

УДК 669.01:539.4;539.2

Ю.Я. МЕШКОВ, член-корр. НАН Украины, д-р техн. наук
главный научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения¹
E-mail: meshkov100@gmail.com

А.В. ШИЯН, канд. физ.-мат. наук
старший научный сотрудник отдела физики прочности и разрушения¹
E-mail: shyian_av@ukr.net
¹Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев, Украина

Статья поступила 19.02.2015.

ПРОБЛЕМА ХРУПКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

Известные в современной истории техники случаи катастрофических разрушений металлоконструкций и стальных изделий рассматриваются как результат потери особого свойства металла — его механической стабильности под действием определенных факторов охрупчивания, например, концентраторов напряжений. На примере анализа экспериментальных данных демонстрируется возможность регулирования степени охрупчивания металла в условиях концентрации напряжений с целью снижения риска хрупких разрушений стальных изделий.

Ключевые слова: хрупкая прочность, концентраторы напряжений, механическая стабильность, охрупчиваемость, кривая оптимизации

Введение. 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), в том числе трещин [2]. Наглядным примером опасной роли неоднородности НДС может служить изгиб толстой балки из малопластичного материала. Истощение 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.

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 упруго-пластическое состояние, 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.

Потеря стабильности — причина охрупчивания металлов. Поскольку механическая стабильность есть сочетание свойств прочности и пластичности, то охрупчивание металлов, означающее потерю определенной части пластичности, можно 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]:

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

где K_{ms} — коэффициент механической стабильности; R_x — хрупкая прочность (для конструкционных сталей (КС) — сопротивление микросколу R_{MC}), напряжение разрушения образца при предельной деформации $e_c \approx 2\%$; σ_2 — текущая прочность металла на этапе деформации, равной критической $e_c \approx 2\%$

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

где K_{msc} — критический коэффициент механической стабильности, потерянный в результате действия фактора охрупчивания (например, КН); σ_{2C} — хрупкая прочность образца, находящегося под действием фактора охрупчивания (КН) при критической температуре вязко-хрупкого перехода T_c . Здесь K_{msc} имеет смысл коэффициента охрупчивания, который, по сути, отражает склонность металла к охрупчиванию, как специфическому свойству конструкционного металла

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

где 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.

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. Удобной моделью КН являются надрезы на образцах, которые часто используют для экспериментального выявления хрупкости в сталях. В данном случае, на примере испытаний образцов с КН, мы попытаемся продемонстрировать эффективность применения концепции механической стабильности для анализа и количественной оценки свойства охрупчиваемости K_{msc} и остаточной стабильности P_{ms} .

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 температуре вязко-хрупкого перехода T_{B-X}), а также фиксации на температурной зависимости $\sigma_2(T)$ показателя хрупкой прочности σ_{2C} металла с КН при температуре T_c . При этом, практический интерес для исследований представляют сплавы, у которых $T_c < T_K$, так как в противном случае, материал не будет обладать достаточной конструкционной надежностью из-за своей высокой охрупчиваемости (рисунок 1).

В работе [5] был исследован достаточно большой для корректной статистической обработки набор КС. В качестве объектов анализа авторы [5] выбирали 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 квазистатическое растяжение образцов с кольцевым КН (радиус $r = 0,25$ мм; угол раскрытия $w = 45^\circ$ — далее концентратор типа К1) и статический трехточечный

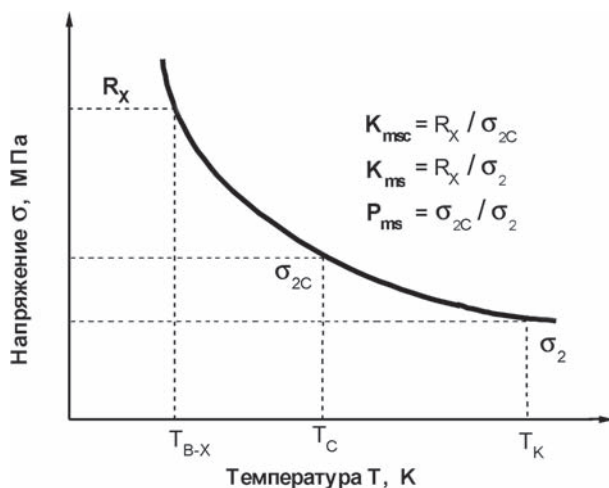


Рисунок 1 — Схема определения механических характеристик в концепции сопротивления металла хрупкости

изгиб образцов с усталостной трещиной (далее концентратор типа K2) и, соответственно, определяли критические температуры хрупкости T_c — по условию общей текучести [5] и T_0 — по методике Мастер кривой [6]. 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 результате обработки данных [5] с использованием методики [7] были определены характеристики хрупкой прочности R_x и характеристики механической стабильности при комнатной температуре $T_K = 293$ К (K_{ms}) и температуре T_c (K_{msc}) для исследованных КС. В таблице 1 представлены результаты определения базовых механических характеристик при температурах испытаний 293 К и T_c ; температуры T_0 , а также

характеристики R_x для некоторых наиболее типичных КС, исследованных в [5].

Для определения характеристики K_{msc} при температуре T_0 строили температурную зависимость $\sigma_2(T)$ по двум известным значениям прочности σ_2 при 293 К и σ_{2c} при T_c , на которой по известному значению T_0 определяли величину прочности $\sigma_2(T_0)$ (рисунок 2), а значение $K_{msc}(T_0)$ — согласно (2).

При построении температурной зависимости $\sigma_2(T)$ использовали базовую закономерность $\sigma_{0,2}(T)$, предложенную в работе [8] и модифицированную с учетом результатов работы [9] для условий квазистатического растяжения в следующем виде:

$$\sigma_{0,2}(T) = \sigma_{0,2}(293) + C_1 \cdot \exp[-(C_2 - C_3 \cdot \ln \dot{\epsilon}) \cdot T] - C_1 \cdot \exp[-(C_2 - C_3 \cdot \ln \dot{\epsilon}) \cdot 293], \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации (при квазистатическом растяжении: $\dot{\epsilon} = 0,0004 \text{ с}^{-1}$; $C_3 = 0,000415$ — константа); $\sigma_{0,2}(293)$ — условный предел текучести (прочность) при комнатной температуре испытаний (293 К);

Таблица 1 — Результаты определения базовых механических характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K при $T_{исп} = 293$ К; температур T_c , T_0 и характеристики хрупкой прочности R_x

Обозначение в [5]	Сплав	Структурное состояние	T_c , [5]	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ_K , %	T_0 , [5, 6]	R_x , МПа [7]
A	Fe	феррит	173	194	309	79,3	261	775
C	FeMn	феррит	98	317	481	74,1	148	949
O		феррит	103	245	467	68,5	173	1082
p		феррит	98	275	463	76,6	170	1099
S		феррит	108	271	437	72,9	188	905
E		феррит	78	331	492	75,2	143	1056
G	CrMoV	отп. бейнит	163	502	681	65,8	277	1383
H		отп. бейнит	78	495	663	75,7	153	1446
D		бейнит	93	708	843	68,3	218	1606
Y	15Ch2NMFA	отп. бейнит	208	842	928	48,9	267	1545
X		отп. бейнит	93	607	708	77,4	158	1452
R	45Mn	феррит-перлит	163	565	894	57,1	293	1638
P	Lo17CrNiMo	бейнит	168	915	1306	49,9	263	1920
J	10Ch2MFA	отп. бейнит	103	491	606	78,8	148	1327
I	CrNi	отп. бейнит	68	542	649	78,4	108	1351
T		отп. бейнит	68	396	628	66,1	108	1264
M	20CrNiMoV	отп. бейнит	103	676	801	56,7	242	1373
V		отп. бейнит	108	678	796	63,5	206	1463
K	42CrMo4	бейнит	108	524	747	67,9	228	1550
B	Lo8CrNiMo	бейнит	148	839	1038	51,7	293	1813
a	St. TRIP	отп. бейнит	138	430	545	85,5	243	1329

C_1 — коэффициент, который характеризует максимальную высоту термически преодолимых барьеров; C_2 — коэффициент, который зависит от плотности дислокаций и длины дислокационных сегментов [9]. В выражении (4) значение коэффициента C_2 зависит от величины пластической деформации. Это позволяет использовать его для построения не только температурной зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$, но и температурной зависимости σ_2 при замене в (4) $\sigma_{0,2}(T)$ на $\sigma_2(T)$, $\sigma_{0,2}(293)$ на $\sigma_2(293)$ и при условии сохранения значения коэффициента C_1 (рисунок 2).

Обсуждение результатов. В таблице 2 представлены результаты определения характеристики механической стабильности K_{ms} при $T_{исп} = 293$ К, параметра охрупчиваемости K_{msc} и остаточной механической стабильности P_{ms} от воздействия КН типа К1 при $T_{исп} = T_c$ и К2 при $T_{исп} = T_0$.

Характеристика механической стабильности K_{msc} , определяемая по (2), 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 конкретных условиях НДС, т. е. характеризует охрупчиваемость металла под воздействием определенного КН.

В настоящей работе авторы считают необходимым лишь обратить внимание читателя на принципиальную возможность количественной оценки такого негативного конструктивного фактора воздействия на надежность металлического изделия как охрупчивание вполне пластичного материала в присутствии определенного КН. С помощью параметра K_{msc} вероятную угрозу хрупкого разрушения можно предвидеть, если на этапе проектирования и расчета прочности изделия заранее сопоставить между собой параметры K_{ms} и K_{msc} для рекомендованного метода испытания сплава на хрупкость (например,

по методу Шарпи). Для этого потребуются заранее наработать некоторый экспериментальный банк данных по примеру приведенного в таблице 1 с определением температуры хрупкости T_c (или T_0) по одному из принятых стандартом критерию хрупкости (например, 50 % хрупкой составляющей в изломе образца) и прочности σ_{2c} при этой температуре для каждой стали. Вся дальнейшая процедура является сугубо расчетной. По методике, изложенной в работе [7], вычисляются показатели R_x , K_{ms} , а с учетом σ_{2c} определяется параметр охрупчивания КС K_{msc} .

В работе [10] было установлено, что существует взаимосвязь свойств «пластичность — прочность — механическая стабильность» КС и показано, что такая связь может быть количественно описана с помощью параболических уравнений регрессии $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = \text{const}$, которые, в зависимости от типа экстремума, можно разделить на два вида поведения механических характеристик. Первый вид характеризуется наличием максимумов ($\psi_K^{\text{макс.}}$, $\sigma_{0,2}^{\text{макс.}}$), а второй — наличием минимумов ($\psi_K^{\text{мин.}}$, $\sigma_{0,2}^{\text{мин.}}$) при заданных уровнях механической стабильности K_{ms} (рисунок 3).

В указанной работе, по результатам обработки достаточно большого банка данных КС, были установлены закономерности согласованного изменения характеристик прочности ($\sigma_{0,2}$) и пластичности (ψ_K) при условии постоянства уровня механической стабильности ($K_{ms} = \text{const}$), проведена оптимизация этих свойств и построены кривые оптимизации для системы их взаимосвязи (см. рисунок 3 — кривые 1 и 2 для КС 1-го и 2-го вида соответственно). Смысл таких кривых оптимизации заключается в том, что они характеризуют оптимальное (наилучшее) сочетание характеристик пластичности $\psi_K^{\text{опт.}}$ и механической стабильности $K_{ms}^{\text{опт.}}$ КС при заданной прочности $\sigma_{0,2}$.

Представляется интересным сравнить степень охрупчивания КС под воздействием двух разных КН. На рисунке 4 представлена общая схема изменения запаса сопротивления хрупкости исследованных КС, находящихся под воздействием КН — типа К1 и предельного (трещина) К2 в различных условиях НДС, а также кривые оптимизации для КС обоих видов поведения механических характеристик, необходимые для анализа.

Для удобства анализа некоторые наиболее показательные сплавы, подвергаемые рассмотрению ниже, обозначены буквенными символами согласно таблицам 1, 2 и выделены более крупными знаками на рисунке 4.

Результаты анализа показали, что:

– сплавы «О», «а» и «Н» являются одними из наилучших по показателю K_{ms} при разных уровнях начальной прочности $\sigma_{0,2}$ в условиях отсутствия КН. Последствия воздействия КН обоих типов К1 и К2 на сплавы «О» и «Н» оставляют их в ряду высококачественных с точки зрения сопротивления охрупчиванию по P_{ms} , тогда как для сплава «а» эти воздействия являются пагубными и пере-

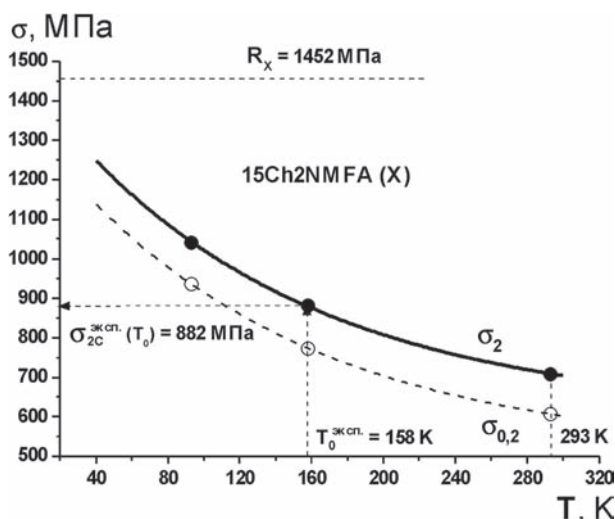


Рисунок 2 — Температурные зависимости прочностей $\sigma_{0,2}$ и σ_2 для сплава 15Ch2NMFA (X), используемые для определения экспериментального значения σ_{2c} по известной величине критической температуры хрупкости T_0 сплава

Таблица 2 — Результаты определения характеристики механической стабильности K_{ms} при $T_{исп} = 293$ К, параметра охрупчиваемости K_{msc} и остаточной механической стабильности P_{ms} от воздействия КН типа К1 при $T_{исп} = T_c$ и К2 при $T_{исп} = T_0$

Обозначение КС в [5]	Гладкий образец	КН типа К1 $T_{исп.} = T_c$		КН типа К2 $T_{исп.} = T_0$	
	K_{ms} (1)	K_{msc} (2)	P_{ms} (3)	K_{msc} (2)	P_{ms} (3)
A	2,831	1,736	1,629	2,492	1,136
C	2,173	1,318	1,650	1,625	1,338
O	2,840	1,415	2,005	1,898	1,496
p	2,746	1,598	1,718	2,122	1,294
S	2,344	1,365	1,717	1,878	1,249
E	2,344	1,200	1,954	1,560	1,503
G	2,131	1,723	1,237	2,089	1,020
H	2,283	1,297	1,761	1,746	1,308
D	1,911	1,375	1,390	1,773	1,078
Y	1,636	1,509	1,084	1,603	1,017
X	2,051	1,393	1,472	1,646	1,246
R	2,055	1,646	1,0	2,055	1,0
P	2,746	1,598	1,098	2,122	1,016
J	2,229	1,396	1,596	1,595	1,398
I	2,098	1,290	1,626	1,468	1,429
T	2,258	1,249	1,808	1,435	1,574
M	1,713	1,254	1,367	1,596	1,074
V	1,834	1,343	1,367	1,658	1,106
K	2,222	1,458	1,524	2,016	1,103
B	1,771	1,516	1,0	1,771	1,0
a	2,513	1,798	1,397	2,307	1,089

водят его в разряд среднего уровня качества при КН типа К1, а при предельном КН типа К2 — на низший уровень качества, что свидетельствует о весьма низком сопротивляемости охрупчиванию этого сплава (показано стрелками на рисунке 4);

- сплавы «Е», «Т» и «I», имеющие достаточно высокий (но не высший) уровень K_{ms} при разных уровнях начальной прочности $\sigma_{0,2}$ в условиях отсутствия КН, проявляют наивысший уровень остаточной механической стабильности P_{ms} под воздействием КН обоих типов, что свидетельствует о высокой сопротивляемости охрупчиванию этих сплавов;
- сплав «С», имеющий низкий уровень механической стабильности K_{ms} в условиях отсутствия КН, проявляет достаточно высокую сопротивляемость охрупчиванию (P_{ms}) под воздействием КН обоих типов (показано стрелками на рисунке 4);
- высокопрочный сплав «Р» с высоким уровнем механической стабильности K_{ms} при отсутствии КН

в определенной мере сохраняет свойство сопротивляемости охрупчиванию (P_{ms}) под воздействием КН типа К1, однако теряет это качество под воздействием предельного КН типа К2, что, в принципе, характерно для сталей такого класса прочности.

Исходя из вышесказанного, наилучшими из исследованной выборки КС по свойству сопротивляемости охрупчиванию (P_{ms}) следует признать следующие сплавы: «Т» ($\sigma_{0,2} = 396$ МПа) и «I» ($\sigma_{0,2} = 542$ МПа).

Таким образом, степень отличия параметра P_{ms} (с КН) от K_{ms} (без КН) является не только наглядной, но и количественной мерой особого механического свойства КС — свойства охрупчиваемости от воздействия КН.

Но полезная роль параметра P_{ms} не ограничивается тем, что он непосредственно влияет на такой важный показатель свойств КС, как критическая температура хрупкости T_c или T_0 , поскольку в нем содержится весь остаточный ресурс сопротивляе-

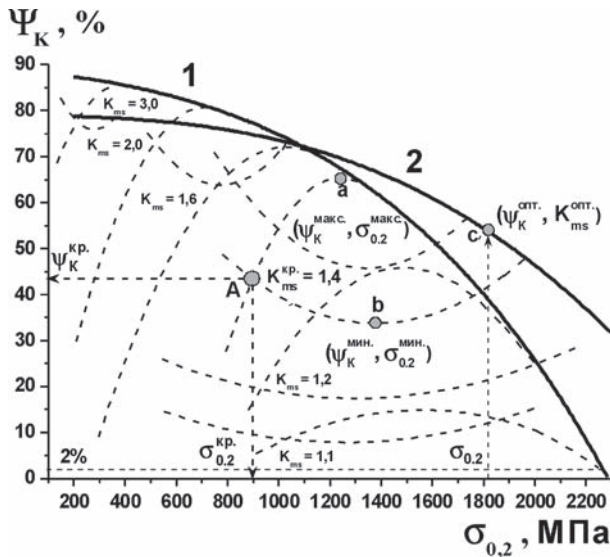


Рисунок 3 — Зависимости пластичности Ψ_K от прочности $\sigma_{0,2}$ для обоих видов поведения механических характеристик КС:

1-го вида (кривая оптимизации 1); 2-го вида (кривая оптимизации 2); штриховые изолинии — при некоторых заданных уровнях механической стабильности K_{ms} для 1-го и 2-го видов; «а» — максимум, «б» — минимум; «с» — точка сочетания оптимальных значений пластичности Ψ_K^{opt} и механической стабильности K_{ms}^{opt} на кривой оптимизации; «А» — точка пересечения зависимостей 1-го (выпуклая парабола) и 2-го (вогнутая парабола) видов; $\sigma_{0,2}^{кр.}$, $\Psi_K^{кр.}$ — критические значения прочности и пластичности в точке «А»

мости охрупчиванию, оказывающий сопротивление воздействию всех иных (кроме КН) факторов охрупчивания — низких температур, динамического нагружения, радиационного охрупчивания и т. п. Запас сопротивляемости охрупчиванию 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 фактографическим признакам.

Защита от ломкости (внезапного разрушения независимо от его природы) 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 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 или T_0 (см. рисунки 1, 2).

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

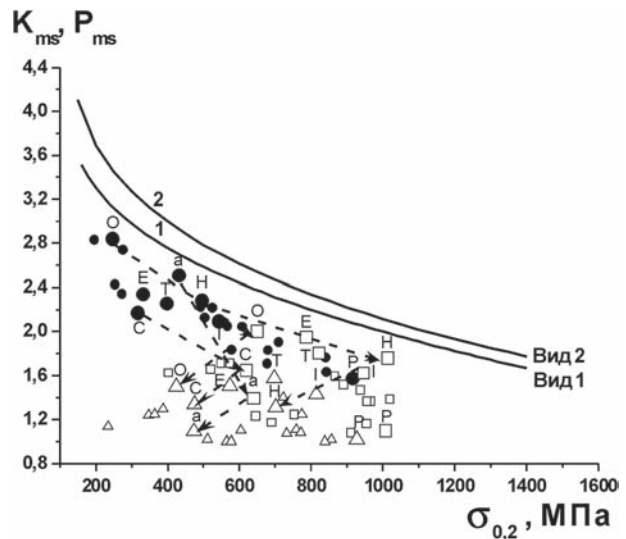


Рисунок 4 — Зависимости оптимальных значений механической стабильности K_{ms}^{opt} от прочности $\sigma_{0,2}$ для КС 1-го (кривая оптимизации 1) и 2-го (кривая оптимизации 2) видов.

Экспериментальные данные: $\bullet$ — $(\sigma_{0,2}, K_{ms})$; $\square$ — $(\sigma_{0,2c}, P_{ms})$ для КН типа К1; Δ — $(\sigma_{0,2c}, P_{ms})$ для КН типа К2; штриховые стрелки — направления изменения запаса сопротивления хрупкости исследованных КС, находящихся под воздействием КН

требованиям прочности конструкции, но и обладающим надлежащим уровнем сопротивляемости охрупчиванию, рассчитанном 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.

Заключение. Авторы попытались обосновать мысль о том, что многочисленные катастрофические (внезапные) 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 сопротивляемости охрупчиванию металлов и сплавов создают определенные предпосылки к рациональному выбору материала для изделия с предусмотренным запасом, блокирующим опасность проявления ломкости изделия в данных условиях эксплуатации. Исходя из концепции механической стабильности металлов, представляется

возможным разработать систему оценки эффективности охрупчивающего действия концентраторов напряжений на конструкционных сталях с различным уровнем прочности и пластичности.

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

Список обозначений

НДС — напряженно-деформированное состояние;

КН — концентраторы напряжений;

ТТ — твердое тело;

КС — конструкционные стали;

К1, К2 — типы концентраторов напряжений.

Список литературы

1. Мак-Ивли, А. Дж. Анализ аварийных разрушений / А. Дж. Мак-Ивли. — М. Техносфера, 2010. — 416 с.
2. Проектирование металлических конструкций / В.В. Бирюлев. — Л.: Стройиздат, 1990. — 432 с.

3. Котречко, С.А. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции / С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков. — Киев: Наук. думка, 2008. — 295 с.
4. Котречко, С.А. Механическая стабильность — универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла / С.А. Котречко, Ю.Я. Мешков, А.В. Шиян // Успехи физики металлов. — 2009. — Т. 10, № 2. — С. 207–228.
5. Smida, T. Prediction of fracture toughness temperature dependence from tensile test parameters / T. Smida, J. Babjak, I. Dlouhy // Kovove Mater. — 2010. — № 48. — Pp. 1–8.
6. ASTM E 1921: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. — 2005.
7. Шиян, А.В. Определение характеристик хрупкой прочности и механической стабильности конструкционных сталей / А.В. Шиян // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2012. — № 3–4. — С. 29–56.
8. Zerilli, F.J. Dislocation mechanics — based constitutive relations for materials dynamics calculations / F.J. Zerilli, R.W. Armstrong // J. Appl. Phys. — 1987. — Vol. 65, № 5. — Pp. 1816–1825.
9. Ярошевич, В.Д. Влияние структуры на активационные параметры процесса деформирования армо-железа при низких температурах / В.Д. Ярошевич, Д.Г. Рывкина // ФММ. — 1971. — Т. 31, вып. 6. — С. 1293–1298.
10. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных сталей / А.В. Шиян // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2013. — № 4. — С. 12–30.

MESHKOV Yuriy Ya., Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Techn. Sc.

Chief researcher, the department of physics of strength and fracture¹

E-mail: meshkov100@gmail.com

SHYIAN Artur V., Cand. Phys.-Math. Sc.

Senior researcher, the department of physics of strength and fracture¹

E-mail: shyian_av@ukr.net

¹Kurdyumov Institute of Metal Physics, Ukrainian Academy of Sciences, Kiev, Ukraine

Received 19 February 2015.

THE PROBLEM OF BRITTLENESS OF STRUCTURES

The well-known catastrophic failures of metallic structures and steel products are considered in the review as a result of loss of specific property of metal — its mechanical stability — under the effect of certain factors of embrittlement, for instance, stress raisers. Analyzing the experimental evidence, possibility to regulate the value of embrittlement under the stress raisers effect aimed at decrease in danger of brittle fracture of steel constructions is demonstrated.

Keywords: brittle strength, stress raisers, mechanical stability, tendency to embrittlement, optimization curve

Received

1. Mac-Eveleigh A.J. *Analiz avarijnyh razrushenij* [Analysis of emergency destruction]. Moscow, Technosfera Publ., 2010. 416 p.
2. Biiryulev V.V. *Proektirovanie metallicheskih konstrukcij* [Design of Metal Structures]. Leningrad, Stroyizdat, 1990. 432 p.
3. Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya. *Predel'naya prochnost'. Kristally, metally, konstruksii* [Limiting Strength of Crystals, Metals, and Structures]. Kiev, Naukova Dumka, 2008. 295 p.
4. Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Shiyani A.V. *Mehanicheskaja stabil'nost' — universal'naja mera soprotivleniya perehodu v hрупкое sostojanie metalla* [Mechanical stability: a universal measure of metals' resistance to ductile-to-brittle transition]. Usp. Fiz. Met. Publ., 2009, vol. 10, no. 2, pp. 207–228.
5. Smida T., Babjak J., Dlouhy I. Prediction of fracture toughness temperature dependence from tensile test parameters. *Kovove Mater*, 2010, no. 48, pp. 1–8.
6. ASTM E 1921: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range, 2005.

7. Shiyani A.V. *Opređenje harakteristik hрупkoj prochnosti i mehanicheskaj stabil'nosti konstrukcionnyh stalej* [Determination of brittle strength and mechanical stability of structural steels]. *Metallvedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals], 2012, no 3–4, pp. 29–56.
8. Zerilli F.J., Armstrong R.W. Dislocation mechanics — based constitutive relations for materials dynamics calculations. *J. Appl. Phys.*, 1987, vol. 65, no. 5, pp. 1816–1825.
9. Yaroshevich V.D., Ryvkina D.G. *Vlijanie struktury na aktivacionnye parametry processa deformirovanija armko-zheleza pri nizkij temperatura* [Influence of the structure on the activation of armco-iron deformation at low temperatures]. *Fiz. Met. Metallov* [Phys. Met. Metals], 1971, vol. 31, no. 6, pp. 1293–1298.
10. Shiyani A.V. *Vzaimosvjaz' svojstv prochnosti, plastichnosti i mehanicheskaj stabil'nosti konstrukcionnyh stalej* [Relation between strength, ductility and mechanical stability of structural steels]. *Metallvedenie i termicheskaja obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals], 2013, no 4, pp. 12–30.