УДК 538.951

ХРУПКОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Ю.Я. Мешков

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

1. Постановка задачи

Хрупкость не является типичным свойством металлов, т.к. в силу природы металлической межатомной связи кристаллическая решетка металлов обладает известным дислокационным механизмом пластичности [1-4]. Однако, в определенных механических условиях и при низких температурах железо и его сплавы [4, 5] особенно высокопрочные стали, могут проявлять ярко выраженные признаки хрупкого поведения, а именно ломкость при разрушении. Свойство ломкости технологически вполне полезное при дроблении и размалывании хрупких пород, совершенно неприемлемо для металлоизделий и конструкций. Физическая суть излома (ломкости) состоит в быстром, практически мгновенном, сбросе накопленной при нагружении упругой энергии по механизму Гриффитса вследствие потери энергетической стабильности микро- и субмикротрещин, имеющихся в хрупком стекле [6] и зарождающихся в квазихрупком металле в процессе их пластической текучести или даже микротекучести [5]. Принципиальным отличием процесса излома в стекле и металле является то, что в металле фазе излома при разрушении неизбежно предшествует фаза пластического деформирования и зарождения субмикротрещин, благодаря чему излом наступает не в условиях чисто упругого деформирования, как в стекле, а на некотором удалении от момента начала текучести $\sigma_{0,2}$ (условный предел текучести металла). Именно это «пластическое» удаление напряжения излома (предельной прочности $S_{пр.}$) от $\sigma_{0,2}$ формирует определенную меру нехрупкости или «квазихрупкости» металла. Эта мера нехрупкости есть ни что иное, как мера сопротивления возникновению излома при разрушении металла – изломостойкости. Изломостойкость – свойство, которое принципиально отличает механическое поведение квазихрупкого металла от идеально хрупкого скола. При достаточно большой изломостойкости металл теряет способность крошиться и приобретает способность поддаваться ковке, прокатке и т.д., т.е. становится вполне пластичным. Поэтому возникает потребность ввести некоторую меру свойства изломостойкости.

2. Изломостойкость, как мера сопротивления хрупкости

Введем для обозначения этого нового механического свойства металла символ B_r (break resistance, англ.). Очевидной мерой изломостойкости при растяжении может служить характеристика пластичности при разрыве образца $\psi_к$. Но практическая польза от этой характеристики невелика, во-первых, потому, что величина $\psi_к$ отражает изломостойкость лишь в условиях одного вида напряженно-деформированного состояния (НДС) – одноосного растяжения и непригодна для оценки этого свойства в сложных условиях НДС. Во-

первых, даже при простом растяжении величина $\psi_к$ не всегда однозначно отражает удаленность стали от фазы излома, т.к. при снижении температуры испытания пластичность ψ вместе с предельной прочностью $S_{пр.}$ может испытывать резкий скачек при температуре хрупко-пластического перехода T_c (рис. 1) [5]. Ясно, что в окрестности температуры перехода T_c, деформационный показатель $B_{re} = \psi$ полностью теряет свою информативность. Однако, возможен иной, силовой подход к измерению величины потенциального сопротивления металла переходу к гриффитсовской фазе излома при разрушении. Этот подход основан на концепции механической стабильности металлов [7], в соответствии с которой деформируемый металл находится в состоянии устойчивой (стабильной) пластичности, если имеется некий силовой интервал между текущим напряжением пластического деформирования σ_e и предельным напряжением разрушения (излома) $S_{пр.}$ (e) для данной деформации e:

$$\Delta\sigma = S_{пр.}(e) - \sigma_e \qquad (1)$$

При $\Delta\sigma \to 0$ механическая стабильность исчерпывается и наступает либо излом (хрупкая стадия разрушения по Гриффитсу), либо при достаточно больших деформациях e – чисто пластическое разрушение без признаков излома.

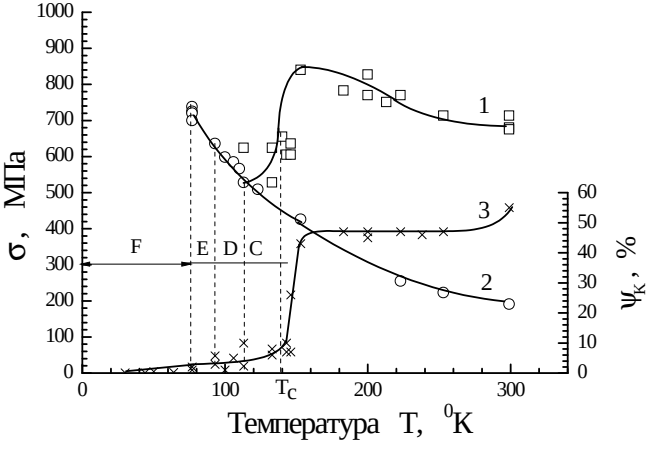

Рис. 1. Температурные зависимости характеристик прочности и пластичности для малоуглеродистой стали [5]: 1 – предельная прочность $S_{пр.}$ (напря-

жение разрушения); 2 – предел текучести $\sigma_{0,2}$; 3 – пластичность $\psi_к$. T_c - температура хрупко-пластического перехода при растяжении.

Но возможность реализации пластического исхода для любого металла или сплава зависит от того, с каким запасом $\Delta\sigma$ деформируемый металл проходит наиболее узкий, критический интервал малых пластических деформаций ($e_c \approx 2\%$), где напряжение разрушения $S_{пр.}(e_c) = R_{MC}$ имеет минимальное значение хрупкой прочности R_{MC} [8] (рис. 2):

$$\Delta\sigma_{\min} = R_{MC} - \sigma_2 \qquad (2)$$

где σ_2 - прочность при критической деформации $e_c = 2\%$.

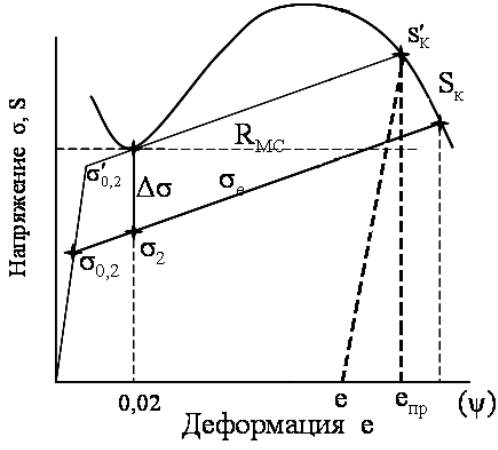

Рис. 2. Зависимость напряжения разрушения $S_к$ от деформации e [7] (схема). R_{MC} - наименьшее значение «хрупкой» прочности; σ_2 - прочность при критической деформации $e_c = 0,02$.

В работе [7] силовой интервал минимальной механической стабильности металла при критической деформации $e_c \approx 2\%$ назван коэффициентом механической стабильности K_{ms}:

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

Поскольку K_{ms} отражает в силовых показателях свойств R_{MC} и σ_2 свойство сопротивления хрупкому состоянию материала, которое условно наступает, если $\sigma_2 = R_{MC}$, то отношение (3) естественным образом отражает силовое измерение свойства изломостойкости B_r:

$$B_{r\sigma} = K_{ms} \qquad (4)$$

Таким образом, в качестве универсальной (т.е. пригодной для любого вида НДС) меры сопротивления металла или сплава хрупкому излому может использоваться безразмерный показатель силовой изломостойкости, равный показателю механической стабильности K_{ms} для условий одноосного растяжения или изгиба (в крайнем волокне), а в случае сложного НДС $B_{r\sigma} = P_{ms}$, где

$$P_{ms} = \frac{K_{ms}}{q_\sigma}, \qquad (5)$$

q_σ - фактор упругого перенапряжения, создаваемого в зонах сложного НДС, например, у надрезов, трещин и иных макроконцентраторов [7], P_{ms} - параметр механической стабильности металла, находящегося под действием сложных условий НДС в элементе конструкции. Таким образом, физическая суть механического свойства, называемого изломостойкостью, заключается в проявлении определенного эффекта пластичности предшествующего развитию критической фазы гриффитсовского сброса накопленной упругой энергии тела (B_{re}), что означает, что металл обладает соответствующей мерой защищенности от признаков хрупкого состояния в виде ломкости при разрушении. Но количественное измерение этого свойства в целях инженерного применения новой механической характеристики в общем случае целесообразно осуществлять в силовых показателях механической стабильности металла в данных условиях нагружения - $B_{r\sigma} = K_{ms}$ (для одноосного растяжения или изгиба) и $B_{r\sigma} = P_{ms}$ (для случая сложного НДС).

Необходимо отметить, что пластическая устойчивость против излома B_{re} обязательно сочетается с определенной силовой устойчивостью $B_{r\sigma}$ и наоборот, но важно понимать, что определяющим фактором в отмеченном соотношении двух показателей служит именно силовой показатель изломостойкости $B_{r\sigma}$, а пластический B_{re} является следствием наличия силового, ибо только наличие резерва упругого перенапряжения $\Delta\sigma > 0$ по (2) дает возможность реализоваться закритической деформации $e > e_c = 2\%$.

3. Хрупкость и нехрупкость, как показатели качества металла

Таким образом, применительно к металлам и сплавам понятие «хрупкости», как не имеющее строгого физического обоснования, может употребляться как условный термин, в сугубо техническом смысле для обозначения склонности материала к проявлению внешнего признака хрупкого поведения при разрушении – ломкости при изгибе и дроблению при ударе. Подобный характер поведения металла при разрушении означает его малую изломостойкость при нагружении или техническую (не физическую!) хрупкость. Именно малый показатель изломостойкости $B_{r\sigma}$ сталей либо в силу их плохого каче-

ства ($K_{ms} \approx 1$), либо под воздействием жесткого НДС от трещиноподобного дефекта ($P_{ms} \approx 1$) служит непосредственной причиной хрупкого поведения металла при разрушении изделия или сооружения.

Роль величины показателей K_{ms} и P_{ms} для характеристики такого механического свойства стали как изломостойкость, сопротивление охрупчиванию, вызываемого воздействием факторов температуры (хладноломкость), повышения прочности в результате старения или радиационного облучения, стеснения пластичности в зонах жесткого НДС и т.п., вполне очевидна и прямо вытекает из их определения по формулам (3) и (5). Так, например, при одинаковой прочности сталь с показателем K_{ms} =1,5 лучше, чем с 1,3, поскольку позволяет выдержать без угрозы ее охрупчивания бóльшую степень перенапряжения у концентратора (q_σ) в формуле (5), чем вторая сталь, т.е. у первой больше механической стабильности и, следовательно, изломостойкости. Сложнее сопоставлять между собой конкретные стали с разной стабильностью K_{ms} при разных уровнях прочности, однако, вполне очевидно, что всегда предпочтительнее иметь по возможности бóльшие значения показателей K_{ms} и $B_{r\sigma}$. Вообще, задача оптимального сочетания комплекса прочностных и пластических свойств в материаловедении представляет особую проблему, и с привлечением характеристик стабильности K_{ms} ее решение обретает новые очертания. Известно, например, что с увеличением прочности сталей ($\sigma_{0,2}$ - предел текучести) пластичность ψ обнаруживает склонность к снижению, но лишь как общую тенденцию (рис. 3) [9]. Но если в поле значений ψ на рис. 3 выделить те показатели ψ , которые отвечают одинаковому значению сопротивления хрупкости K_{ms} , то в хаотическом поле величин ψ обнаруживаются вполне четкие закономерности с явными максимумами пластичности $\psi_{\max}$ для каждой изолинии $K_{ms} = const$ (рис. 4) [10]. Как видим, одно и то же сопротивление хрупкости не связано однозначно с пластичностью стали ψ , но максимальное значение $\psi_{\max}$ для каждого уровня K_{ms} соответствует своему значению прочности $\sigma_{0,2}$. Обобщенное представление всего комплекса трех характеристик механических свойств $\sigma_{0,2}$, K_{ms} и $\psi_{\max}$ для широкого ансамбля конструкционных сталей по данным работы [10] (рис. 5) может служить в качестве примера, иллюстрирующего принцип подхода к задаче оптимизации комплекса важнейших механических характеристик стали, когда значения прочности $\sigma_{0,2}$ сочетаются с максимально возможными для такой прочности значениями пластичности $\psi_{\max}$ при фиксированном значении стабильности K_{ms} . В результате получаем гармоническое сочетание показателей механических свойств сплава в трех сферах их проявления – в области прочности, пластичности и хрупкости.

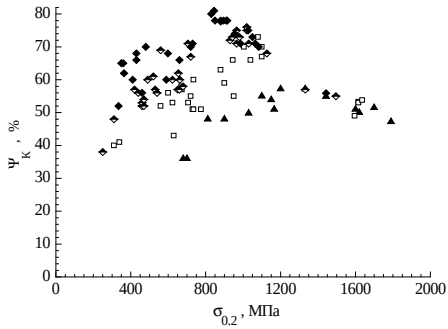

Рис. 3. Зависимость пластичности конструкционных сталей $\psi_к$ от прочности $\sigma_{0,2}$ (по данным [9]).

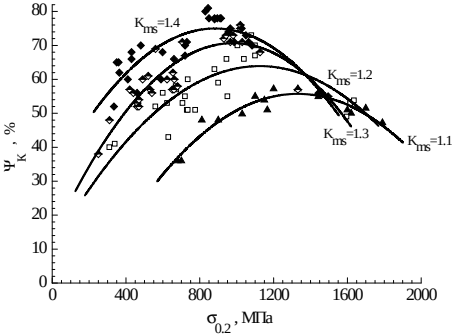

Рис. 4. То же, что на рис. 3 для фиксированных значений механической стабильности $K_{ms} = const$.

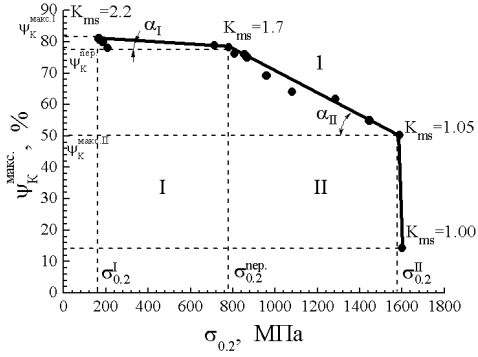

Рис. 5. Оптимизация свойств прочности $\sigma_{0,2}$, пластичности $\psi_к^{\max}$ и стабильности K_{ms} .

4. Заключение

Хрупкость, как специфическая форма механического поведения при разрушении твердого тела, не является типичной для металлов и их сплавов в силу присущей им пластичности. Но определенная склонность к проявлению признаков хрупкого поведения (ломкость) для квазихрупких металлов вполне возможна и в качестве меры удаленности от состояния хрупкости – может быть использован коэффициент механической стабильности K_{ms}.

Введение в рассмотрение комплекса механических свойств конструкционных металлов и сплавов новой характеристики K_{ms} не только позволяет количественно оценивать меру сопротивления хрупкости, но и осуществлять более полноценную ранжировку ряда сплавов по признакам свойства механической стабильности, а также конкретизировать задачу оптимизации комплекса основных механических свойств – прочности, пластичности и защищенности от хрупкости. Последняя часть задачи может представлять не только общенаучный интерес для современного материаловедения, но и определенную практическую полезность.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А.Х. Коттрелл. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. Металлургиздат, М.: 1958.
2. А.Х. Коттрелл. Теоретические аспекты процесса разрушения. Сб. «Атомный механизм разрушения», Металлургиздат, М.: 1963, с. 30-58.
3. Ж. Фридель. Дислокации. Из-во «Мир», М.: 1967, 643 с.
4. В.И. Трефилов. Пластическая деформация и разрушение металлов. Физические основы прочности и пластичности металлов. Металлургиздат, М.: 1963, с. 190-254.
5. Дж. Т. Хан, Б.Л. Авербах, В.С. Оуэн, М. Коэн. Возникновение микротрещин скола с поликристаллическом железе и стали. Сб. «Атомный механизм разрушения», Металлургиздат, М.: 1963, с. 109-134.
6. A.A. Griffith. // Phil. Trans. Roy. Soc. A. – 1920, -221, p. 163.
7. С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков. Концепция механической стабильности конструкционных сталей // Проблемы прочности, 2009. № 2, с. 55-78.
8. Ю.Я. Мешков, Г.А. Пахаренко. Структура металла и хрупкость стальных изделий. – Киев: Наук. Думка, 1985, - 268 с.
9. А.А. Шмыков. Справочник термиста. Москва: Машгиз, 1961. – 392 с.
10. Н.М. Стеценко. Спосіб класифікації конструкційних сталей по міцності заявки на винахід № 201015576 від 23.12.2010.