

**ПРОБЛЕМА ХРУПКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ
(обзор)**

Ю. Я. Мешков, чл.-корр. НАНУ, д.т.н., проф.

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины

1. Вступление

Проблема хрупкого разрушения металлоконструкций, несмотря на очевидную многофакторность этого явления [1], все же, в первую очередь, связана с определенным дефицитом одного из фундаментальных механических свойств металла – его пластичности, призванной «гасить» чрезмерные локальные перенапряжения, возникающие вследствие формирования условий неоднородных напряженно-деформированных состояний (НДС) в сложно нагружаемых элементах конструкций, а также вблизи разного рода концентраторов напряжений (КН) либо трещиноподобных дефектов [2]. Наглядным примером опасной роли неоднородности НДС может служить изгиб толстой балки из малопластичного материала. Исчерпание ресурса пластичности металла здесь легко прогнозируется элементарным решением задачи сопротивления материалов с учетом диаграммы растяжения образца. Однако в условиях сложного НДС, особенно вблизи КН или у острия трещин задача оценки степени потери пластичности, или охрупчивания металла, оказывается намного сложнее. Тем не менее, определенные перспективы в этом направлении могут появиться, если оценку охрупчивания проводить не на привычном языке показателей пластичности, а на основе концепции механической стабильности [3, 4], в которой измерению подлежат достаточно доступные характеристики прочности металла.

Ниже излагаются основные идеи, которые могут быть использованы в анализе проблемы потери пластичности, т.е. охрупчивания металла в конкретном случае действия такого охрупчивающего фактора, каким являются, например, КН в виде надразов или трещин в образцах металла.

2. Пластичность как форма проявления механической стабильности

Прочность и пластичность, без сомнения, представляются главными механическими свойствами того класса твердых тел, к которым относятся металлы и металлические сплавы, и нет необходимости выделять, какие из них важнее, ибо для конструкционного применения они нужны только вместе. В этом смысле такой металл, как железо и сплавы на его основе (стали) не случайно по сей день являются наиболее востребованными конструкционными материалами. Это обусловлено тем, что в силу особой природы металлической связи и кристаллического характера атомной структуры, только металлы обладают той уникальной возможностью, когда твердое тело (ТТ) под действием

сил может перейти в *пластическое* состояние, *сохраняя* при этом состояние *упругости*, т.е. не теряет свою несущую силовую функцию. Но именно такое положение вещей означает ни что иное, как механическую стабильность нагруженного ТТ, когда проявление пластичности не исключает сохранения прочности, а наоборот, обеспечивает устойчивость сопротивления действию приложенных сил. Наглядной противоположностью этому служит поведение аморфных ТТ (например, стекла), у которых проявление пластичности неизбежно сочетается с потерей прочности (твердости).

Таким образом, свойство механической стабильности, как уникальная способность материала проявлять упруго-пластическую форму поведения под действием нагрузки, можно рассматривать в качестве важнейшего механического свойства металлических материалов, имеющего не менее фундаментальное значение, чем привычные свойства прочности и пластичности. Более того, можно прийти к выводу, что пластичность, как свойство металлов, вообще является лишь частной формой проявления более общего свойства – *механической стабильности*. Иными словами, у металлических материалов достаточно обозначить лишь два основных, базовых механических свойства – прочность и механическую стабильность. Третье важнейшее свойство – пластичность – есть следствие первых двух.

3. Потеря стабильности – причина охрупчивания металлов

Поскольку механическая стабильность есть сочетание свойств прочности и стабильности, то охрупчивание металлов, означающее определенную потерю части пластичности (по тем или иным причинам), логично рассматривать как следствие потери определенной части механической стабильности. Практически это можно выразить в количественной форме, если использовать соответствующие параметры концепции механической стабильности (K_{ms} , K_{msc} и P_{ms}), разработанные и изложенные в имеющейся литературе [3, 4]:

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

K_{ms} – коэффициент механической стабильности;

R_{MC} – хрупкая прочность (сопротивление микросколу) – напряжение разрушения образца при предельной деформации $e_c \approx 2\%$;

σ_2 – текущая прочность металла на этапе деформации, равной критической $e_c \approx 2\%$.

$$K_{msc} = R_{MC}/\sigma_{2C}, \quad (2)$$

K_{msc} – критический коэффициент механической стабильности, потерянной в результате действия фактора охрупчивания (например, КН);

σ_{2C} – хрупкая прочность образца, находящегося под действием фактора охрупчивания (КН) при критической температуре хрупко-вязкого перехода T_c . Здесь K_{msc} имеет смысл коэффициента охрупчивания, который по сути отража-

ет склонность металла к охрупчиванию, как специфическому свойству конструкционного металла.

$$P_{ms} = K_{ms} / K_{msc} = \sigma_{2c} / \sigma_2, \quad (3)$$

P_{ms} – параметр остаточной механической стабильности, т.е. той ее части, которая остается в образце при воздействии фактора охрупчивания (КН). По своему смыслу – это показатель *резерва* механической стабильности, который может быть использован на «погашение» возможных дополнительных факторов охрупчивания (например, низкой температуры или динамики нагружения).

В свете вышесказанного, параметр K_{msc} выступает в данной концепции как конкретная величина, представляющая количественную меру эффекта охрупчивания металла (например, в условиях действия КН), т.е. служит показателем его подверженности охрупчиванию данным КН или показателем его свойства *охрупчиваемости*. Введение этого показателя в рассмотрение может послужить полезным инструментом для анализа проблемы охрупчивания металлоконструкций.

С другой стороны, каждый показатель механической стабильности может рассматриваться как мера сопротивления возможности проявления нежелательной хрупкости металла в данных условиях испытания. Сопротивление охрупчиванию можно трактовать как свойство сопротивляться ломкости изделия или как свойство его *изломостойкости*. Таким образом, свойство изломостойкости может быть количественно измерено величиной соответствующих показателей механической стабильности K_{ms} и P_{ms} .

4. Механическая стабильность, как защита металла от охрупчивания концентраторами напряжений

Из вышеприведенного следует, что в общей проблеме катастрофических разрушений изделий, в сущности, речь должна идти не о хрупкости самих конструкционных сплавов, а в явлении охрупчивания, т.е. потери пластического состояния в результате проявления определенных факторов охрупчивания. Среди множества таких факторов (температура, динамика и пр.) наиболее распространенными являются разного рода КН, включая макроскопические трещины или трещиноподобные дефекты. Удобной моделью КН являются надрезы на образцах, которые часто используют для экспериментального выявления хрупкости в сталях. В данном случае, на примере испытаний образцов с надрезом, мы попытаемся продемонстрировать эффективность применения концепции механической стабильности для анализа и количественной оценки свойства охрупчиваемости K_{msc} и остаточной стабильности P_{ms} , как резерва изломостойкости типичных КС.

Методика экспериментального определения параметра K_{msc} не представляет трудностей, если исходить из любой стандартной процедуры определения критической температуры вязко-хрупкого перехода T_c с дополнительным определением базовой характеристики хрупкой прочности R_x (при температу-

ре T_{B-X}), а также фиксации на температурной зависимости $\sigma_2(T)$ показателя хрупкой прочности σ_{2C} металла с КН при температуре T_c (рис. 1).

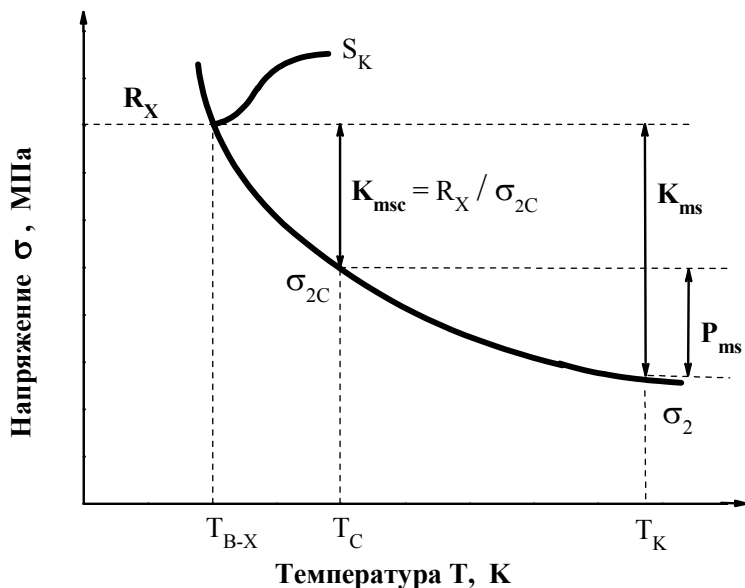


Рис. 1. Схема определения механических характеристик в концепции сопротивляемости металла хрупкости: S_K — истинное напряжение разрушения гладкого образца в условиях одноосного растяжения

В работе [5] был исследован достаточно большой для корректной статистической обработки набор КС. В качестве объектов анализа авторы [5] выбрали КС, относящиеся к различным классам по структуре, качеству, составу и назначению. Характеристики прочности исследуемых сплавов при комнатной температуре испытаний (293 К) изменялись в пределах от $\sigma_{0,2} = 194$ МПа до $\sigma_{0,2} = 934$ МПа, а характеристики пластичности (по показателю относительного сужения после разрушения образца) — от $\psi_K = 30,9$ % до $\psi_K = 85,5$ %. При этом проводили испытания на одноосное растяжение образцов с кольцевым КН (радиус $r = 0,25$ мм.; угол раскрытия $w = 45^\circ$) определяли критические температуры хрупкости T_c по условию общей текучести [5]. Кроме того, проводили испытания гладких цилиндрических образцов при комнатной температуре испытаний (293 К) и температуре T_c с целью определения базовых механических характеристик КС: условного предела текучести $\sigma_{0,2}$; предела прочности σ_B и относительного сужения после разрушения образца ψ_K .

В работе [6] была проведена обработка данных, полученных в [5], с использованием методики [7], что позволило определить характеристики хрупкой прочности R_X для исследованных КС, а также характеристики механиче-

ской стабильности при комнатной температуре 293 К (K_{ms}) и при температуре T_c (K_{msc}). В табл. 1 представлены результаты определения базовых механических характеристик при температурах испытаний 293 К и T_c , а также характеристики R_x для некоторых наиболее типичных КС, исследованных в [5].

Таблица 1

Базовые механические характеристики $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K и R_x при температуре испытаний $T_{исп.} = 293$ К, температура T_c

Обозначение в [5]	Сплав	Структурное состояние	T_c , К [5]	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ_K , %	R_x , МПа
A	Fe	феррит	173	194	309	79,3	775
C	FeMn	феррит	98	317	481	74,1	949
O		феррит-перлит	103	245	467	68,5	1082
p		феррит-перлит	98	275	463	76,6	1099
E		феррит	78	331	492	75,2	1056
G	CrMoV	отп. бейнит	163	502	681	65,8	1383
H		отп. март.-бейнит	78	495	663	75,7	1446
D		бейнит-март.	93	708	843	68,3	1606
Y	15Ch2NMFAA	отп. март.-бейнит	208	842	928	48,9	1545
X		отп. март.-бейнит	93	607	708	77,4	1452
R	45Mn	перлит	163	565	894	57,1	1638
P	Lo17CrNiMo	бейнит	168	915	1306	49,9	1920
J	10Ch2MFA	отп. март.-бейнит	103	491	606	78,8	1327
I	CrNi	отп. бейнит	68	542	649	78,4	1351
T		отп. бейнит	68	396	628	66,1	1264
M	20CrNiMoV	отп. март.-бейнит	103	676	801	56,7	1373
V		отп. март.-бейнит	108	678	796	63,5	1463
K	42CrMo4	бейнит	108	524	747	67,9	1550
B	Lo8CrNiMo	бейнит	148	839	1038	51,7	1813
a	St. TRIP	отп. бейнит	138	430	545	85,5	1329

Результаты расчетного определения параметра охрупчиваемости $K_{msc}^{расч.}$ (по методике, изложенной в [6]) и оценки точности расчета представлены в таблице 2 для ряда исследуемых КС. В таблице приведены значения параметра P_{ms} , характеризующего остаточный резерв изломостойкости металла, находящегося под действием КН.

Характеристика $K_{msc} = R_x/\sigma_{2C}$ представляет особый интерес для материаловедов, занятых разработкой новых сплавов или новых технологических приемов обработки, поскольку K_{msc} напрямую представляет особое механическое свойство металла – степень его подверженности охрупчиванию в данных

Строительство, материаловедение, машиностроение

конкретных условиях НДС, т.е. охрупчиваемость металла под воздействием определенного КН.

Таблица 2

Результаты определения характеристики механической стабильности K_{ms} при $T_{исп.} = 293\text{ К}$, параметра охрупчиваемости $K_{msc}^{расч.}$ и остаточной механической стабильности P_{ms} от воздействия КН, а также погрешности определения расчетного значения $K_{msc}^{расч.}$ относительно экспериментального $K_{msc}^{эксп.}$

Обозначение в [5]	Гладкий образец $T_{исп.} = 293\text{ К}$	$T_{исп.} = T_c$			
	K_{ms} , (1)	$K_{msc}^{эксп.}$	$K_{msc}^{расч.}$	δ , %	P_{ms} , (3)
А	2,831	1,736	1,715	-1,2	1,629
С	2,173	1,318	1,312	-0,5	1,650
О	2,840	1,415	1,439	-1,7	2,005
р	2,746	1,598	1,622	1,5	1,718
Е	2,344	1,200	1,209	0,8	1,954
G	2,131	1,723	1,731	0,5	1,237
Н	2,283	1,297	1,298	0,0	1,761
D	1,911	1,375	1,410	2,5	1,390
У	1,636	1,509	1,548	2,6	1,084
X	2,051	1,393	1,419	1,9	1,472
R	2,055	1,646	1,607	-2,3	1,0
P	2,746	1,598	1,622	1,5	1,098
J	2,229	1,396	1,357	-2,8	1,596
I	2,098	1,290	1,336	3,6	1,626
T	2,258	1,249	1,249	0,0	1,808
M	1,713	1,254	1,241	-1,0	1,367
V	1,834	1,343	1,329	-1,1	1,367
K	2,222	1,458	1,451	-0,5	1,524
B	1,771	1,516	1,507	-0,6	1,0
a	2,513	1,798	1,767	-1,7	1,397

Приведенные в таблице 2 значения параметров $K_{msc}(T_c)$ позволяют проследить за общими закономерностями изменения показателя свойства охрупчиваемости для использованного КН на представленном в [5] наборе КС.

Можно отметить, что относительная погрешность расчетного определения параметра охрупчиваемости K_{msc} не превышает 4%, следовательно, расчетный метод определения $K_{msc}^{расч.}$ может быть применен на практике без обязательных испытаний образцов с КН. Отчетливо видно, что охрупчиваемость, как свойство потери стабильности для разных сталей сильно различаются, т.е. K_{msc} нельзя считать константой для данного вида КН. Охрупчиваемость каждой стали есть ее индивидуальное свойство и требует специального определения в каждом отдельном случае.

Все же конечной целью является не оценка самого эффекта охрупчивания, а его *результата* в виде остаточного параметра стабильности P_{ms} , изломостойкости, которой обладает некий элемент конструкции с определенным КН, т.к. в P_{ms} содержится информация о фактическом ресурсе изломостойкости изделия, отделяющем его от риска хрупкого разрушения.

Из табл. 2 видно, что в наборе КС из работы [5] у различных сплавов остаточная изломостойкость P_{ms} после воздействия одного и того же КН изменяется в интервале от 1 до 2, что проявляется в вариации температуры хрупкости T_c этих сталей в интервале от 68 К до 208 К (см. табл. 1).

Но в этом, кажущемся хаотическим разбросе показателей T_c и P_{ms} , на самом деле существует однозначная взаимосвязь, обусловленная очевидным соотношением, представленном в работе [8]:

$$T_c = T_k - (\sigma_2/\beta) \cdot (P_{ms} - 1), \quad (4)$$

где: β - средний коэффициент температурного изменения прочности стали в интервале температур $\Delta T = T_k - T_c$; $T_k = 293$ К.

Но полезная роль параметра P_{ms} не ограничивается тем, что он непосредственно влияет на такой важный показатель свойств КС, как температура хрупкости T_c , поскольку в нем содержится весь остаточный ресурс изломостойкости, оказывающий сопротивление охрупчивающему воздействию всех иных (кроме КН) факторов охрупчивания – низких температур, динамического нагружения, радиационного охрупчивания и т.п. Запас изломостойкости будет полностью исчерпан, когда параметр P_{ms} за счет увеличения прочности $\sigma_2 = \sigma_{2c}$ станет равным 1, что означает немедленную ломкость элемента конструкции с КН, как только номинальное напряжение нагружения σ достигнет уровня σ_2 . Это и есть та ситуация, которую без достаточных оснований называют «хрупким разрушением» изделия, независимо от того, какой фактически был вид излома стали по его фрактографическим признакам.

Защита от ломкости элемента конструкции, содержащего определенный КН, заключается в обеспечении надлежащего уровня K_{ms} стали, который в сочетании с ожидаемым (расчетным) для данного КН значением параметра охрупчивания K_{msc} формирует остаточную стабильность на уровне $P_{ms} > 1$. Чем больше параметр изломостойкости P_{ms} , тем сильнее изделие защищено от ломкости. В частности, это выражается в том, что пропорционально величине P_{ms} будет снижаться температура хрупкости T_c согласно (4).

В сущности, проблема снижения риска хрупких разрушений изделий техники, металлоконструкций и сооружений, помимо адекватного инженерного расчета конструкции на прочность традиционными методами должна быть дополнена обоснованным выбором материала, удовлетворяющего не только требованиям прочности конструкции, но и обладающим надлежащим уровнем изломостойкости, рассчитанным на противодействие всем ожидаемым факторам охрупчивания. В результате, при условии $P_{ms} > 1$, риск возникновения состояния ломкости изделия отсутствует.

Таким образом, решение проблемы надежности изделий и конструкций основной своей тяжестью ложится на грамотный выбор механических свойств материала в контексте оптимального сочетания показателей прочности и механической стабильности.

5. Заключение

В представленном обзоре мы попытались обосновать мысль о том, что многочисленные катастрофические разрушения изделий и сооружений в истории техники, которые принято связывать с хрупкостью металла, на самом деле следует считать проявлением эффекта охрупчивания, т.е. потери запаса пластичности металла в условиях эксплуатации в результате действия известных факторов охрупчивания. В техническом плане причина столь резонансного проявления проблемы охрупчивания заключалась в отсутствии на то время методов и способов рационального учета как факторов охрупчивания, так и свойств металла, обеспечивающих его сопротивление охрупчиванию.

Развитые за последнее время представления о свойствах механической стабильности, охрупчиваемости и изломостойкости металлов и сплавов создают определенные предпосылки к рациональному выбору материала для изделия с предусмотренным запасом изломостойкости, блокирующим опасность проявления ломкости изделия в данных условиях эксплуатации.

Инженерное освоение предлагаемых подходов может вселять определенные надежды на то, что в обозримом будущем риск возникновения непредусмотренных разрушений металлоконструкций будет постепенно снижаться.

Список использованных источников:

1. Мак-Ивли А. Дж. Анализ аварийных разрушений. М. Техносфера, 2010. – 416 с.
2. Бирюлев В.В., Кошин И.И., Крылов И.И., Сильвестров А.В. Проектирование металлических конструкций. – Л.: Стройиздат, 1990. – 432 с.
3. Котречко С. А., Мешков Ю. Я. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции. Киев : Наукова Думка, 2008. – 295 с.
4. 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.
5. Smida T., Babjak J., Dlouhy I. Prediction of fracture toughness temperature dependence from tensile test parameters // Kovove Mater. – 2010, 48. – P. 1 – 8.
6. Шиян А.В., Сорока Е.Ф., Носенко О.П. Методические основы определения критической температуры хрупкости сталей в условиях концентрации напряжений // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. - Дн-вск., ПГАСА, 2014. - С.
7. Шиян А. В. Определение характеристик хрупкой прочности и механической стабильности конструкционных сталей // МТОМ. – 2012, № 3-4, – С. 29–56.
8. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В. Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей // Проблемы прочности. – 2010, № 1. – С. 112 – 119.