

УДК 669.01:539.4;539.2

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

А. В. Шиян*, к.ф.-м.н., Е. Ф. Сорока*, асп., О. П. Носенко**, к.т.н.

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины

**ГВУЗ «Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»

1. Постановка задачи

Известно, что разные конструкционные стали (КС) обладают различной реакцией на присутствие в изделиях соответствующего концентратора напряжений (КН), например, трещины или надреза, что означает различную чувствительность к эффекту охрупчивания [1], поэтому оценка их склонности к охрупчиванию в виде определенного показателя соответствующего механического свойства может представляться вполне актуальной задачей материаловедения. При этом следует заметить, что традиционные показатели пластичности, вязкости или трещиностойкости непригодны для оценки самого эффекта охрупчивания, т.к. не допускают сравнения этих показателей для исходного состояния металла (т.е. не содержащего КН) и для его результирующего состояния, охрупченного присутствием трещины или надреза. Из сказанного следует, что для такого сравнения и, тем самым, оценки эффекта охрупчивания, необходимо использовать другое свойство металла, которое можно было бы корректно измерить как на гладком образце, так и на образце, содержащем КН.

Такую процедуру сравнения можно осуществить при измерении характеристики так называемой «хрупкой прочности», т.е. прочности металла, в момент его перехода в хрупкое состояние [2]. Тогда путем сравнения величины хрупкой прочности R_x , полученной в результате испытаний стандартных гладких образцов на одноосное растяжение при температуре вязко-хрупкого перехода $T_{вх}$, и значения также хрупкой прочности $\sigma_{0,2C}$, полученного в результате испытаний при критической температуре вязко-хрупкого перехода T_c образцов с КН, можно получить количественную меру эффекта охрупчивания данной КС под действием определенного надреза, например, в виде отношения R_x/σ_{2C} .

В работе [1] показано, что охрупчивание металлов, означающее определенную потерю части пластичности, можно рассматривать как следствие потери определенной части механической стабильности $K_{мс}$, определяемой при температуре T_c в условиях концентрации напряжений. Таким образом, разработка методики оценки эффекта охрупчивания КС при наличии КН путем расчетного определения критических параметров: прочности металла σ_{2C} при деформации $e_c \approx 2\%$, механической стабильности $K_{мс}$ и температуры T_c является важной и актуальной. Особенно привлекательной стороной такой методики может стать возможность прогнозирования величин указанных критических параметров с использованием только базовых механических характери-

стик КС – $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K , полученных по результатам испытаний на одноосное растяжение стандартных гладких образцов.

2. Методика расчетного определения степени охрупчивания КС

В работе [3] был исследован достаточно большой для корректной статистической обработки набор КС. В качестве объектов анализа авторы [3] 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 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, определяли критические температуры хрупкости T_c – по условию общей текучести [3] и T_0 – по методике «мастер кривой» [4]. 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 настоящей работе была проведена обработка данных, полученных в [3], с использованием методики [5], что позволило определить характеристики хрупкой прочности R_x для исследованных КС, а также характеристики механической стабильности при комнатной температуре 293 К (K_{ms}) и при температуре T_c (K_{msc}). Результаты определения базовых механических характеристик ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K), а также характеристики хрупкой прочности R_x для некоторых наиболее типичных КС, исследованных в [3], представлены в работе [1].

Для определения характеристики K_{msc} при температуре T_0 строили температурную зависимость прочности металла $\sigma_2(T)$ при деформации $e_c \approx 2$ % по известным значениям прочности σ_2 при 293 К и σ_{2C} при T_c , на которой по известному значению T_0 определяли величину прочности $\sigma_2(T_0)$ (рис. 1), а критическое значение механической стабильности $K_{msc}(T_0)$ – согласно зависимости [1]:

$$K_{ms} = R_x / \sigma_{2C} , \quad (1)$$

где: R_x – хрупкая прочность металла (или для КС – сопротивление микросколу R_{MC} [6, 7]) в условиях одноосного растяжения образца без КН; σ_{2C} – прочность образца с КН при критической температуре вязко-хрупкого перехода T_c или T_0 .

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:

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

где $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации (при квазистатическом растяжении: $\dot{\epsilon} = 0,0004$ с⁻¹; $C_3 = 0,000415$ – константа); $\sigma_{0,2}(293)$ – условный предел текучести (проч-

ность) при комнатной температуре испытаний (293 К); C_1 – коэффициент, который характеризует максимальную высоту термически преодолимых барьеров; C_2 – коэффициент, который зависит от плотности дислокаций и длины дислокационных сегментов [9].

С учетом (2) зависимость $\sigma_2(T)$ можно представить в виде:

$$\sigma_2(T) = \sigma_2(293) \cdot [A + B \cdot \sigma_{0,2}(T) / \sigma_{0,2}(293)], \quad (3)$$

где: $\sigma_2(293)$ – прочность металла при критической деформации $e_c \approx 2\%$ и комнатной температуре испытаний (293 К) – определяется с использованием методики [10]; А, В – эмпирические коэффициенты.

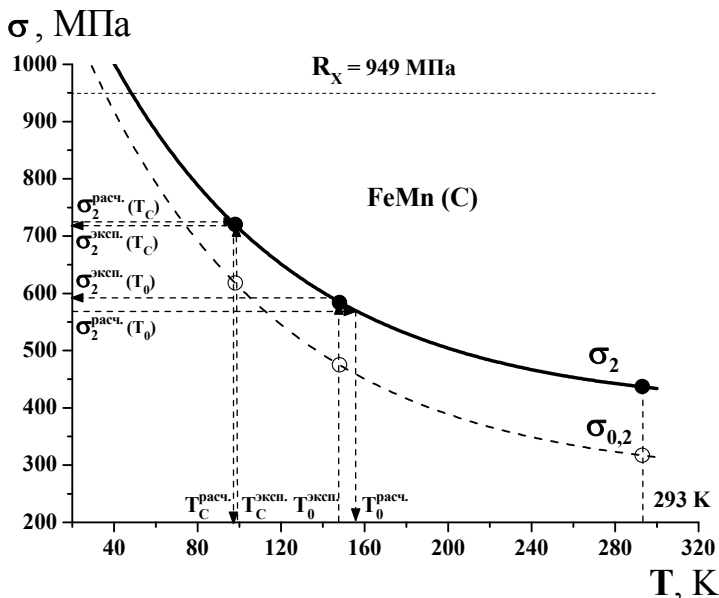


Рис. 1. Методы определения экспериментального значения $\sigma_2(T_0)$ и критических температур хрупкости T_c и T_0 ; температурные зависимости $\sigma_{0,2}(T)$ и $\sigma_2(T)$ для сплава FeMn (C) [1 – 3]; \circ , \bullet – экспериментальные значения

В работе [11] было показано, что существует взаимосвязь свойств «пластичность – прочность – механическая стабильность» КС, которая может быть количественно описана с помощью параболических уравнений регрессии $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ при условии $K_{ms} = \text{const}$. При этом такие параболические уравнения, в зависимости от типа экстремума, можно разделить на два вида. Первый вид поведения механических характеристик КС при изменении их прочности 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} . 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. Смысл таких кривых оптимизации заключается в том, что они характеризуют оптимальное (наилучшее) сочетание характеристик пластичности $\psi_K^{omn.}$ и механической стабильности $K_{ms}^{omn.}$ КС при заданной прочности $\sigma_{0,2}$. Таким образом, анализ результатов, полученных в [11], показал, что отношения величин характеристик пластичности ψ_K и механической стабильности K_{ms} к их оптимальным значениям $\psi_K^{omn.}$ и $K_{ms}^{omn.}$ на кривых оптимизации при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ можно рассматривать как показатели качества КС. При этом сочетание характеристик $\psi_K^{omn.}$ и $K_{ms}^{omn.}$ при заданном значении прочности $\sigma_{0,2}$ характеризует наивысшее качество металла и дает возможность в инженерной практике выбрать или заказать такой сплав, который по своим свойствам наиболее близок к оптимальным значениям указанных механических характеристик.

Для количественной интерпретации категории качества по признаку сопротивляемости хрупкости металла в работе [12] был предложен параметр меры оптимальности (качества) μ_{Kms}^σ по механической стабильности K_{ms} при заданной прочности $\sigma_{0,2}$ в виде отношения:

$$\mu_{Kms}^\sigma = K_{ms} / K_{ms}^{omn.} \quad (4)$$

Соответственно, для количественной оценки качества металла, охрупченного действием КН, целесообразно использовать меру качества μ_{Kmsc}^σ по механической стабильности K_{msc} при значении прочности $\sigma_{0,2c}$, полученной в условиях концентрации напряжений при критической температуре вязкохрупкого перехода T_c или T_0 , в виде отношения:

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

В [11] получены зависимости оптимальной величины механической стабильности $K_{ms}^{omn.}$ от прочности $\sigma_{0,2}$:

— для КС 1-го вида поведения механических характеристик¹:

$$K_{ms}^{omn.} = a \cdot \ln \left[b + c / (1 + d \cdot \sigma_{0,2})^m \right], \quad (6)$$

где: $a = -0,476$; $b = 2,87 \cdot 10^{-3}$; $c = 2,37 \cdot 10^{-3}$; $d = 5,40 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹]; $m = -4,673$ — эмпирические коэффициенты;

— для КС 2-го вида используют зависимость (6) с эмпирическими коэффициентами:

$$a = -0,392; b = 1,60 \cdot 10^{-4}; c = 1,28 \cdot 10^{-5}; d = 6,72 \cdot 10^{-3} \text{ [МПа}^{-1}\text{]}; m = -2,886 \quad (7)$$

¹ Для 1-го вида КС зависимость (6) откорректирована авторами.

Для получения зависимостей $\sigma_2^{omn.} = f(\sigma_{0,2})$ брали значения прочности σ_2 при критической деформации $\epsilon_c \approx 2\%$ для оптимизированных (наилучших) КС, используемых в [11] для построения кривых оптимизации. Анализ показал, что зависимости $\sigma_2^{omn.} = f(\sigma_{0,2})$ хорошо аппроксимируются экспоненциальной функцией вида:

$$\sigma_2^{omn.} = A_{1,2} \cdot \exp(\sigma_{0,2}/B_{1,2}) - C_{1,2}, \quad (8)$$

где: для КС 1-го вида: $A_1 = 5191,4$; $B_1 = 6144,3$; $C_1 = 5034,1$; а для КС 2-го вида: $A_2 = 5585,0$; $B_2 = 6519,3$; $C_2 = 5379,8$ – эмпирические коэффициенты.

Соответственно, для определения показателей $K_{msc}^{omn.}$ и $\sigma_{2C}^{omn.}$, в зависимости (6) – (8) вместо значений прочности $\sigma_{0,2}$ следует подставлять значения критической прочности $\sigma_{0,2C}$ при T_c или T_0 .

В основу методики расчетного определения параметра охрупчиваемости КС положены закономерности изменения конструкционного качества металла в виде показателя отношения двух мер качества $\mu_{Kmsc}^\sigma / \mu_{Kms}^\sigma$ от отношения соответствующих двух показателей механической стабильности K_{msc}/K_{ms} , характеризующих металл при двух видах испытаний – с КН и без КН. Указанные закономерности приведены на рисунке 2 для обоих начальных (при $T_{исп.} = 293\text{ K}$) видов КС.

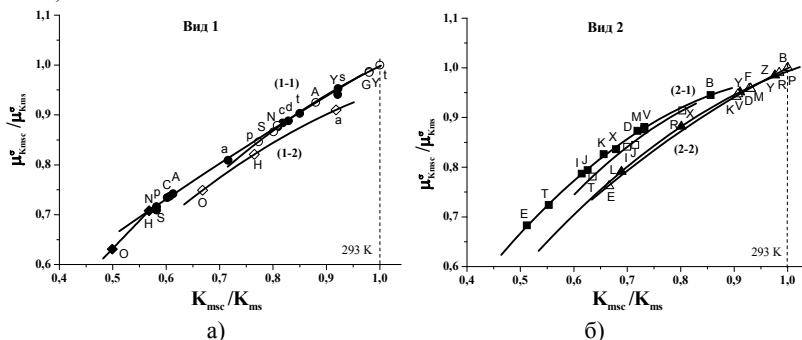


Рис. 2. Закономерности изменения отношения мер качества $\mu_{Kmsc}^\sigma / \mu_{Kms}^\sigma$ от отношения соответствующих характеристик механической стабильности K_{msc}/K_{ms} : а) сплавы, принадлежащие 1-му виду при $T_{исп.} = 293\text{ K}$; б) сплавы, принадлежащие 2-му виду при $T_{исп.} = 293\text{ K}$; экспериментальные данные: темные знаки – КН типа К1; светлые знаки – КН типа К2; 1-1, 1-2, 2-2, 2-1 – видовые переходы

Заметим, что при сравнении свойств металла при двух разных способах испытаний (образцы с КН и без КН) следует обращать внимание на возможность изменения видовой принадлежности КС в результате этих испытаний, т.е. на *видовой переход*, так как при этом изменяются показатели прочности металла при каждом из видов испытаний. Видовой переход оказывает влияние

на изменение показателя конструкционного качества сплава $\mu_{Kmsc}^\sigma / \mu_{Kms}^\sigma$, т.е. потери его сопротивляемости переходу в хрупкое состояние под охрупчивающим воздействием КН по отношению к исходным условиям реализации общего запаса сопротивления хрупкости металла как такового (гладкий образец). Таким образом, принадлежность КС к 1-му виду при комнатной температуре испытаний (293 К) образцов без КН и сохранение этой принадлежности при температурах T_c или T_0 при наличии КН имеет обозначение 1-1, соответственно для сплавов 2-го вида – 2-2, а изменение видовой принадлежности сплава при изменении указанных условий обозначено как видовой переход 1-2 или 2-1 (см. рис. 2).

Аналитическое описание закономерностей изменения конструкционного качества КС достаточно громоздко и, поэтому, выходит за рамки настоящей работы. Заметим лишь, что для решения задачи по определению характеристик прочности металла ($\sigma_{0,2C}$, σ_{2C}) при критической температуре вязкохрупкого перехода T_c или T_0 , была найдена связь показателя изменения конструкционной прочности КС при критической деформации $e_c \approx 2\%$ в виде отношения σ_2/σ_{2C} с соответствующим показателем изменения условного предела текучести $\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2C}$, нормированным на оптимальное значение прочности при $e_c \approx 2\%$ этого сплава в виде отношения $\sigma_2^{opt.}/\sigma_{2C}^{opt.}$ (рис. 3).

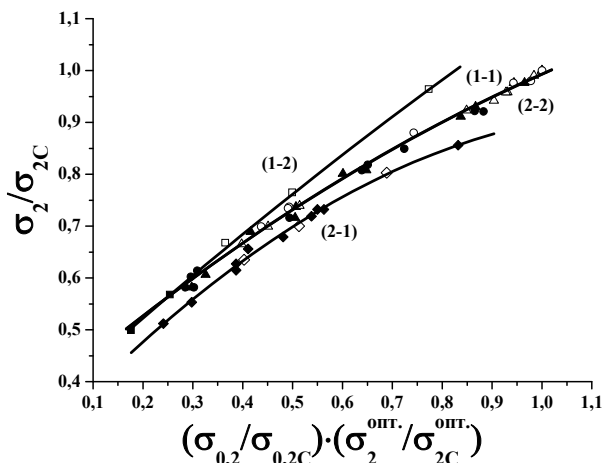


Рис. 3. Зависимости соотношения показателей прочности σ_2/σ_{2C} при $e_c \approx 2\%$ с соотношением показателей условного предела текучести $\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2C}$, нормированных на соответствующие оптимальные значения прочности при $e_c \approx 2\%$ для видовых переходов 1-1, 1-2, 2-2, 2-1

Зависимости, представленные на рисунках 2 и 3, дают возможность получить систему уравнений, решение которой численными методами позволяет определять критические параметры прочности $\sigma_{0,2C}$ и σ_{2C} при T_c или T_0 . При-

мер определения параметра σ_{2C} численными методами приведен на рис. 4 для одной из исследуемых КС, где:

$$A = K_{ms}^{omn.};$$

$$B = K_{msc}^{omn.} \cdot \sigma_{2C} \cdot (A + B \cdot X - C \cdot X^2) / \sigma_2, \quad (9)$$

где: $X = \sigma_2 / \sigma_{2C}$; $\sigma_{2C} = \sigma_2 / (a + b \cdot Y - c \cdot Y^2)$; $Y = (\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_2^{omn.} / \sigma_{2C}^{omn.})$; A, B, C, a, b, c — эмпирические коэффициенты.

Наконец, зная расчетное значение параметра σ_{2C} , можно согласно температурной зависимости определить величину критической температуры хрупкости T_c или T_0 для образца с КН (см. рис. 1), используя при этом такие характеристики КС, как: $\sigma_{0,2}$ и σ_2 , определяемые по результатам испытаний гладких образцов на одноосное статическое растяжение при $T_{исп.} = 293$ К, а также информацию о видовом переходе для данного сплава.

Методика определения принадлежности КС к данному виду по результатам испытаний гладкого образца на одноосное растяжение при $T_{исп.} = 293$ К и при T_c (случай определения характеристик охрупчиваемости на образцах с концентратором типа К1) приведена в [13], однако для прогнозирования видовой принадлежности сплава при температурах T_c или T_0 в случае отсутствия таких результатов (например, в случае образцов с концентратором типа К2) необходим дополнительный анализ. Исходя из этого, требуется дополнительная методика для определения конечного (при T_0) вида сплава и, соответственно, в целом видового перехода. Такая методика основана на использовании особых характеристик критической прочности $\sigma_{0,2}^{kp.}$ и пластичности $\psi_K^{kp.}$, определяющих прочностные и деформационные условия разделения сплавов на виды [13].

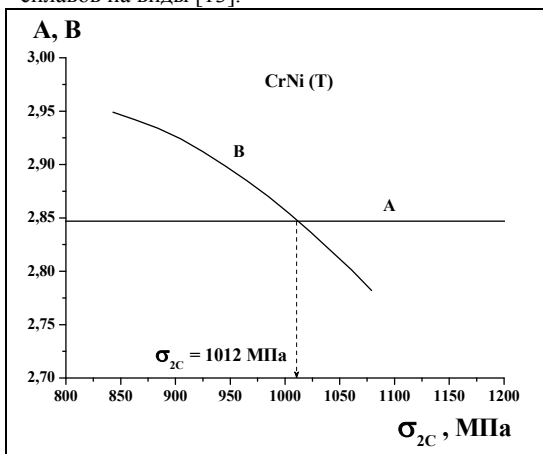


Рис. 4. Определение прочности σ_{2C} образца с КН из стали CrNi (Т) при критической температуре вязко-хрупкого перехода T_c в результате решения (9) численными методами

В результате анализа, проведенного в [13], была установлена зависимость $\sigma_{0,2}^{kp.} = f(K_{ms})$, использование которой в обратном виде позво-

лило описать связь граничного уровня механической стабильности K_{ms} , разделяющего КС на виды, с прочностью сплава $\sigma_{0,2}$. В такой интерпретации упомянутый уровень K_{ms} целесообразно назвать критическим – K_{ms}^{kp} :

$$K_{ms}^{kp} = \lg[b/(\sigma_{0,2} - a) - 1] - c, \quad (10)$$

где: $a = 107,40$; $b = 1128,80$; $c = 1,79$.

Принцип определения видового перехода выбранного сплава представлен на рисунке 5 для КС 1-го начального (при $T_{учн.} = 293$ К) вида.

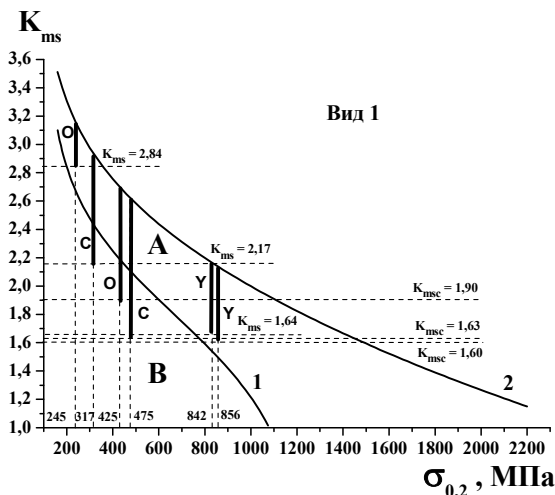


Рис. 5. Зависимости механической стабильности: критического уровня K_{ms}^{kp} (кривая 1) и оптимальной K_{ms}^{om} (кривая 2) от прочности $\sigma_{0,2}$ для определения видового перехода образцов начального 1-го вида КС, содержащих КН; А, В – области изменения конструкционного качества; «О», «С», «Y» – исследуемые сплавы [1 – 3]; темные полосы – отражение мер качества μ_{Kms}^{σ} , μ_{Kmsc}^{σ} по (4) и (5)

На рисунке 5 приведены: зависимость (10) — кривая 1, которая является ключевой для определения видового перехода КС; зависимость (6) – кривая 2, которая является опорной для определения мер качества сплава μ_{Kms}^{σ} , μ_{Kmsc}^{σ} и, поэтому, удобной для демонстрации изменения его конструкционного качества при воздействии КН. Из рисунка 5 следует, что видовой переход сплава отражает также изменение его конструкционного качества в условиях концентрации напряжений: сохранение вида сплава (видовой переход 1-1 или 2-2) происходит при условии, если уровни начальной $\mu_{Kms}^{\sigma} = K_{ms} / K_{ms}^{om}$ и конечной $\mu_{Kmsc}^{\sigma} = K_{msc} / K_{msc}^{om}$ мер качества по механической стабильности при заданной

прочности соответственно $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{0,2C}$ находятся в одной и той же области изменения конструкционного качества – выше А (случай «У») или ниже В (случай «С») критического уровня, обусловленного зависимостью $K_{ms}^{kp.} = f(\sigma_{0,2})$. Другими словами, обе указанные меры качества \geq или $<$ соответствующих мер $\mu_{K_{ms}}^{\sigma} = K_{ms}^{kp.} / K_{ms}^{omm.}$ и $\mu_{K_{msc}}^{\sigma} = K_{msc}^{kp.} / K_{msc}^{omm.}$ при тех же соответствующих уровнях прочности $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{0,2C}$. В этих случаях не происходит резкого изменения уровня конструкционного качества сплава в результате воздействия КН (видовые переходы 1-1 или 2-2). Если же уровни начальной и конечной мер качества находятся в разных областях А и В (случай «О»), то такое изменение происходит резко, что приводит к изменению конечного вида сплава (видовые переходы 1-2 или 2-1) – см. рисунок 5.

Суть методики прогнозирования видового перехода механического поведения КС в условиях концентрации напряжений (т.е. при критической температуре хрупкости) заключается в следующем:

1). Принцип определения конечного вида механического поведения КС не зависит от способа определения критической температуры хрупкости (T_c , T_0 и т.п.) и начального вида сплава при $T_{исп.} = 293$ К;

2). Проводят расчет характеристик $\sigma_{0,2C}$, σ_{2C} и K_{msc} для видового перехода 1-1 или 2-2 в зависимости от начального вида механического поведения сплава согласно методике, изложенной в [13];

3). Если по результатам расчета имеем $K_{ms} \geq K_{ms}^{kp.}$ и $K_{msc} \geq K_{msc}^{kp.}$ (случай «У» на рис. 5) или $K_{ms} < K_{ms}^{kp.}$ и $K_{msc} < K_{msc}^{kp.}$ (случай «С» на рис. 5), то видовая принадлежность сплава сохранилась, т.е. конечный вид механического поведения сплава соответствует начальному и расчет для видового перехода 1-1 или 2-2 верен;

4). Если же по результатам расчета по п. 2 имеем $K_{ms} \geq K_{ms}^{kp.}$, а $K_{msc} < K_{msc}^{kp.}$ (случай «О» на рис. 5), то видовая принадлежность сплава изменилась и расчет следует повторить для видового перехода 1-2 или, в случае принадлежности КС ко 2-му начальному виду – 2-1. Для случая $K_{ms} < K_{ms}^{kp.}$, а $K_{msc} \geq K_{msc}^{kp.}$ определение видового перехода проводится аналогично.

В заключение следует заметить, что область применения изложенных методик ограничивается температурным интервалом ≤ 293 К и диапазоном прочности $190 \text{ МПа} \leq \sigma_{0,2} \leq 950 \text{ МПа}$ исследованных КС.

3. Оценка точности предлагаемой методики

Результаты использования вышеизложенной методики для определения расчетных значений прочности $\sigma_{2C}^{расч.}$ при критических температурах хрупко-

Строительство, материаловедение, машиностроение

сти T_c и T_0 образцов с КН типа К1 и К2, соответствующих этим значениям, температур $T_C^{расч.}$ и $T_0^{расч.}$ (см. рис. 1), а также оценки ее точности представлены в табл. 1 для ряда исследуемых КС [1 – 3].

Таблица 1

Результаты определения характеристик прочности $\sigma_{2C}^{расч.}$ (T_c), $\sigma_{2C}^{расч.}$ (T_0), критических температур хрупкости $T_C^{расч.}$, $T_0^{расч.}$ для КН типа К1, К2 и оценки точности предлагаемой методики

КС*	КН типа К1, (T_c)						КН типа К2, (T_0)					
	$\sigma_{2C}^{эксп.}$, МПа	$\sigma_{2C}^{расч.}$, МПа	δ , %	$T_C^{эксп.}$, К	$T_C^{расч.}$, К	ΔT , К	$\sigma_{2C}^{эксп.}$, МПа	$\sigma_{2C}^{расч.}$, МПа	δ , %	$T_0^{эксп.}$, К	$T_0^{расч.}$, К	ΔT , К
J	950	978	2,9	103	97	-6	832	861	3,5	148	133	-15
X	1042	1023	-1,8	93	99	6	882	886	0,5	158	154	-4
M	1095	1106	1,0	103	98	-5	860	874	1,6	242	230	-12
V	1090	1101	1,0	108	104	-4	882	869	-1,5	206	216	10
H	1115	1114	-0,1	78	78	0	828	861	4,0	153	140	-13
I	1047	1011	-3,4	68	78	10	920	893	-2,9	108	117	9
T	1012	1012	0,0	68	68	0	881	883	0,2	108	107	-1
A	446	452	1,3	173	170	-3	311	329	5,8	261	245	-15
C	720	723	0,4	98	97	-1	584	569	-2,6	148	156	8
E	880	873	-0,8	78	81	3	677	686	1,3	143	141	-2
N	609	635	4,3	123	114	-9	454	478	5,3	198	182	-15
O	764	752	-1,6	103	107	4	570	583	2,3	173	162	-11
p	688	678	-1,5	98	101	3	518	520	0,4	170	166	-4
S	663	655	-1,2	108	109	1	482	500	3,7	188	176	-12
P	1336	1319	-1,3	168	178	10	1237	1238	0,1	263	256	-7

Примечание: δ – погрешность расчетного определения прочности $\sigma_{2C}^{расч.}$ относительно экспериментального значения $\sigma_{2C}^{эксп.}$; ΔT – абсолютное отклонение расчетных значений $T_C^{расч.}$, $T_0^{расч.}$ от экспериментальных $T_C^{эксп.}$ и $T_0^{эксп.}$; * – КС согласно [1 – 3]: «J» – 10Ch2MFA; «X» – 15Ch2NMFAA; «M», «V» – 20CrNiMoV; «H» – CrMoV; «I», «T» – CrNi; «A» – Fe; «C», «E», «N», «O», «p», «S» – FeMn; «P» – Lo8CrNiMo

Из таблицы 1 видно, что точность расчетного определения прочности металла $\sigma_{2C}^{расч.}$, при которой выборочный стандарт составляет: при воздействии КН типа К1 1,97% с достоверностью 0,958 в доверительном интервале $\pm 4,0\%$, а при воздействии концентратора типа К2 3,06% с достоверностью 0,950 в доверительном интервале $\pm 6,0\%$, достаточна для практического использова-

ния. При этом абсолютное отклонение расчетных значений критических температур хрупкости ΔT от экспериментальных для КН типа К1 не превышает ± 10 К, а для КН типа К2 – ± 15 К, что также является достаточно высоким показателем точности для использования на практике.

Важно также отметить, что точность регрессии базовых расчетных закономерностей $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma = f(K_{msc}/K_{ms})$ и $\sigma_2/\sigma_{2C} = f[(\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_2^{omm} / \sigma_{2C}^{omm})]$, при которой остаточная дисперсия не выше $3 \cdot 10^{-5}$ с достоверностью не ниже 0,996, позволяет считать эти зависимости функциональными.

Авторы работы [3] ставили задачу установить корреляционную зависимость между критическими температурами T_0 и T_c с целью заменить испытания образцов по методике «мастер кривой» (T_0) [4] на более простые испытания в условиях растяжения образцов с КН типа К1 (T_c).

В настоящей работе показано, что та же цель может быть достигнута более простым, чисто расчетным путем, исходя лишь из известных величин базовых механических свойств КС $\sigma_{0,2}$, σ_B и ψ_K на основе ранее разработанных методов расчета характеристик R_x и K_{ms} [5], а также предлагаемой в настоящей работе методике расчета критических значений характеристик прочности $\sigma_{0,2C}$, σ_{2C} при T_c или T_0 и, соответственно, самих значений температур T_c или T_0 .

4. Заключение

Для определения значения критической температуры хрупкости T_c образца конструкционной стали, содержащего концентратор напряжений определенной геометрии и находящегося в данных условиях напряженно-деформированного состояния, достаточно знать величины условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_2 при критической степени деформации $e_c \approx 2$ %, определяемые по результатам испытаний гладких образцов на одноосное статическое растяжение при $T_{исп.} = 293$ К, а также информацию о видовом переходе для данного сплава. При этом необходимо знать закономерности изменения конструкционного качества КС для данной геометрии КН и данных условий НДС.

Авторы выражают надежду, что предлагаемая ими новая методика определения критической температуры хрупкости в условиях концентрации напряжений станет полезным дополнением к применяемому ныне арсеналу методов оценки сопротивляемости конструкционных сталей хрупкости и, тем самым, будет способствовать повышению эксплуатационной надежности стальных изделий, конструкций и сооружений, нередко несущих в себе те или иные концентраторы напряжений.

Список использованных источников

1. Мешков Ю.Я. Проблема хрупкости конструкций (обзор) // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. ... - Дн-вск., ПГАСА, 2014. – С.
2. Мешков Ю. Я., Котречко С. А., Шиян А. В. Оценка конструкционного качества сталей по показателю прочности // Сталь. – 2013, № 12. – С. 67-70.
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. Определение характеристик хрупкой прочности и механической стабильности конструкционных сталей // МТОМ. – 2012, № 3-4, – С. 29-56.
6. 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.
7. Котречко С. А., Мешков Ю. Я. Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции. – Киев : Наукова Думка. – 2008. – 295 с.
8. Zerilli F.J., Armstrong R.W. Dislocation mechanics – based constitutive relations for materials dynamics calculations // J. Appl. Phys. – 1987. vol. 65, № 5. – P. 1816-1825.
9. Ярошевич В.Д., Рывкина Д.Г. Влияние структуры на активационные параметры процесса деформирования армко-железа при низких температурах // ФММ. – 1971, Т. 31, вып. 6. – С. 1293-1298.
10. Шиян А. В. Роль характеристик равномерной деформации при оценке механической стабильности конструкционных сталей и сплавов // МТОМ. – 2012, № 2. – С. 57-72.
11. 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.
12. Мешков Ю. Я., Котречко С. А., Шиян А. В., Большаков В.И., Носенко О.П., Мурашкин А.В. Новый подход к оценке качества конструкционных сталей // Сталь. – 2012, № 8. – С. 66-71.
13. Шиян А. В., Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Сорока Е.Ф., Носенко О.П., Федорова И.С. Методические основы оценки качества конструкционных сталей по их способности сопротивляться хрупкому разрушению при одноосном растяжении // МТОМ. – 2014, № 2. –С. 5-28.