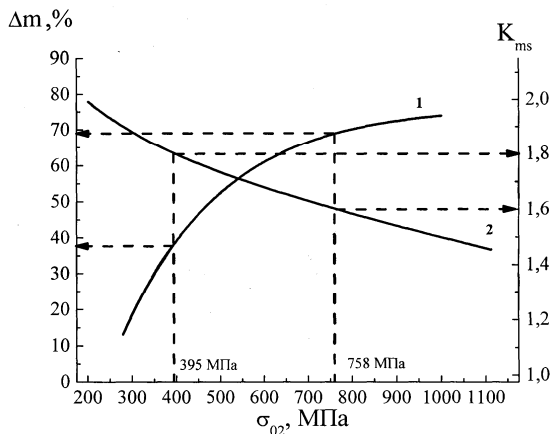
Главный смысл увеличения прочности стали в технике заключается в снижении веса конструкции. Однако на практике экономия веса строительной конструкции далеко не всегда пропорциональна росту прочности  $\sigma_{0,2}$  (рис. 2) [8]. Как видно из рис. 2, замедление темпа роста в экономии веса конструкции от темпа роста прочности  $< \sigma_{0,2}$  обусловлено увеличением риска охрупчивания высокопрочной стали в конструкции, а также с вынужденным повышением коэффициентов запаса прочности. Таким образом, очевидно ощутимое снижение конструкционного качества прочности группы высокопрочных сталей с  $\sigma_{0,2} = 500 \dots 1000$  МПа в сравнении с группой сталей средней и низкой прочности  $\sigma_{0,2} < 500$  МПа. Это снижение конструкционного качества прочности  $\sigma_{0,2}$  проявляется в том, что в пределах разбега прочностей в первой группе сталей экономия веса конструкций составляет  $\sim 75 - 50 \approx 25\%$ , а во второй группе сталей средней и низкой прочности  $\sim 50 - 0 \approx 50\%$ . Следовательно, относительная эффективность снижения металлоемкости конструкции (относительный прирост снижения веса  $\Delta m$ , % на относительный

прирост прочности  $\Delta \sigma$ , МПа) у сталей с прочностью  $\sigma_{0,2} < 500$  МПа в 2 раза выше, чем у высокопрочных сталей, например, **конструктивное качество прочности** на уровне  $\sigma_{0,2} \approx 400$  МПа выше, чем у прочности  $\sigma_{0,2} \approx 800$  МПа.



**Рис. 2.** Зависимость изменения показателя относительного снижения веса конструкции  $\Delta m$  от прочности конструкционной стали  $\sigma_{0,2}$  [8].

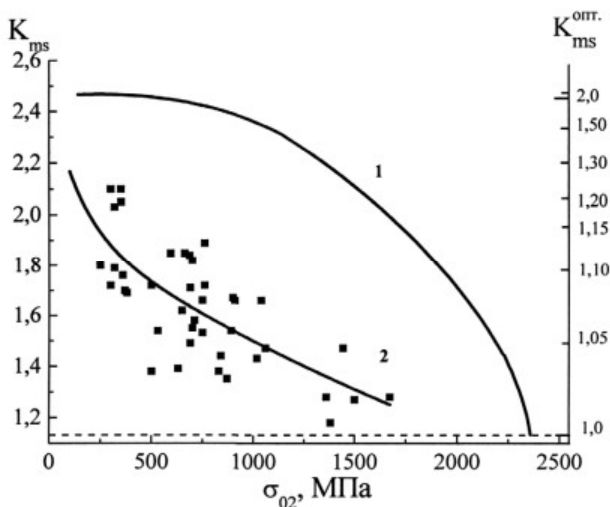
Причина снижения металлоемкости с ростом прочности  $\sigma_{0,2}$  видна из рисунка 3, где представлено уменьшение характеристики  $K_{ms}$  с ростом  $\sigma_{0,2}$  [4,5].



**Рис. 3.** Зависимости изменения показателя относительного снижения веса конструкции  $\Delta m$  [8] (кривая 1) и характеристики механической стабильности  $K_{ms}$  от прочности конструкционной стали  $\sigma_{0,2}$  (аппроксимация экспериментальных данных [4, 5] – кривая 2).

Как видно из рисунка 3, конструкционное качество прочности, отражаемое величиной  $K_{ms}$ , снижается по мере увеличения прочности  $\sigma_{0,2}$ . Оценка показывает, что при переходе от прочности  $\sigma_{0,2} = 395$  МПа к  $\sigma_{0,2} = 758$  МПа, величина  $K_{ms}$ , соответственно, снижается от значения  $K_{ms} = 1,8$  до значения  $K_{ms} = 1,6$ , (см. рис. 3), т.е. всего на 11 %, что обуславливает относительную потерю ожидаемого выигрыша в весе изделия на 45 % (от 69 % до 38%). Это сравнение показывает, насколько важным фактором в инженерной практике является понятие конструкционной стабильности (механической стабильности) характеристики прочности, привязанное к ее конкретному уровню  $\sigma_{0,2}$  или  $\sigma_2$ . Таким образом, при оценке прочности каждого металлического материала наряду с ее величиной  $\sigma_{0,2}$  (или  $\sigma_2$ ) должна присутствовать качественная сторона этой прочности, отражающая ее конструкционную ценность по величине  $K_{ms}$ .

На рисунке 4 дополнительно приведена кривая изменения оптимальных значений характеристики механической стабильности  $K_{ms}^{om}$  от увеличения прочности  $\sigma_{0,2}$  [9].



**Рис. 4.** Зависимости изменения оптимального значения характеристики механической стабильности  $K_{ms}^{om}$  (кривая 1) и  $K_{ms}$  типичных конструкционных сталей от прочности конструкционной стали  $\sigma_{0,2}$  (аппроксимация экспериментальных данных [4, 5] - кривая 2); ■ - экспериментальные данные для сталей с различными уровнями прочности.

Величина  $K_{ms}^{om}$  отражает наиболее высокие (оптимизированные для любых сочетаний свойств пластичности  $\psi_K$ , прочности  $\sigma_{0,2}$  и механической стабильности  $K_{ms}$ ) из всех возможных значений  $K_{ms}$  при заданном уровне

прочности  $\sigma_{0,2}$  для конструкционных сталей и сплавов всех классов прочности и характеризует наивысшее качество металла [10]. Это означает, что для строительных сталей еще имеется неиспользованный резерв повышения их  $K_{ms}$  до уровня  $K_{ms}^{opt}$  и, соответственно, для перевода их из разряда малоэффективных к высокоэффективным в части выигрыша в металлоемкости при увеличении прочности (см. рис. 4). Препятствием здесь могут стать лишь обстоятельства чисто технологического и экономического порядка, но инженерные предпосылки для такого пути снижения металлоемкости конструкций здесь вполне очевидны.

На рисунке 4 приводится общая картина зависимости  $K_{ms}^{opt}$  от прочности сталей [9, 10], где видно, что с увеличением прочности ее конструкционное качество обречено на неизбежное падение, особенно в интервале  $\sigma_{0,2} > 1000 \dots 1500$  МПа так, что для строительных сталей перспективы на такой класс прочности быть не может. Выше по прочности могут быть инструментальные и другие виды сталей, для которых механическая стабильность не столь актуальна, поэтому значения даже оптимальной механической стабильности  $K_{ms}^{opt}$  здесь опускаются до минимально приемлемых уровней ( $\sim 1,1 \dots 1,2$ ).

#### **Заключение**

В общем комплексе механических характеристик сталей ведущая роль принадлежит свойству прочности ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_B$ ), которое в сочетании с дополнительной характеристикой механической стабильности  $K_{ms}$  определяет то конечное свойство, которое можно назвать *“конструкционным качеством”* стали с данным уровнем прочности  $\sigma_{0,2}$ .

С ростом показателя прочности за счет изменения состава и структуры стали конструкционное качество стали, дополнительно отражаемое ее механической стабильностью  $K_{ms}$ , неизбежно понижается, что сопровождается потерей темпа роста экономии металла за счет его упрочнения. Это неизбежно приводит к вопросу о пределах экономической и технологической целесообразности применения высокопрочных или особо высокопрочных сталей в строительстве уникальных сооружений. Установление обоснованных пределов такого упрочнения сталей, конечно, является предметом отдельного исследования, но рассмотренные здесь понятия механической стабильности и охрупчиваемости стали, непременно будут полезными для такого исследования.

#### **Использованная литература**

1. В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
2. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян Пластичность и

хладостойкость конструкционных сталей // Проблемы прочности, 2010, № 1, С. 112–119.

3. Брок Д. Основы механики разрушения. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.

4. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков Пределная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции – Киев: Наук, думка, 2008, 295 с.

5. Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В. Механическая стабильность – универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла // Успехи физики металлов, 2009, т. 10, №2, С. 207–228.

6. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие / Под ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наук, думка, 1988. – 3.

7. Ю.Я. Мешков, С.А. Котречко, А.В. Шиян, Н.Н. Стеценко, Е.Ф. Сорока Роль характеристик міцності в оцінці конструкційної якості сталей і сплавів // Свідectво про реєстрацію авторського права № 41447 /Україна/. Оpubл. 20.12.2011, Бюл. № 26. – 12 с.

8. Ю.Д. Морозов Микролегирование как путь повышения механических и технологических свойств строительных сталей // Металознавство та термічна обробка металів, 2001, № 3 (14), С.21 – 37.

9. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян, Н.Н. Стеценко Оптимизация свойств пластичности, прочности и механической стабильности сталей и сплавов в виде обобщенной диаграммы // Свідectво про реєстрацію авторського права № 39291 /Україна/. Оpubл. 22.07.2011, Бюл. № 25. – 15 с.

10. А.В. Шиян, С.О. Котречко, Ю.Я. Мешков, Н.М. Стеценко, В.І. Большаков, О.П. Носенко Спосіб оцінки якості конструкційної сталі // Патент № 66341 /Україна/. Оpubл. 26.12.2011, Бюл. № 24. – 12 с.