

## Раздел третий

# МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

УДК 669.01:539.4;539.2

## РОЛЬ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ В ХРУПКОСТИ МЕТАЛЛОВ

*С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков*

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

*E-mail: kotr@imp.kiev.ua; тел. +38(044)424-25-61, +38(044)424-13-52*

На основе анализа связи стандартных характеристик прочности и пластичности для широкого круга конструкционных сталей предложена количественная мера способности стали сопротивляться переходу из пластичного состояния в хрупкое. Показано, что хрупкость стали определяется не величиной остаточной деформации, а соотношением между уровнем хрупкой прочности  $R_{MC}$  и величиной предела текучести с учетом склонности металла к деформационному упрочнению. Обоснована возможность оптимизации комплекса свойств прочности и пластичности для достижения наилучшего показателя сопротивления хрупкости стали.

Прочность и пластичность являются базовыми механическими свойствами металлов и сплавов, от сочетания которых напрямую зависит основное эксплуатационное качество материала – его склонность противостоять переходу в хрупкое состояние под воздействием таких факторов, как снижение температуры, ударное нагружение, концентрация напряжений и т.п. В то же время хрупкость, как вид механического состояния материала, при котором разрушение реализуется чисто упругим образом, для металлов, в принципе, невозможна, поскольку для их разрушения необходимо проявление определенной стадии пластичности, порождающей причину разрушения – зародышевые субмикротрещины, объекты гриффитсовского процесса разрушения [1]. В этой связи для металлов принципиально важным становится вопрос об измерении степени их «нехрупкости» (квазихрупкости) и о том, какой механической характеристикой эту меру квазихрупкости следует оценивать.

Типичное разрушение твердых тел состоит из двух энергетических стадий: 1) стадии накопления упругой энергии (при нагружении) и 2) стадии сброса накопленной энергии (излом). Для идеально хрупкого тела обе стадии носят чисто упругий обратимый характер. У металлов степень их «нехрупкости» зависит от того, насколько в этих двух стадиях разрушения проявляется доля необратимого поглощения энергии на эффекты пластической деформации (стадия 1) или пластической релаксации энергии (стадия 2). В принципе, можно оценивать степень квазихрупкости по эффектам пластических проявлений в металле на любой из двух стадий, но практически удобнее и эффективнее это делать по оценке величины первой, подготовительной, стадии разрушения. Для этой цели лучше всего подходит не традиционный показатель пластичности  $\psi$  (относительное сужение при разрыве), а особый показатель, интерпретирующий стадию 1 разрушения металла в терминах величины перенапряжения, которое может

выдержать металл без разрушения. Этот показатель назван коэффициентом механической стабильности  $K_{ms}$  [2]:

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

где  $R_{MC}$  – хрупкая прочность металла (сопротивление микросколу [1]),  $\sigma_2$  – текущая прочность деформируемого металла на критической стадии деформации  $\epsilon_c \approx 2\%$  [3].

Величина  $K_{ms}$  – наименьшее значение механической стабильности металла на стадии небольших пластических деформаций, наиболее опасных с точки зрения близости к хрупкому состоянию, т.е.  $K_{ms}$  – это наименьший показатель упругого сопротивления металла проявлению стадии 2 – излому. Поэтому  $K_{ms}$  можно назвать показателем особого механического свойства металла, характеризующего его устойчивость против излома, – свойства изломостойкости по аналогии, например, с термином хладостойкости.

Естественно, сопротивление излому на критической стадии деформации  $\epsilon_c \approx 2\%$  исчезает при условии  $\sigma_2 = R_{MC}$ , т.е.  $K_{ms} = 1$ , что является критерием квазихрупкости (лучше сказать критерием ломкости) при одноосном растяжении. При условии  $\sigma_2 < R_{MC}$  ( $K_{ms} > 1$ ) значение остаточной деформации превышает критическую величину  $\epsilon_c = 2\%$  и проявляется в виде определенного значения  $\psi$  при разрыве. Таким образом,  $K_{ms}$  отражает роль свойства пластичности в защите металла от хрупкости, но из (1) хорошо видно, что пластичность, как свойство в предупреждении хрупкости, играет подчиненную, второстепенную роль, поскольку первопричиной «защиты» от хрупкости металла служит силовой интервал между двумя показателями прочности –

текущей  $\sigma_2$  и хрупкой  $R_{MC}$ . Вполне естественно поэтому проявляется температурный эффект охрупчивания ОЦК-металлов (хладноломкость) из-за низкотемпературного роста прочности  $\sigma_2$  металла, тогда как  $R_{MC}$  от температуры не зависит [1].

Таким образом, величина снижения пластичности  $\psi$  является следствием уменьшения «дистанции» между  $\sigma_2$  и уровнем хрупкой прочности  $R_{MC}$  металла. Но в то же время не всякое увеличение прочности ( $\sigma_{0,2}$  или  $\sigma_2$ ) обязательно ведет к охрупчиванию металла. Из технологической практики хорошо известно, что улучшением химического состава стали и технологии ее упрочнения удается отыскать такие оптимальные варианты упрочнения, когда рост прочности ( $\sigma_{0,2}$ ) можно сочетать с ростом пластичности ( $\psi$ ). Из определения  $K_{ms}$  (1) понятно, что это возможно только в случае, если с ростом прочности  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_2$ ) удастся добиться опережающего роста хрупкой прочности  $R_{MC}$  для обеспечения сохранения или даже увеличения изломостойкости ( $K_{ms}$ ).

Поэтому, если проанализировать достаточно обширный парк конструкционных сталей, то можно убедиться, что с ростом показателей прочности ( $\sigma_{0,2}$ ) характеристики пластичности ( $\psi$ ) не проявляют очевидной склонности к охрупчиванию различных сталей, так как при одинаковой прочности диапазон показателей  $\psi$  может варьироваться в очень широких пределах для сталей различного качества и назначения (рис. 1).

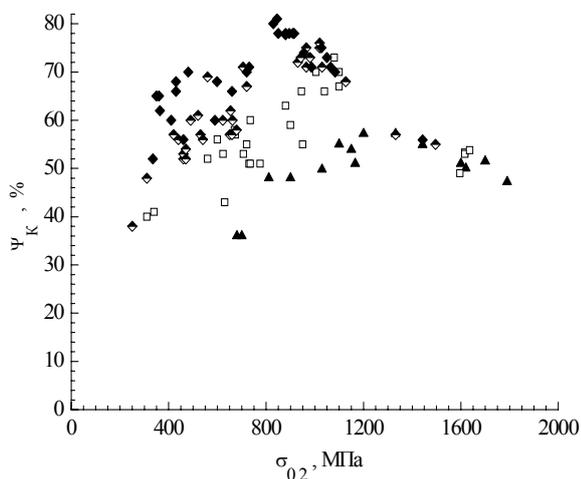


Рис. 1. Распределение показателей пластичности  $\psi_k$  в зависимости от прочности  $\sigma_{0,2}$  конструкционных сталей [1]

Но если в этом, на первый взгляд, хаотичном ансамбле свойств выделить те стали, для которых имеется постоянный показатель  $K_{ms} = const$ , то весь ансамбль свойств приобретает весьма упорядоченный характер (рис. 2). Сразу видно, что средствами изыскания составов сталей и рациональных техно-

логий упрочнения можно добиться одновременного повышения прочности ( $\sigma_{0,2}$ ) и пластичности ( $\psi$ ) при сохранении уровня изломостойкости ( $K_{ms} = const$ ) [4]. Более того, оказывается для каждого значения  $K_{ms}$  имеется свой оптимальный набор показателей прочности и пластичности, при котором характеристика пластичности  $\psi$  имеет свое наибольшее возможное значение  $\psi_k^{max}$  для данной прочности  $\sigma_{0,2}$ . Таким образом, можно конкретизировать практически важную задачу оптимизации комплекса механических свойств: для выбранной прочности стали ( $\sigma_{0,2}$ ) определить необходимую минимальную пластичность ( $\psi_k$ ), обеспечивающую желаемый показатель сопротивления хрупкости, – изломостойкость ( $K_{ms}$ ).

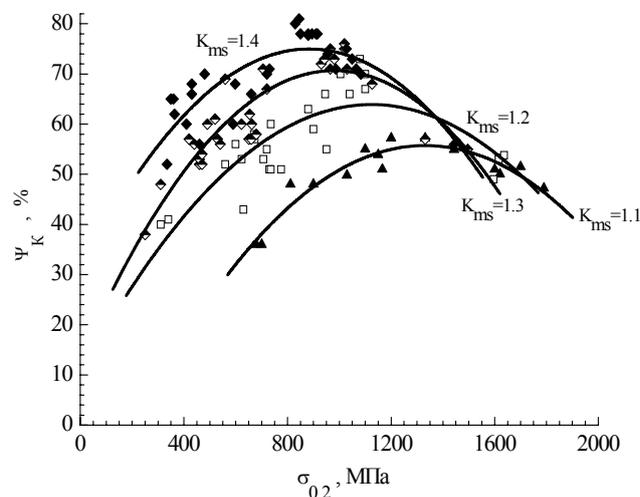


Рис. 2. То же, что и на рис. 1 для показателей пластичности  $\psi_k$ , объединяемых условием одинаковой изломостойкости ( $K_{ms} = const$ )

При этом максимальное значение пластичности  $\psi_k^{max}$ , присущее каждому уровню прочности стали, с ростом прочности  $\sigma_{0,2}$  снижается вместе с показателем  $K_{ms}$ , но в темпе, разном для различных категорий прочностей сталей: в низком темпе для сталей малой и средней прочности ( $\sigma_{0,2} \leq 800$  МПа), с повышенным темпом потери пластичности  $\psi$  для сталей высокой прочности ( $\sigma_{0,2} > 800$  МПа) и с резким падением  $\psi$  в классе конструкционных сталей ( $\sigma_{0,2} > 1400...1600$  МПа) (рис. 3) [5, 6].

Из рис. 3 следует, что с повышением прочности стали склонность к ее охрупчиванию неуклонно нарастает: изломостойкость падает, при этом конкретный показатель пластичности стали  $\psi_k$  может вести себя по-разному, хотя максимально-возможное значение  $\psi_k^{max}$  непременно падает.

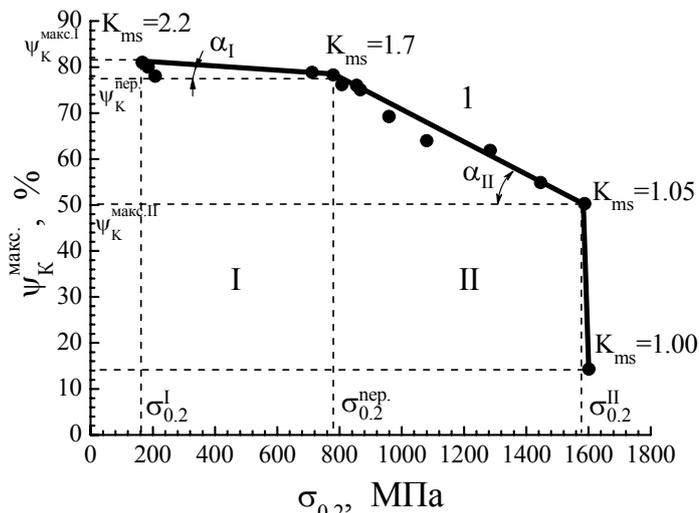


Рис. 3. Диаграмма связи свойств прочности ( $\sigma_{0,2}$ ), пластичности ( $\psi_K^{\max}$ ) и изломостойкости ( $K_{ms}$ ) конструкционных сталей

Столь неоднозначное поведение характеристики  $\psi_K$  означает, что это свойство – пластичность – само по себе не является определяющим для контроля над хрупкостью стали, но лишь в сочетании с прочностью обретает реальную значимость для оценки качества стали, поскольку совместно они ( $\sigma_{0,2}$  и  $\psi$ ) определяют конкретный уровень изломостойкости, т.е. сопротивления хрупкости.

### ВЫВОДЫ

1. Хрупкость стали (склонность к ломкости) контролируется не ее свойством пластичности ( $\psi$ ), а текущим значением прочности ( $\sigma_{0,2}$ ) в сочетании

с уровнем хрупкой прочности  $R_{MC}$ , т.е. показателем механической стабильности.

2. При выборе технологических процессов упрочнения сталей следует руководствоваться в первую очередь стремлением получить наибольшее значение критического напряжения хрупкого разрушения  $R_{MC}$  при заданной прочности  $\sigma_{0,2}$ , что позволит достичь максимально возможного уровня  $K_{ms}$  и соответственно обеспечит оптимальное значение пластичности  $\psi$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Я. Мешков, Г.А. Пахаренко. Структура металла и хрупкость стальных изделий. Киев: «Наукова думка», 1985, 266 с.
2. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков. Концепция механической стабильности конструкционных сталей // Проблемы прочности. 2009, № 2, с. 55-78.
3. С.А. Котречко. Критическое напряжение скола и «хрупкая» прочность поликристаллических металлов // Металлофизика. 1992. т. 14, № 5, с. 37-41.
4. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян, Н.Н. Стеценко. Новые подходы к оценке взаимосвязи свойств прочности, пластичности и механической стабильности // Металлофизика и новейшие технологии. (В печати).
5. А.В. Шиян. Физическое обоснование критерия классификации конструкционных сталей по прочности // Металлофизика и новейшие технологии. (В печати).
6. Н.М. Стеценко. Спосіб класифікації конструкційних сталей по міцності. Заявка на винахід № 201015576 від 23.12.2010.

Статья поступила в редакцию 24.03.2011 г.

## РОЛЬ МІЦНОСТІ І ПЛАСТИЧНОСТІ В КРИХКОСТІ МЕТАЛІВ

С.О. Котречко, Ю.Я. Мешков

На основі аналізу зв'язку стандартних механічних характеристик міцності та пластичності для широкого кола конструкційних сталей запропонована кількісна міра здатності сталі чинити опір переходу із пластичного стану в крихкий. Показано, що крихкість сталі характеризується не величиною залишкової деформації, а співвідношенням між рівнем крихкої міцності  $R_{MC}$  і величиною границі текучості із врахуванням схильності металу до деформаційного зміцнення. Обґрунтована можливість оптимізації комплексу властивостей міцності і пластичності з метою досягнення найкращого показника опору крихкості сталі.

## ROLE OF STRENGTH AND PLATICITY IN METAL BRITTLENESS

S.A. Kotrechko, Yu.Ya. Meshkov

It is proposed the quantitative measure of steel ability to resist a transition from ductile to brittle state based on an analysis both of the strength and ductility characteristics for a wide range of structural steels. It has been shown that the brittleness of steel is determined not the value of a residual strain, but the relation between the level of brittle strength  $R_{MC}$  and yield strength value, taking into account work hardening exponent. A possibility of optimizing the set of properties of strength and plasticity to achieve the best indicator of steel resistance to brittle fracture has been substantiated.