

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО ИХ СПОСОБНОСТИ СОПРОТИВЛЯТЬСЯ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

А.В. Шиян, к.ф.-м.н.

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины

1. Введение

Изложенный в работе [1] феноменологический подход к трактовке состояния хрупкости металла, разработанный на основе концепции механической стабильности и понятия эффекта охрупчивания в результате воздействия различных факторов, в том числе концентраторов напряжений (КН), дал возможность установить, что в условиях концентрации напряжений три характеристики прочности: R_x – хрупкая прочность, σ_2 – прочность образца без КН при критической деформации $e_c \approx 2\%$ и σ_{2C} – прочность образца с КН при критической температуре вязко-хрупкого перехода T_c или T_0 в различных состояниях формируют три различных параметра сопротивляемости хрупкости (механической стабильности) – K_{ms} , P_{ms} и K_{msc} , каждый из которых несет свою собственную функцию в сфере защиты металла от хрупкости:

K_{ms} – отражает общий (исходный) запас сопротивления хрупкости металла как такового:

$$K_{ms} = R_x / \sigma_2, \tag{1}$$

где: R_x – хрупкая прочность металла (или для КС – сопротивление микросколу R_{MC} [1]) в условиях одноосного растяжения образца без КН;

P_{ms} – выявляет остаточный резерв сопротивления хрупкости (изломостойкости) металла, находящегося под действием КН:

$$P_{ms} = K_{ms} / K_{msc} = \sigma_{2C} / \sigma_2, \tag{2}$$

K_{msc} – является мерой охрупчиваемости металла и представляет собой часть запаса сопротивления хрупкости, потерянного в результате присутствия в образце КН:

$$K_{msc} = R_x / \sigma_{2C}. \tag{3}$$

Исходя из этого, в работе [2] была разработана система оценки эффективности охрупчивающего действия КН на конструкционные стали (КС) с различным уровнем прочности $\sigma_{0,2}$, пластичности ψ_K и исходной механической стабильности K_{ms} в виде конкретной методологии.

Определенный интерес для инженерной практики может представлять также и методика оценки конструкционного качества КС на основе показателя P_{ms} , отражающего остаточный резерв сопротивления хрупкости металла в условиях воздействия КН.

2. Оценка конструкционного качества сталей

Разработку методики по оценке конструкционного качества КС проводили на основе базы данных механических свойств сплавов, исследованных в работе [3] и детально проанализированных в рамках концепции механической

стабильности в работах [1, 2]. При этом использовали данные испытаний на одноосное растяжение образцов с кольцевым КН (радиус $r = 0,25$ мм.; угол раскрытия $w = 45^\circ$ – далее концентратор типа К1) и статический трехточечный изгиб образцов с усталостной трещиной (далее концентратор типа К2) и, соответственно, данные критических температур хрупкости T_c , полученные по условию общей текучести [3] и T_0 – по методике «мастер кривой» [4], а также данные испытаний гладких цилиндрических образцов при комнатной температуре испытаний (293 К) и температуре T_c . В работе использовали также характеристики и параметры, суть которых изложена в работах [1, 2].

Следует напомнить, что конструкционное качество КС в части склонности к охрупчиванию под действием КН отражено в параметре охрупчиваемости K_{msc} , что в относительной мере выражается показателем $\mu_{K_{msc}}^\sigma = K_{msc} / K_{msc}^{omn.}$ [2], при этом, чем меньше $\mu_{K_{msc}}^\sigma$, тем меньше охрупчиваемость сплава и выше его качество по охрупчиваемости.

Учитывая, что характеристика остаточной механической стабильности $P_{ms} = K_{ms} / K_{msc}$ (2), можно для оптимизированных сплавов, по аналогии с параметрами $K_{ms}^{omn.}$ и $K_{msc}^{omn.}$ [2], определить величину оптимальной (наилучшей) величины остаточной механической стабильности сплава $P_{ms}^{omn.}$ в условиях концентрации напряжений в виде соотношения:

$$P_{ms}^{omn.} = K_{ms}^{omn.} / K_{msc}^{omn.} \quad (4)$$

Таким образом, мерой *конструкционного качества металла*, по аналогии с мерой механического качества $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ и мерой качества по охрупчиваемости $\mu_{K_{msc}}^\sigma$, т.е. по доле механической стабильности K_{msc} , потерянной в результате охрупчивания образца с КН, целесообразно назвать меру $\mu_{P_{ms}}^\sigma$ по доле остаточной механической стабильности P_{ms} , соотнесенной к ее оптимальной (наилучшей) величине $P_{ms}^{omn.}$, сохраненной после охрупчивания образца с КН:

$$\mu_{P_{ms}}^\sigma = P_{ms} / P_{ms}^{omn.} = (K_{ms} / K_{msc}) \cdot (K_{msc}^{omn.} / K_{ms}^{omn.}) = \mu_{K_{ms}}^\sigma / \mu_{K_{msc}}^\sigma \quad (5)$$

Таким образом, мера конструкционного качества КС $\mu_{P_{ms}}^\sigma$ отражает степень превышения исходного уровня механического качества $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ над качеством $\mu_{K_{msc}}^\sigma$, потерянным за счет охрупчиваемости, т.е. остаточное качество металла в условиях концентрации напряжений.

Здесь важно отметить, что согласно (5) величина параметра $\mu_{P_{ms}}^\sigma$ определяется не только начальной прочностью данного сплава $\sigma_{0,2}$ (через $K_{ms}^{omn.}$),

но и его конечной прочностью $\sigma_{0,2C}$ (через K_{msc}^{onm} с заменой параметра $\sigma_{0,2}$ на $\sigma_{0,2C}$ [2]), поэтому верхний индекс в обозначении μ_{Pms}^σ имеет вышеуказанный смысл, в отличие от соответствующего индекса в обозначении параметра μ_{Kms}^σ , где он носит смысл только заданной начальной прочности $\sigma_{0,2}$, а у параметра μ_{Kmsc}^σ – конечной прочности $\sigma_{0,2C}$. Таким образом, согласно (5) указанное свойство параметра μ_{Pms}^σ зависит от отношения конечной μ_{Kmsc}^σ (с КН) и исходной μ_{Kms}^σ (без КН) мер качества КС – чем ближе величина $\mu_{Kms}^\sigma / \mu_{Kmsc}^\sigma$ к единице, тем ближе критическая температура хрупкости T_c или T_θ к комнатной (293 К), а величина параметра $\mu_{Pms}^\sigma \rightarrow 1$, что означает падение уровня качества сплава.

В работе [5] было установлено, что КС можно разделить на два вида в зависимости от типа экстремума (минимум или максимум) на параболических зависимостях $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = \text{const}$, которые описывают взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» этих сплавов, а в работе [2] было введено понятие видовой перехода, отражающее сохранение или изменение принадлежности сплава определенному виду в конечном состоянии (с КН при критической температуре хрупкости T_c или T_θ) по отношению к начальному состоянию (без КН при 293 К). При этом следует помнить, что переход сплава из 1-го вида во 2-ой (видовой переход 1-2) при условии $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{кр.}$ (где $\sigma_{0,2}^{кр.}$ – критическая величина прочности, определяющая условие разделения сплавов на виды [2, 5]) отражает повышение степени его охрупчиваемости K_{msc} и свидетельствует о существенной потере пластических свойств ψ_K , что, естественно, ведет к снижению уровня остаточной механической стабильности P_{ms} . В итоге, это приводит к снижению меры конструкционного качества μ_{Pms}^σ по (5) и отражает снижение качества сплава, находящегося под действием КН. Если же видовой переход 1-2 происходит при условии $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{кр.}$ (характерно для КС низкой прочности), то имеет место обратная ситуация – уровень P_{ms} растет, а параметр μ_{Pms}^σ по (5) отражает повышенное качество КС в условиях концентрации напряжений. Подобным образом трактуется видовой переход 2-1, с тем лишь отличием, что происходит обратная ситуация: при $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2}^{кр.}$ (характерно для КС средней и высокой прочности) параметры P_{ms} и μ_{Pms}^σ растут, что отражает повышение качества сплава, находящегося под действием КН, а при $\sigma_{0,2} \leq \sigma_{0,2}^{кр.}$ имеет место паде-

ние качественных показателей, что связано со снижением величин параметров P_{ms} и μ_{Pms}^{σ} . Конкретные примеры таких сложных, но, тем не менее, связанных между собой изменений свойств сплавов, находящихся в различных условиях (без КН и под действием КН), будут рассмотрены ниже.

3. Анализ изменения конструкционного качества сталей под воздействием концентраторов напряжений

На рис. 1 представлена общая схема изменения характеристик механической стабильности K_{ms} , P_{ms} и меры конструкционного качества μ_{Pms}^{σ} исследованных КС под воздействием КН – типа К1 и предельного (трещина) К2 в различных условиях НДС, а также некоторые зависимости, необходимые для анализа.

Для удобства анализа некоторые наиболее показательные сплавы, подверженные рассмотрению ниже, обозначены на рис. 1 буквенными символами согласно [1 – 3]. В табл. 1 приведены значения характеристик механической стабильности K_{ms} , K_{msc} и P_{ms} [1, 2], а также меры конструкционного качества μ_{Pms}^{σ} по (5).

Таблица 1.

Значения характеристик механической стабильности K_{ms} , K_{msc} и P_{ms} [1], а также меры конструкционного качества μ_{Pms}^{σ} при воздействии КН типа К1 и К2 для показательной выборки КС

Тип КН	Параметр	Обозначение КС согласно [1 – 3]							
		«О» FeMn	«С» FeMn	«Е» FeMn	«Т» CrNi	«а» St.TR.	«Н» CrMoV	«Д» CrNi	«Р» FeMn
гладкий образец (при 293 К)	K_{ms} [1]	2,84	2,17	2,34	2,26	2,51	2,28	2,10	2,75
К1 (при T_c)	K_{msc} [1]	1,42	1,32	1,20	1,25	1,80	1,30	1,29	1,60
К2 (при T_0)		1,90	1,63	1,56	1,44	2,31	1,75	1,47	2,12
К1 (при T_c)	P_{ms} [1]	2,01	1,65	1,95	1,81	1,40	1,76	1,63	1,10
К2 (при T_0)		1,50	1,34	1,50	1,57	1,09	1,31	1,43	1,02
К1 (при T_c)	μ_{Pms}^{σ} (5)	1,59	1,36	1,46	1,38	1,24	1,41	1,27	1,05
К2 (при T_0)		1,34	1,20	1,31	1,28	1,10	1,22	1,19	1,01

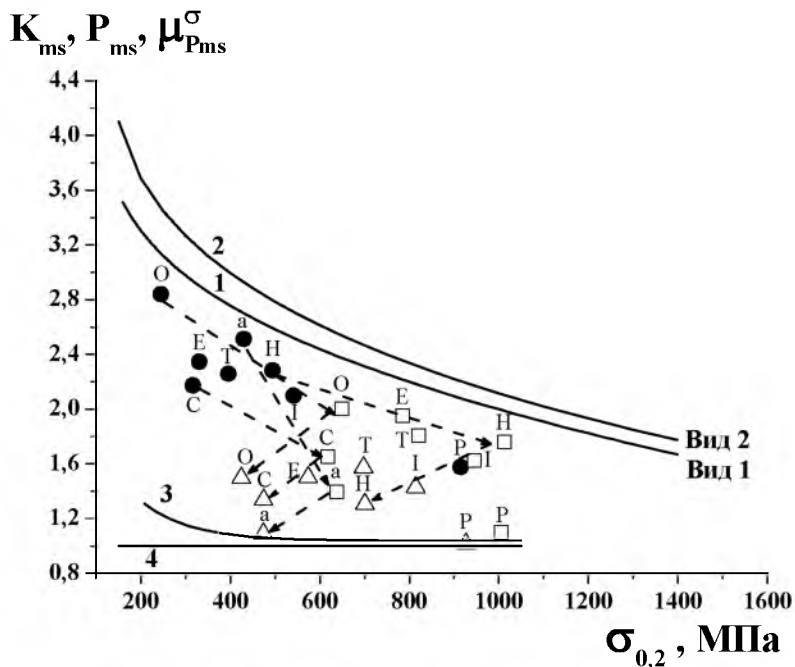


Рис. 1. Общая схема изменения характеристик механической стабильности K_{ms}, P_{ms} и меры конструкционного качества μ_{Pms}^{σ} для наиболее показательных сплавов из исследованной выборки КС [1 – 3]; б) наиболее показательные сплавы. Зависимости: оптимальных значений механической стабильности K_{ms}^{onm} от прочности $\sigma_{0,2}$ для сплавов 1-го (кривая 1) и 2-го (кривая 2) видов; нижней границы меры конструкционного качества μ_{Pms}^{σ} от прочности $\sigma_{0,2}$ для КН типа К1 (кривая 3) и типа К2 (кривая 4); условная граница уровня сплавов наивысшего качества (кривая 5); экспериментальные данные: ● – $(\sigma_{0,2}, K_{ms})$; □ – $(\sigma_{0,2C}, P_{ms})$ для КН типа К1; Δ – $(\sigma_{0,2C}, P_{ms})$ для КН типа К2; пунктирные линии со стрелками – направления изменения конструкционного качества

Результаты анализа показали, что мера конструкционного качества КС μ_{Pms}^{σ} по (5) является сложной функцией таких факторов, как видовой переход, начальная $\sigma_{0,2}$ и конечная $\sigma_{0,2c}$ прочность, начальная σ_2 и конечная σ_{2c} прочность при деформации $e_c \approx 2\%$ и имеет различные проявления с точки зрения сопротивляемости охрупчиванию под воздействием КН:

— 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, тогда как для сплава «а» эти воздействия являются пагубными и переводят его в разряд среднего уровня качества при КН типа К1 ($\mu_{Pms}^{\sigma} = 1,24$), а при предельном КН типа К2 – на низкий уровень качества ($\mu_{Pms}^{\sigma} = 1,10$), что свидетельствует о весьма низкой сопротивляемости охрупчиванию этого сплава (показано пунктирными линиями со стрелками на рис. 1);

— сплавы «Е», «Т» и «Д», имеющие достаточно высокий (но не высший) уровень K_{ms} в условиях отсутствия КН, сохраняют высокий уровень конструкционного качества $1,19 \leq \mu_{Pms}^{\sigma} \leq 1,46$ при воздействии обоих типов КН, что свидетельствует о высокой сопротивляемости охрупчиванию этих сплавов;

— сплав «С», имеющий сравнительно низкий уровень механической стабильности K_{ms} в условиях отсутствия КН, проявляет хорошую сопротивляемость охрупчиванию по P_{ms} под воздействием КН обоих типов и удовлетворительные качественные показатели по μ_{Pms}^{σ} (показано пунктирными линиями со стрелками на рис. 1);

— высокопрочный сплав «Р» высокого механического качества при отсутствии КН в определенной мере сохраняет свойство сопротивляемости охрупчиванию (P_{ms}) под воздействием КН типа К1, однако теряет конструкционное качество (μ_{Pms}^{σ}) под воздействием предельного КН типа К2, что, в принципе, характерно для сталей такого класса прочности.

Проведенный анализ позволил обозначить границы, которые характеризуют нижний предельный уровень конструкционного качества КС по показателю μ_{Pms}^{σ} при воздействии КН в исследованной области изменения прочно-

сти $190 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 1050 \text{ МПа}$: для КН типа К1 его можно описать зависимостью (кривая 3 на рис. 1):

$$\mu_{Pms}^{\sigma} = a \cdot \exp(-\sigma_{0,2}/b) + c, \quad (6)$$

где: $a = 1,860$; $b = 108,066$; $c = 1,038$ – эмпирические коэффициенты, а для КН типа К2 это будет постоянный предельный уровень (кривая 4 на рис. 1):

$$\mu_{Pms}^{\sigma} = \text{const} = 1, \quad (7)$$

который обуславливает равенство $T_0 = 293 \text{ К}$.

Исходя из вышесказанного, наивысшими величинами конструкционного качества μ_{Pms}^{σ} в исследованной выборке КС обладают следующие сплавы: под воздействием КН типа К1 – «О» ($\sigma_{0,2} = 245 \text{ МПа}$), «Е» ($\sigma_{0,2} = 331 \text{ МПа}$), «Т» ($\sigma_{0,2} = 396 \text{ МПа}$) и «Н» ($\sigma_{0,2} = 495 \text{ МПа}$), а сохранение наивысшего уровня качества под воздействием КН типа К2 наблюдается только у сплавов «О», «Е» и «Т».

В заключение важно заметить, что степень отличия параметра P_{ms} (с КН) от параметра K_{ms} (без КН) является не только наглядной, но и количественной мерой особого механического свойства КС – свойства охрупчиваемости от КН, равно как и степень отличия меры конструкционного качества μ_{Pms}^{σ} (с КН) от меры исходного механического качества μ_{Pms}^{σ} (без КН) является наглядным и количественным показателем изменения конструкционного качества КС в условиях концентрации напряжений.

Выводы:

1. Для оценки категории качества конструкционных сталей в различных условиях НДС предложены три количественных параметра:

μ_{Kms}^{σ} – мера исходного механического качества по механической стабильности K_{ms} , соотнесенной с оптимальной величиной $K_{ms}^{opt.}$, при заданной прочности $\sigma_{0,2}$;

μ_{Kmsc}^{σ} – мера качества по охрупчиваемости, отражающая долю механической стабильности K_{msc} , потерянной в результате охрупчивания образца с

концентратором напряжений, соотнесенную с оптимальной величиной этого показателя K_{msc}^{onm} . В отличие от меры исходного механического качества μ_{Kms}^{σ} , мера качества по охрупчиваемости μ_{Kmsc}^{σ} содержит противоположный смысл – качество сплава по охрупчиваемости тем выше, чем меньше показатель μ_{Kmsc}^{σ} :

μ_{Pms}^{σ} – мера конструкционного качества, отражающая долю механической стабильности P_{ms} , сохраненную после охрупчивания образца с концентратором напряжений, соотнесенную с оптимальной (наилучшей) величиной этого показателя P_{ms}^{onm} .

2. Мера конструкционного качества сталей μ_{Pms}^{σ} является сложной функцией таких факторов, как видовой переход, начальная $\sigma_{0,2}$ и конечная $\sigma_{0,2C}$ прочность, начальная σ_2 и конечная σ_{2C} прочность при деформации $e_c \approx 2\%$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мешков Ю.Я. Проблема хрупкости конструкций (обзор) // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. 73 - Дн-вск., ПГАСА, 2014.
2. 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. 73 - Дн-вск., ПГАСА, 2014.
3. Smida T., Babjak J., Dlouhy I. Prediction of fracture toughness temperature dependence from tensile test parameters // Kovove Mater. – 2010, 48. – P. 1 – 8.
4. ASTM E 1921: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. 2005.
5. Шиян А. В., Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Сорока Е.Ф., Носенко О.П., Федорова И.С. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных сталей // МТОМ. – 2013, № 4. – С. 12 – 30.